ISSN 2413-5526

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал

Т. 5 № 1

Севастополь
2019

Э 651 ISSN 2413-5526
УДК 621.311

Э 651 **Энергетические установки и технологии: науч. журнал. – Севастополь: ФГАОУ ВО СевГУ, 2019. – Т. 5. - № 1. – 176 с.: ил.**

В научный журнал «Энергетические установки и технологии», включены статьи, посвященные актуальным вопросам современной энергетики. Журнал состоит из разделов: тепловые и ядерные энергетические установки, электротехнические комплексы и системы, экологическая безопасность, химические технологии атомных станций, информационные технологии в энергетике, моделирование физических процессов, физика в ядерной энергетике, автоматизация процессов контроля и управления, судовые энергетические установки, холодильные установки, гидравлические энергоустановки, компьютерная инженерия и техническая диагностика.

Предназначен для научных работников, инженеров и специалистов, работающих на предприятиях и в организациях энергетики, аспирантов и студентов технических вузов. Журнал выходит 4 раза в год.

Р е д а к ц и о н н а я к о л л е г и я:

Качур С.А. (главный редактор), д.т.н., доцент;
Омельчук Ю.А.(заместитель главного редактора), к.х.н., доцент;
Черкашина Н.И.(ответственный секретарь), к.т.н., доцент;
Сафонов В.А., д.т.н., профессор; *Пухлий В.А.,* д.т.н., профессор;
Пучков В.Н., д.т.н., профессор; *Акимов А.М*., д.т.н., профессор;
Федоровский К.Ю., д.т.н., профессор; *Олейников А.М*., д.т.н., профессор;
Тимощенко А.И., д.т.н., профессор; *Карницкий А.Б*., д.т.н., профессор;
Высоцкий В.Е., д.т.н., профессор; *Краснодубец Л.А.,* д.т.н., профессор;
Прибатурин Н.А., д.т.н., профессор; *Кирияченко И.А.,* к.т.н., профессор;
Магдыч Е.А., к.т.н., доцент; *Федорова С.А.,* к.пед.н., доцент;
Мирошниченко С.Т., к.т.н., доцент; *Свириденко И.И.,* к.т.н., доцент;
Матузаев К.Б., к.т.н., доцент; *Скидан А.А.,* к.т.н., доцент;
Углов А.В., к.т.н., доцент; *Шайтор Н.М*., к.т.н., доцент;
Ерофеев В.А., к.т.н., доцент; *Ожиганова М.И*., к.т.н., доцент;
Гусева Е.В., к.т.н., доцент; *Щекатурина Т.Л.,* д.х.н., доцент

Учредитель и издатель:
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет».
ул. Университетская, 33. Севастополь, 299053, Российская Федерация

Рекомендован к печати Ученым советом ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.
Свидетельство ПИ № ФС 77 – 64120 от 25.12.2015 г.

© Издание ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», 2019

СОДЕРЖАНИЕ

Тепловые и ядерные энергетические установки **7**

Браславский Ю.В., Матузаев К.Б., Мерзликин Г.Я., Сукрушев А.В. Анализ экономической целесообразности внедрения длительных топливных циклов на АЭС с ВВЭР-1000 7

Качур С.А. Управление энергораспределением ядерного реактора на основе сетей Петри 14

Пухлий В.А., Мирошниченко С.Т., Соколов В.В., Пухлий К.В. Гидродинамическая акустика. Сообщение 2. Турбулентное движение жидкости 21

Пухлий В.А., Журавлев А.А., Глушкова Е.В., Корнеева Н.К., Пичугова Л.Н. Полуаналитический метод решения краевых и начальных задач применительно к расчету рабочих лопаток центробежных насосов открытого типа 34

Сукрушев А.В., Браславский Ю.В., Аникевич К.П. Анализ возможности переработки трапных вод при пониженном давлении 39

Шаповаленко В.В., Мерзликин Г.Я., Матузаев К.Б., Браславский Ю.В. Механизм протекания кризиса теплоотдачи и влияние его на температурное поле тепловыделяющего элемента в корпусных ядерных реакторах кипящего типа 45

Шаповаленко В.В. Эволюция поиска решения в области выравнивания тепловыделений в ВВЭР 51

Автоматизация процессов контроля и управления **56**

Кузнецова Н.И., Нурзай В.А. Влияние надежности технических средств информационных и управляющих систем энергоблоков на безопасность эксплуатации АЭС 56

Нурзай В.А., Быковский Ю.М., Кузнецова Н.И. Погрешности оптического канала измерения вибрации 64

Скрябина Е.В., Моисеев Д.В, Михайлова О.С. Обзор электронной базы для реализации вероятностно-цифрового контроллера 71

Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии **75**

Кувшинов В.В., Какушина Е.Г., Зубков К.В., Ислямова Э.Ю., Ненько А.А. Увеличение мощностных характеристик фотоэлектрического модуля при использовании плоского концентратора на основе боковых отражающих поверхностей 75

Кувшинов В.В., Какушина Е.Г., Васильченко М.А., Киндлер В.В., Кувшинова В.В. Сравнение теоретических и экспериментальных результатов исследования характеристик фотоэлектрических батарей при изменении освещенности их рабочей поверхности 81

Малюк Е.Г., Титаренко О.Н. Диагностика технического состояния высоковольтного оборудования путем измерения характеристик частичных разрядов 87

Рясков Ю.И., Шайтор Н.М., Горпинченко А.В. Применение концентраторов ветровых потоков в ветроэнергетческих установках 94

Титаренко О.Н., Малюк Е.Г. Использование высокотемпературных сверхпроводников как перспективное направление в электроэнергетике 100

Шайтор Н.М., Чернова Е.Ю. Рациональные варианты применения реклоузеров при последовательном секционировании в электрических сетях 6-10 кВ 106

Электротехнические комплексы и системы **109**

Гайдук С.В. Разработка модели формирования самоконтроля в процессе преподавания дисциплины «Электротехника» для будущих специалистов энергетических комплексов 109

Смирнов В.В., Скидан А.А., Кавун А.И. Анализ диагностики механического состояния опорно-стержневых изоляторов методом акустической эмиссии 116

Смирнов В.В., Скидан А.А., Кавун А.И. Анализ ультразвукового метода диагностики механического состояния изоляторов 120

Панасенко А.А., Колодяжный В.В. О возможности применения «изменяющегося» режима заземления нейтрали в сети 6-35 кВ 123

Углов А.В., Углова М.Б., Дубков Е.А, Наумичёва Ю.О., Румянцева В.В. Уменьшение токов небаланса в дифференциальных защитах трансформаторов, выполненных с использованием реле ДЗТ-20 130

Химические технологии **137**

Пономаренко П.А., Фролова М.А., Тананаев И.Г., Пшеничная Д.О. Анализ генерации радиоактивных газов в экспериментальных устройствах исследовательского реактора ИР-100 137

Черкашина Н.И., Ерофеев В.А. Оценка эффективности новых сорбционных материалов при очистки водных сред 145

Федорова С.А., Гавриш В.М., Гавриш О.П., Чайка Т.В., Баранов Г.А. Определение оптимальных концентраций добавок нанопорошков тугоплавких металлов для увеличения прочностных характеристик бетона 151

Экологическая безопасность **156**

Гережун А.В., Пономаренко П. А., Фролова М.А. Радиоэкологический анализ атомной бомбардировки Хиросимы 156

Истомин В.И., Тверская С.Е., Хлебникова В.В. Повышение экологической безопасности судов путем рециркуляции части выпускных газов дизелей 160

Кучерик Г.В., Омельчук Ю.А. Комплексная экологическая оценка качества вод малых рек региона Севастополя 166

CONTENTS

Thermal and nuclear power plant **7**

Braslavskiy Yu.V., Matuzaev K.B, Merzlikin G.Ya., Sukrushev A.V. Analysis of Economic Efficiency of Long-Term Fuel Cycles Introduction at the NPP with WWER-1000 7

Kachur S.A. Control by Power Distribution of Nuclear Reactor on the Basis of the Petry Nets 14

Pukhliy V.A., Miroshnichenko S.T., Sokolov V.V., Pukhliy K.V. Hydrodynamic acoustics. The message 2. Turbulent movement of a liquid 21

Pukhliy V.A., Zhuravlev A.A., Glushkova E.V., Korneeva N.K., Pichugova L.N. Semianalytical method of the decision of regional and initial problems with reference to calculation of working blades of centrifugal pumps open type 34

Sukrushev A.V., Braslavskiy Yu.V., Anikevich K.P. Analysis of the possibility of trap water processing under reduced pressure 39

Shapovalenko V.V., Merzlikin G.Yu., Matyzaev K.B., Braslavskiy Yu.V The mechanism of the heat transfer crisis, his influence on temperature field in the fuel element in the BWR 45

Shapovalenko V.V. Evolution of the search for a solution in the field of heat generation equalization in the VVER 51

Process automation and control **56**

Kuznetsova N.I., Nurzai V.A Influence of reliability of technical means of information and control systems of power units for safety NPP operation 56

Nurzai V.A., Bykovsky Ju.M., Kuznetsova N.I. Errors of the optical channel of vibration measurement 64

Skryabina E.V., Moiseev D.V., Mikhaylova O.S. Overview of the electronic base for the implementation of the probabilistic digital controller 71

Alternative and renewable energy sources **75**

Kuvshjnov V.V., Kakyshina E.G., Zubkov K.V., Islyamova E.Y., Nenko A.A. Increasing the power characteristics of the photovoltaic module using a flat concentrator based on the side reflective surfaces 75

Kuvshjnov V.V., Kakyshina E.G., Vasilchenko M.A., Kindler V.V., Kuvshjnova V.V. Comparison of theoretical and experimental results of the study of the characteristics of photovoltaic cells when changing the illumination of their working surface 81

Malyuk E.G.,Titarenko O.N. The diagnosis of technical condition of high voltage equipment by measuring partial discharges 87

Rjaskov J.I., Shaytor N.M., Gorpinchenko A.V. The use of hubs of wind flows in wind energy 94

Titarenko O.N., Malyuk E.G. The use of high-temperature superconductors as a promising direction in the power industry 100

Shaytor N.M., Chernova K.Yu. Rational options for the use of reclosers for sequential sectioning in electrical networks 6-10 kV 106

Electrotechnical complexes and systems **109**

Gaiduk S.V. The elaboration of model for self-monitoring formation in the electrical engineering training process for energy complexes future operators 109

Smirnov V.V., Skidan A.A., Kavun A.I. Analysis of diagnostics of mechanical state of support rod insulators by acoustic emission method 116

Smirnov V.V., Skidan A.A., Kavun A.I. Analysis of ultrasonic method of diagnostics of mechanical condition of insulators 120

Panasenko A.A., Kolodyazhny V.V. On the possibility of applying the "changing" mode of neutral grounding in the network of 6-35 kV 123

Uglov A.V., Uglova M.B., Dubkov E.A., Naumycheva J.O., Rumyantseva V.V. Diminishment of currents of disparities in the differential protection of transformers implemented with the use of device the DZT-20 130

Chemical technology of nuclear power plants **137**

Ponomarenko P.A., Frolova M.A., Tananaev I.G., Pshenichnaya D.O. Analysis of radioactive gas generation in experimental devices of the research reactor IR-100 137

Cherkashina N.I., Erofeev V.A. Evaluation of the effectiveness of new sorption materials in the treatment of aquatic environments 145

Fedorova S.A., Gavrish V.M., Gavrish O.P., Chaika T.V., Baranov G.A Determination of optimal concentrations of additives of nanopowders of refractory metals to increase the strength characteristics of concrete 151

Environmental Safety **156**

Gerezhun A.V., Ponomarenko P.A., Frolova M.A. Radioecological analysis of the atomic bombing of Hiroshima 156

Istomin V.I., Tverskaya S.E., Hlebnikova V.V. Improving the environmental safety of ships by recycling part of the exhaust gases of diesel engines 160

Kucherik G.V., Omelchuk Yu.A. Integrated environmental assessment of the water quality of small rivers in the region of Sevastopol 166

ТЕПЛОВЫЕ И ЯДЕРНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

УДК.621.039.003

Анализ экономической целесообразности внедрения длительных топливных циклов на АЭС с ВВЭР-1000

Ю.В. Браславский[1], К.Б. Матузаев[2], Г.Я. Мерзликин[3], А.В. Сукрушев[4]
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия.
[1]a1a67@yandex.ru, [2]matuzaev@mail.ru, [3]merzlikin2019@yandex.ru, [4]sukrushev1949@yandex.ru

Статья поступила 23.01.2019 г.; после доработки 28.01.2019 г.

Аннотация

В настоящее время в отечественной атомной энергетике наблюдается тенденция к увеличению продолжительности топливных кампаний. При этом важно знать, как увеличение длительности топливного цикла отразится на экономических показателях АЭС. В статье выполнена расчетная оценка влияния продления кампании реактора на величину КИУМ, а также оценена экономическая целесообразность внедрения длительных топливных циклов на АЭС с ВВЭР-1000.

Ключевые слова: топливная кампания, коэффициент использования установленной мощности.

Analysis of Economic Efficiency of Long-Term Fuel Cycles Introduction at the NPP with WWER-1000

Yu.V. Braslavskiy[1], K.B Matuzaev[2], G. Ya. Merzlikin[3], A.V. Sukrushev[4]
Sevastopol State University, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia.
[1]a1a67@yandex.ru, [2]matuzaev@mail.ru, [3]merzlikin2019@yandex.ru, [4]sukrushev1949@yandex.ru

Received 23.01.2019 y.; received in final form 28.01.2019 y.

Abstract

Currently, nuclear power industry in Russia tends to lengthen reactor life. However, it is important to know what impact the reactor life lengthening will have on the NPP economic indicators. So, impact of reactor life lengthening on the value of utilization factor of installed capacity is estimated in the article, as well as economic efficiency of long-term fuel cycles at the NPP with WWER-1000 is calculated.

Keywords: reactor life, utilization factor of installed capacity.

Введение

Одной из основных характеристик, показывающих экономическую эффективность атомной электростанции, считается коэффициент использования установленной мощности (КИУМ). Для отдельного энергоблока КИУМ рассчитывается как отношение среднеарифметической мощности за выбранный период времени к установленной мощности, либо как отношение фактической выработки электроэнергии к максимально возможной на номинальной мощности [1].

Результаты расчетов по обоим алгоритмам будут численно равны, но второй алгоритм проще с расчетной точки зрения.

Но если КИУМ отдельного энергоблока определяется однозначно, то для группы однотипных реакторов этот показатель может рассчитываться по-разному, отчего часто возникают существенные расхождения в оценках для одних и тех же типов электростанций.

В частности, КИУМ может рассчитываться как усредненное (среднеарифметическое), либо как средневзвешенное значение по группе реакторов. Первый метод лучше отражает типичный диапазон значений КИУМ для группы реакторов, второй – в большей мере учитывает распределение мощности по реакторам данной выборки.

Различие в результатах двух подходов может составлять несколько процентов, что является важнейшей причиной значительных расхождений в статистике этого коэффициента, которую приводят разные источники.

КИУМ также существенно зависит от периода, для которого проводится расчет. Например, удачный выбор отрезка времени, в течение которого не производилось крупных ремонтов и модернизаций, обеспечит более высокий КИУМ.

По этой причине, сравнивая эффективность реакторов, иногда целесообразно сопоставлять их работу в разные периоды времени. Наиболее показателен КИУМ, рассчитанный для длительных, многолетних интервалов, особенно для всего периода эксплуатации установки – сравнение именно таких показателей является самым корректным.

Наконец, КИУМ оценивается, как правило, исходя из мощности нетто, однако, в некоторых случаях используют брутто.

Хотя КИУМ считается основным показателем эффективности эксплуатации АЭС, он не учитывает некоторых нюансов.

Прежде всего, этот коэффициент отражает фактическую, а не потенциальную степень использования мощности, т.е. не принимает во внимание возможность поставки дополнительной энергии, которая была у эксплуатирующей компании, но не реализовалась в силу тех или иных обстоятельств, например, вследствие работы энергоблока в полупиковом режиме или системных ограничений. Учет этого фактора позволяет более точно отразить эффективность использования мощности.

В настоящее время в отечественной атомной энергетике наблюдается тенденция к увеличению продолжительности топливных кампаний. При этом важно понимать, как это отразится на основных экономических показателях АЭС.

Постановка цели и задач научного исследования

Целью проводимого исследования является проведение анализа экономической целесообразности внедрения длительных топливных кампаний на АЭС ВВЭР-1000.

Для выполнения поставленной цели необходимо решить следующие научные задачи:

- выполнить расчетную оценку влияния продления кампании реактора на величину КИУМ;
- оценить экономическую целесообразность внедрения длительных топливных циклов на АЭС с ВВЭР-1000.

Расчетная оценка влияния продления кампании реактора на величину КИУМ

Для расчета КИУМ использовалось следующее выражение

$$\text{КИУМ} = \frac{n \cdot T_{\text{эфф}}}{n \cdot T_{\text{эфф}} + (n-1) \cdot \text{СР} + \text{КР}}, \quad (1)$$

где $T_{\text{эфф}}$ – эффективная среднегодовая кампания топлива;

n – периодичность капитальных ремонтов;

СР, КР – длительность средних и капитальных ремонтов.

В качестве расчетных данных использовались реальные величины для четырехблочной АЭС с ВВЭР-1000. При этом прирост КИУМ определялся для различных вариантов по сравнению с базовым вариантом ($T_{\text{эфф}}$ = 288, n = 4, КР = 85, СР = 55). Результаты расчетных оценок приведены в табл. 1.

Таблица 1. *Зависимость КИУМ от длительности реакторных кампаний и ремонтов при различной периодичности капитальных ремонтов*

Тэфф	КИУМ (%) / прирост КИУМ (%)					
	КР = 85, СР = 55		КР = 80, СР = 50		КР = 65, СР = 40	
	n = 4	n = 5	n = 4	n = 5	n = 4	n = 5
288	82,2/ 0,0	82,5/ 0,3	83,4/ 1,2	83,7/ 1,6	86,2/ 4	86,5/ 4,3
365	85.4/ 3,2	85,7/ 3,5	86,4/ 4,2	86,7/ 4,5	88,8/ 6,6	89/ 6.2
420	87,0/ 4,9	87,3/ 5,1	88,0/ 5,8	88,2/ 6,1	90,1/ 7,9	90,3/ 8,1
480	88,5 /6,3	88,7/ 6,6	89,3/ 7,1	89,6/ 7,4	91,2/ 9	91,4/ 9,2
700	92,1/ 9,9	92,3/ 9,8	92,6/ 9,2	92,8/ 9,1	93,8/ 11,6	93,9/ 11,7

Оптимальное планирование кампаний реактора без пересечения сроков ремонтов и проведения их в зимний период возможно только

при средней длительности $T_{эфф}$ = 308 суток и $T_{эфф}$ = 480 суток (табл. 2 и 3).

Однако только длительности $T_{эфф}$ = 700 суток возможно получение максимального значения коэффициента использования установленной мощности, равного 93,9 % при КР = 65 суток и СР = 40 суток.

Таблица 2. *Оптимальный график ремонта и эксплуатации четырехблочной АЭС при длительности кампании реактора около 310 эфф. суток*

Год	КИУМ, %	Зима			Лето							Зима	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	84,3				КР1		СР2			СР3	СР4		
2	84,3				СР1		КР2			СР3	СР4		
3	84,3				СР1	СР2		КР3			СР4		
4	84,3				СР1	СР2		СР2	КР4				

Таблица 3. *Оптимальный график ремонта и эксплуатации четырехблочной АЭС при длительности кампании реактора около 480 эфф. суток*

Год	КИУМ, %	Зима			Лето						Зима		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	87,7			СР1	КР4						СР2		
2	89,7			СР3	СР1						СР4		
3	91,1			СР2					КР3				
4	87,7			СР1	СР4				КР2				
5	87,7			СР3	КР1						СР4		
6	93,2			СР2							СР3		

В то же время, невозможность оптимального планирования ремонтов и реакторных кампаний при $T_{эфф}$ = 288 суток, принятых для четырехлетнего топливного цикла на основе УТВС, показана в табл. 4.

При этом максимально возможное значение КИУМ не превышает 84,2%.

Кроме того, ремонты сдвигаются на зимний период, а избежать этого возможно только при увеличении календарной длительности реакторной кампании на 20…25 суток и снижении мощности реакторов, что, в свою очередь, приводит к уменьшению КИУМ еще на 4…5 %.

Таблица 4. *Оптимальный график ремонта и эксплуатации четырехблочной АЭС при длительности реакторной кампании около 288 эфф. суток.*

Год	КИУМ, %	Зима				Лето								Зима	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
1	84,2					СР1			СР2			КР3		СР4	
2	84,2				СР1			КР2				СР3		СР4	
3	84,2			КР1				СР2\	СР3		СР4				
4	84,2			СР1		СР2			СР3		КР4				
5	84,2		СР1		СР2				КР3		СР4				
6	83,2		СР1		КР2		СР3		СР4						

Ранее оптимизация графика эксплуатации многоблочных АЭС с ВВЭР выполнялась для достижения следующих целей:

- достижения максимума энерговыработки в зимний период;
- разнесения плановых ремонтов на энергоблоках;
- снижения мощности энергоблоков для увеличения календарной длительности реакторных кампаний;
- удлинения реакторных кампаний за счет работы на мощностном эффекте.

На период до начала внедрения ТВС с жестким каркасом (примерно середина 2004 г.) увеличение реакторных кампаний более 365 эффективных суток было невозможно.

Однако до начала более существенного изменения топливного цикла целесообразно увеличение на всех энергоблоках длительностей реакторных кампаний хотя бы до этого предела с целью облегчения последующего увеличения $T_{эфф}$.

Предлагается следующий порядок перевода всех энергоблоков на удлиненные реакторные кампании.

На энергоблоках № 2-4 целесообразно увеличение длительности кампании до 365 эффек-

тивных суток при условии выполнения необходимых обоснований, аналогичных расчетам, проведенным для энергоблока № 1.

В то же время следует обратить внимание на дополнительные проблемы, возникающие при увеличении межремонтного периода.

Подобное увеличение до периода более 12 месяцев невозможно без выполнения анализа надежности основного оборудования реакторной установки при эксплуатации с увеличенной длительностью реакторных компаний. Результатом такого анализа должны стать:

- соответствующая корректировка проектного технического обоснования безопасности;
- мероприятия по замене и модернизации оборудования, не пригодного для эксплуатации в увеличенных межремонтных периодах;
- обоснования по корректировке действующих правил и норм по безопасности, отраслевых руководящих документов, содержащих требования по испытаниям и ревизии защитных и локализующих элементов безопасности с установленной периодичностью 12 месяцев;
- обоснование увеличения периода между капитальными ремонтами до 6 лет.

Проведение регламентных испытаний большинства элементов безопасности энергоблока с установленной периодичностью возможно и при кратковременном останове реактора.

Однако такой порядок существенно снизит экономические показатели энергоблоков.

Кроме того, будет увеличено количество циклов нагружения оборудования из-за необходимости проведения испытаний ряда элементов при пусках после ремонта и остановах на ремонт.

В то же время действующие проектные периодичные испытания оборудования были обоснованы, исходя консервативных предположений, и снижение степени консервативности в подобных обоснованиях – уже свершившийся факт для западных АЭС с PWR.

Таким образом, проведенные расчеты по оценке влияния продления кампании реактора на величину КИУМ показали следующие результаты:

- увеличение $T_{эфф}$ позволяет получить существенное увеличение КИУМ по сравнению с сокращением времени ремонтов;
- оптимальное планирование для исключения наложения капитальных ремонтов на двух энергоблоках и исключение их в зимние периоды возможно только при $T_{эфф}$ = 308 и 480 эфф. суток;
- увеличение периодичности капитальных ремонтов дает несущественное повышение среднего значения КИУМ в сравнении с увеличением $T_{эфф}$ или снижением продолжительности средних и капитальных ремонтов;
- представляется целесообразным перенос отдельных капитальных ремонтов на одну реакторную кампанию с целью исключения проведения в течение одного года двух или более капитальных ремонтов.

Оценка экономической целесообразности внедрения длительных топливных циклов на АЭС с ВВЭР

Для производства любого вида продукции требуются затраты материальных, трудовых, а также финансовых ресурсов предприятия. Совокупность этих затрат принято называть издержками производства.

Важнейшим экономическим показателем является себестоимость продукции, представляющая собой текущие издержки предприятия на ее производство и реализацию, выраженные в денежной форме. Данный показатель показывает эффективность использования всех факторов производства.

Стоимость продукта – это денежный эквивалент всех видов издержек.

Применительно к энергетике упрощенное выражение для себестоимости электроэнергии можно представить следующим образом:
Себестоимость = сумма издержек / отпуск электроэнергии.

Некоторые виды издержек привязаны к определенным фазам топливного цикла. В основном, это плата подрядным организациям за работы, выполненные во время ремонтов и при подготовке к ним, плата за материалы, использованные при ремонте.

Плата за свежее ядерное топливо и за вывоз отработанного ядерного топлива (ОЯТ) также относятся к этому типу издержек. Такие издержки называются циклическими, или издержками цикла.

Другие виды издержек, такие, как амортизационные отчисления, заработная плата персоналу АЭС, не привязаны к определенным фазам топливного цикла. Они носят название календарных.

В целом, структура издержек на энергоблок АЭС выглядит следующим образом (табл. 5) [2]

Таблица 5. *Структура среднестатистических издержек на один энергоблок АЭС*

	На энергоблок	Циклические	Календарные
Свежее топливо	29%	29%	
ОЯТ	2%	2%	
Услуги производного характера	16%	15%	1%
Вспомогательные материалы	15%	11%	4%
Оплата труда	17%		66%
Амортизация	10%		39%
Прочие	11%		45%
Сумма	100%	57%	43%

Для определения себестоимости электроэнергии воспользуемся следующим выражением [3]

$$C = \frac{ST + И_{\text{ОЯТ}} + И_{\text{Ц}} + И_{\text{Г}} - \dfrac{T_{\text{эфф}} + T_{\text{рем}}}{365}}{E}, \quad (2)$$

где ST – стоимость свежего топлива;

$И_{\text{оят}}$ – издержки на вывоз ОЯТ;

$И_{\text{ц}}$ – циклические издержки без учета стоимости свежего топлива и отправки ОЯТ;

$T_{\text{эфф}}$ – эффективная длительность топливного цикла;

$T_{\text{рем}}$ – продолжительность ремонта, сут.;

E – отпуск электроэнергии за кампанию, кВт · час, вычисляемая следующим образом

$$E\left(N_{\text{Т}} \cdot h \cdot T_{эфф} \cdot 24(1-a)\right), \quad (3)$$

где $N_{\text{Т}}$ – тепловая мощность, кВт;

h – КПД;

24 – количество часов в сутках;

a – доля потребления электроэнергии на собственные нужды.

Расчет выполнялся для стоимости ТВС такого же ряда обогащений, как в работе [2].

При этом вычисления производились в относительных единицах, причем за единицу принята стоимость ТВС с обогащением 3,92 %.

Очевидно, что обе оценки стоимости ТВС достаточно близки. Поэтому для дальнейших расчетов в целях обеспечения некоторого консерватизма были использованы данные [2], поскольку они дают большую величину стоимости для больших обогащений. При этом использовалась следующая аппроксимация данных столбца 3 табл. 6

$$Ц = 29{,}03 \cdot x - 0{,}1378, \quad (4)$$

где x – обогащение.

Таблица 6*. относительные стоимости ТВС различного обогащения*

Обогащение, %	Данные РНЦ «Курчатовский институт»	По методике [3]
1	2	3
3,53	0,9289	0,889
3,92	1	1
4,3	1,1042	1,109
4,69	1,2078	1.222
5,08	1,3118	1,336

Если на АЭС были загружены 207 ТВС средним обогащением 3,7% или 51,8 ТВС на один энергоблок.

Расчет по формуле (4) для одной ТВС обогащением 3,7 % дает значение стоимости 0,942 относительные единицы.

Таким образом, стоимость одной топливной подпитки составила

$51{,}8 \cdot 0{,}942 = 48{,}77$ о.е.

Зная, что доля стоимости свежего топлива в годовых издержках составила 29 %, получим, что стоимость одного процента издержек эквивалентна

48,77/29 % = 1,68 о.е.

Таблица 7. *Структура затрат в относительных единицах*

Компонент издержек	Проценты	Относительные единицы
Стоимость свежего топлива	29 %	48,8
Издержки на вывоз ОЯТ	2 %	3,4
Циклические затраты без свежего топлива и без ОЯТ	27 %	45,4
Календарные затраты	42 %	70,6
Сумма на один энергоблок	100 %	168,2

В стационарном топливном цикле в один планово-предупредительный ремонт (ППР) должно отправляться примерно столько ТВС, сколько свежих сборок загружено.

Поэтому величина издержек на вывоз ОЯТ должна быть увеличена пропорционально количеству оправляемых ТВС.

При рассмотрении длительных топливных циклов издержки на отправку ОЯТ рассчитывались по формуле

$$И_{\text{оят}} = И_{ОЯТ} = \frac{(1{,}68 \cdot 2 \cdot n)}{24}, \quad (5)$$

где n – число выгоревших ТВС, отправляемых с блока в ходе одного ППР.

Данные для трех вариантов (415, 444 и 474) организации длинного топливного цикла брались из работы [2].

В качестве базового варианта был принят вариант стационарного топливного цикла эффективной длительностью 310 эффективных суток с ежегодной подпиткой 55 свежими ТВС, из которых 36 ТВС со средним обогащением 3,92%, 18 ТВС – 3,53 % и одна ТВС – 1,6 %.

Таблица 8. *Расчет себестоимости для различных вариантов топливных циклов*

Длит-ть кампании, эфф. сут.	310	415	444	474	700
Количество свежих ТВС	55	55	61	67	70
Среднее обогащение подпитки, %	3,75	4,89	4,87	4,86	4,86
Отн. стоимость одной ТВС, отн. ед.	0,95	1,28	1,28	1,27	1,28
Отпуск электроэнергии, млн. кВт/час	7068	9462	10124	10808	15960
Продолжительность ППР, сут.	58	58	58	58	58
Календарная длит-ть цикла, сут.	368	473	502	532	729
Стоимость подпитки, отн. ед.	52,3	70,5	77,8	85,3	127,1
Вывоз ОЯТ, отн. ед.	7,7	7,7	8,5	9,4	9,8
Циклич. затраты без свежего топлива и ОЯТ, отн. ед.	45,4	45,4	45,4	45,4	45,4
Календарные затраты, отн. ед.	71,1	91.4	97,0	102,8	151,1
Сумма издержек за кампанию, отн. ед.	176,5	215.0	228,8	242,9	355,3
Себестоимость электроэнергии, отн. ед./ млн. кВт/час	0,0250	0,0227	0,0226	0,0225	0,0225
Себестоимость электроэнергии относительно цикла 310 суток	1,00	0,91	0,91	0,90	0,90

Из табл. 8 видно, что при переходе к длительному топливному циклу себестоимость электроэнергии может уменьшится примерно на 10 %.

Этому содействует:

- увеличение энерговыработки (сокращение простоев, повышение надежности работы энергоблоков);
- экономия ядерного топлива;
- на стадии проектирования – увеличение единичной мощности блоков.

Улучшение экономических показателей по сравнению с достигнутым уровнем возможно, если суммарная стоимость топлива подпитки вырастет не более чем в 1,8…2,2 раза в зависимости от типа топливного цикла.

Заключение

Выполненные исследования по оценке экономической целесообразности внедрения длительных топливных кампаний на АЭС ВВЭР-1000 показали следующие результаты:

- увеличение $T_{эфф}$ позволяет получить существенное увеличение КИУМ по сравнению с сокращением времени ремонтов;
- оптимальное планирование для исключения наложения капитальных ремонтов на двух энергоблоках и исключение их в зимние периоды возможно только при $T_{эфф}$ = 308 и 480 эфф. суток;
- увеличение периодичности капитальных ремонтов дает несущественное повышение среднего значения КИУМ в сравнении с увеличением $T_{эфф}$ или снижением продолжительности средних и капитальных ремонтов;
- представляется целесообразным перенос отдельных капитальных ремонтов на одну реакторную кампанию с целью исключения проведения в течение одного года двух или более капитальных ремонтов;
- при переходе к длительному топливному циклу снижение себестоимости электроэнергии может достигать 10 %, а увеличение среднегодовой прибыли на один энергоблок может достигать величины, эквивалентной стоимости 17-19 ТВС обогащением 3,92 %.

Список литературы

1. Ипатов П.Л. Эффективность повышения КИУМ АЭС с ВВЭР-1000 / П.Л. Ипатов, Михальчук А.В. // Вестник Саратовского государственного университета, 2006. – Вып. 5. – № 4 (20). – С. 39 – 46.
2. Топливные циклы реактора ВВЭР-1000. Техническая справка. Под редакцией А.М. Павловича //

РНЦ «Курчатовский институт», 2001 – 85 с.
3. Синев Н.М. Экономика атомной энергетики: Основы технологии и экономики производства ядерного топлива / Н.М. Синев, Б.Б. Батурин – 3-е изд., перераб. и доп. – М. Энергоатомиздат, 1987. – 487 с.

References

1. Ipatov P.L., Mikhal'chuk A.V. Efficiency of increasing of capacity factor of NPP with WWER-1000. Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo universiteta [*Bulletin of Saratov state University*], 2006, Vol. 5, № 4(20), pp 39-46.
2. Pavlovich A.M.. *Toplivnye cykly reaktora VVER-1000*. Technicheskaya spravka. [Fuel cycles of VVER-1000 reactors. Technical reference], NC «Kurchatov Institute», 2001 – 85 p.
3. Sinev M.M., Baturin B.B. *Ekonomika atomnoj energetiki. Osnovy tekhnologii i ekonomiki proizvodstva yadernogo topliva.* [Economics of nuclear energy: Fundamentals of technology and economics of nuclear fuel production], Moscow, Energoatomizdat Publ.,1987, 487 p.

УДК 621.039.56

Управление энергораспределением ядерного реактора на основе сетей Петри

С.А. Качур
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия, kachur_62@mail.ru

Статья поступила 14.01.2019 г.; после доработки 16.01.2019 г.

Аннотация

В статье предложен подход к решению проблемы эффективного управления энергораспределением по объему активной зоны реактора с использованием аппарата сетей Петри. Разработано расширение сети Петри, позволяющее снизить размерность описания энергораспределения и повысить быстродействие выбора положения компенсационных стержней. Предложено решение задачи управления энергораспределением как при незначительных отклонениях мощности каналов от допустимых значений, так и в аварийной ситуации при стремлении мощности к критическому уровню..

Ключевые слова: энергораспределение, управление, ядерный реактор, компенсационные стержни, сети Петри, моделирование.

Control by Power Distribution of Nuclear Reactor on the Basis of the Petry Nets

S.A. Kachur
Sevastopol state university, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, kachur_62@mail.ru

Received 14.01.2019 y.; received in final form 16.01.2019 y.

Abstract

In the article offered approach to the decision of problem of effective control by power distribution on volume of active zone of reactor with the use of vehicle of the Petry nets. Expansion of the Petry net is developed, allowing to reduce the dimension of description of power distribution and promote the fast-acting of choice of position of compensative bars. Solution of task of control by power distribution both at insignificant deviations of power of channels from the legitimate values is offered and in an emergency situation at aspiration of power to the critical level.

Keywords: power distribution, control, nuclear reactor, the Petry nets, simulation.

Введение

Среди функций автоматизированной системы контроля и управления (АСКУ) ядерными реакторами наиболее сложной является оптимизация энергораспределения по объему активной зоны [1-5].

Выравнивание энергораспределения в больших энергетических реакторах является необходимым условием эксплуатации, а оптимизация положения стержней регулирования – трудоемкий процесс, который сводится к необходимости перебора большого числа вариантов. Качество и скорость решения задачи управления энергораспределением в большой мере зависят от опыта оператора.

Применение ЭВМ разгружает оператора, позволяет получить более выровненное энергораспределение. ЭВМ может применяться в режиме советчика оператора или в режиме замкнутого контура регулирования.

В настоящее время в замкнутом контуре регулирования применяются системы логико-

программного управления или адаптивные системы регулирования.

Снижение трудоемкости алгоритмов оптимизации управления энергораспределением актуально в настоящее время. Проблема быстродействия программ управления обусловлена выбором математического аппарата, используемого как основа для моделирования процессов в активной зоне реактора.

Современные системы АСКУ для описания процесса используют системы линейных уравнений и множество ограничений. Поскольку необходимо учесть корреляцию между компенсационными стержнями в различных каналах активной зоны, размерность описание процесса пропорциональна квадрату количества каналов активной зоны. Представляется, что сократить такое описание не возможно, но можно уменьшить количество операций, выполняемых вычислительной машиной для определения положения компенсационных стержней с целью либо поддержания энергораспределения на определенном уровне при нормальном течении процесса, либо в случае аварийной ситуации, характеризующейся критическим превышением энерговыделения в канале.

В настоящее время широко обсуждается вопрос применение нейросетевых технологий для управления сложными объектами [6]. Однако при моделировании предполагается функционирование всей нейронной сети в момент изменении входного воздействия. Размерность нейронной сети, описывающей энергораспределение активной зоны реактора, велика. Ее сложность соизмерима с задачей решения системы линейных уравнений. Применение существующих нейронных сетей не даст зримого увеличения быстродействия по сравнению используемыми на практике алгоритмами управления энергораспределением.

В статье предлагается для реализации алгоритма управление использовать математический аппарат сетей Петри [7]. Сети Петри позволяют описывать недетерминированную динамику процесса, значительно (на несколько порядков) сокращая время моделирования, при размерности сети, соответствующей размеру нейронной сети, за счет возможности, определенной математическим аппаратом, в конкретный момент времени рассматривать лишь небольшой фрагмент сети Петри (СП) [8].

Цель и задачи исследования

Целью исследование является разработка подхода к управлению энергораспределением в активной зоне реактора в проектных и запроектных режимах работы на основе математического аппарата сетей Петри.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

1) создание расширения сетей Петри, позволяющего моделировать процесс управления с наименьшими временными затратами; 2) создание описания сетью Петри процесса управления в проектном режиме; 3) создание описания сетью Петри процесса управления в аварийном режиме при стремлении мощности канала к критической.

Определение расширения сетей Петри для решения задачи управления энергораспределением в активной зоне реактора

Приведем определения сети Петри [7].

Сеть Петри C является четверкой $C = (P, T, I, O)$. $P=\{p_1, p_2, ..., p_n\}$ – конечное множество позиций, $n\geq 0$. $T=\{t_1, t_2, ..., t_m\}$ – конечное множество переходов, $m\geq 0$. Множество позиций и множество переходов не пересекаются, $P\cap T=\varnothing$. $I: T\rightarrow P^{\infty}$ – является входной функцией-отображением из переходов в комплекты позиций. $O: T\rightarrow P^{\infty}$ – есть выходная функция-отображение из переходов в комплекты позиций. Позиция p_i является входной позицией перехода t_j том случае, если $p_i \in I(t_j)$; p_i является выходной позицией перехода t_j , если $p_i \in O(t_j)$.

Граф G сети Петри есть двудольный ориентированный мультиграф. $G=(V, A)$, где $V=\{v_1, v_2, ..., v_s\}$ – множество вершин, а $A=\{a_1, a_2, ..., a_r\}$ – комплект направленных дуг, $a_i=(v_j, v_k)$, где $v_j, v_k \in V$. Множество V может быть разбито на два непротиворечивых подмножества P и T, таких что $V = P\cup T$, $P\cap T = \varnothing$ и для любой направленной дуги $a_i \in A$, если $a_i=(v_j, v_k)$, тогда либо $v_i \in P$ и $v_k \in T$ либо $v_j \in T$, а $v_k \in P$.

Маркировка μ сети Петри $C = (P, T, I, O)$ есть функция, отображающая множество позиций P в множество неотрицательных чисел N.

$\mu: P\rightarrow N$.

Маркировка μ макет быть также определена как n-мерный вектор $\mu=(\mu_1, \mu_2, \ldots, \mu_n)$, где $n = |P|$ и каждое $\mu_I \in N$, $i=1, 2, \ldots, n$. Вектор μ определяет для каждой позиции p_i сети Петри количество фишек в этой позиции.

Маркированная сеть Петри $M=(C, \mu)$ есть совокупность сети Петри $C = (P, T, I, O$ и маркировки μ и может быть записана в виде

$M = (P, T, I, O, \mu)$.

Выполнением сети Петри управляют количество и распределение фишек в сети.

Переход $t_j \in T$ в маркированной сети Петри $C = (P, T, I, O)$ с маркировкой μ разрешен, если для $p_i \in P$ $\mu(p_i) \geq \#(p_i, I(t_j))$.

На основе сетей Петри разработано достаточно большое число моделей различной целевой направленности. Как правило, эти модели содержат некоторые дополнительные атрибуты (по сравнению с обычными сетями Петри) и поэтому называются расширениями данного аппарата.

Существует множество различных вариантов описания сложных систем, каждый из которых отражает стремление решить проблему сложности и точности. Приведем основные из них.

Ингибиторные сети. Это сети $N = (P, T, I, O, \mu_0, \alpha_I)$, где $\alpha_I : P \times T \rightarrow \{0, 1\}$, $\alpha_I \cap I = \varnothing$ функция входных инцинденций, задающая ингибиторные (запрещаю) ребра. В ингибиторных сетях на правила возбуждения перехода t накладывается дополнительное требование – отсутствие маркера во всех запрещающих позициях перехода.

Приоритетные сети. Это сети, учитывающие приоритетные соотношения между переходами. В приоритетных сетях при наличии двух и более переходов срабатывать может лишь переход, имеющий высший приоритет.

Сети с цветными маркерами (цветные). В этих сетях каждому переходу ставится в соответствие функция, определяющая маркирование выходных позиций в зависимости от цветов входных маркеров. В отличие от обычных сетей Петри, это позволяет различать маркеры, их перемещение по сети и существенно упрощать графическую модель системы.

Структурированные сети. Эти сети являются обобщением регулярных сетей и служат для моделирования иерархических систем, которые на ряду с неделимыми компонентами содержат составные компоненты, сами представляю собой системы.

Известны расширения сетей Петри, в которых кратность ребер не является постоянной. К ним относятся самомодифицируемые и предикатные сети. В самомодифицируемые сетях кратность ребра может задаваться как натуральным числом N, так и числом маркеров в некоторой позиции этой же сети. В последнем случае кратность ребра изменяется в процессе функционирования сети и равна текущему числу маркеров в указанной позиции.

Дальнейшим обобщением цветных и самомодифицируемые сетей, позволяющим отобразить определенные отношения между различными маркерами, являются предикатные сети. В них кратность дуг можно задавать в виде некоторого выражения, кроме того, каждому переходу может соответствовать предикат $Pr(t)$. Причем, условия возбуждения перехода дополняются требованием истинности соответствующего предиката, т.е. переход t в предикатной сети может срабатывать, если в его входных позициях присутствует требуемое число маркеров соответствующих цветов и если $Pr(t)=true$.

Перечисленные выше модели предназначены для описания логики функционирования (синтаксиса) децентрализованных параллельных систем. Возможно и более полное описание систем, отображающих как потоки управления, так и потоки данных (функций). Такими моделями являются функциональные и сходные с ними числовые и оценивающие сети. В них поток управления описывается предикатной сетью, а действие над объектом (над данными) – функциями, приписанными каждому переходу. При срабатывании перехода неделимым образом выполняется действие, связанное с этим переходом, и выполняется соответствующее перемещение маркеров.

Оценивающие сети (Е-сети) были разработаны для облегчения понимания работы вычислительных систем и их моделирования. Для сохранения удобства и наглядности при увеличении сложности модели системы используют макро-Е-сети. Макросети позволяют сформировать в виде «макро» часто используемые структуры, поддерживая визуальную ясность для понимания работы системы и не теряя возможности машинной интерпретации.

Существуют расширения сетей Петри, с помощью которых некоторые характеристики функционирования систем можно определить аналитически. К ним относятся временные и стохастические сети.

Различные варианты стохастических сетей Петри связаны с введением в сеть Петри вероятностных атрибутов (вероятностей или плотностей вероятностей срабатывания возбужденных переходов).

Для реализации управления энерговыделением предлагается использовать синтез стохастической и функциональной сетей Петри. Вероятности, приписанные дугам, могут принимать значения либо 0, либо 1. Позиция сети содержит один маркер. Стирание маркера в позиции осуществляется после рассмотрения всех

переходов, для которых данная позиция является входной.

Правило срабатывания перехода предложенной СП следующее. Переход активен, если хотя бы в одной его входной позиции имеется маркер и дуге, соединяющей эту позиции с переходом, сопоставлена вероятность, равная единице, а также истинен предикат, приписанный данному переходу.

Рассмотрим применение предложенного расширения СП для решения поставленных задач.

Управление компенсационными стержнями при поддержании энергораспределения на заданном уровне

Представляется, что колебания энерговыделения в активной зоне при внесении дополнительной реактивности с учетом ее знака (положительная реактивность – «+», отрицательная реактивность – «-») определяется скоростью перемещения стержня V_{CT} и частотой акустического шума теплоносителя, зависящей от скорости протекания процесса теплообмена в канале.

Длина волны энергораспределения при введении реактивности i-й канал соответствует длине звуковой волны в рассматриваемом канале

$$\lambda_i = \frac{V_A}{f_i}, \qquad (1)$$

где V_A – скорость звука в теплоносителе; f_i – частота акустических шумов теплоносителя в i-м канале (Гц).

Частота волны энергораспределения при введении реактивности i-й канал определяется формулой

$$\omega_i = 2\pi \frac{V_{CT}}{\lambda_i}, \qquad (2)$$

где V_{CT} – скорость стержня (считаем ее постоянной); λ_i –длина волны энергораспределения.

При введении стержня в канал образуется энергетическая воронка в поле энерговыделения, аналогично при извлечении наблюдается всплеск энергии. Диаметр основания воронки/всплеска в соответствии с функцией Бесселя соответствует $3\pi/2$, т.е. $3\lambda/4$. Для простоты имитации процесса в области радиусом $\lambda/8$ изменение энерговыделения будем считать постоянным.

Учитывая принятые допущения и (1-2), предлагается описывать волновой процесс изменения энергораспределения при введении (выведении) компенсационного стержня в i-й канал следующей функцией

$$A(r, f_i) = \begin{cases} 1{,}5\exp\left(-r + \dfrac{V_A}{8 f_i}\right)\cos\left(2\pi \dfrac{f_i}{V_A} r - \dfrac{\pi}{4}\right), & \text{если } r > \lambda/8 \\ 1, & \text{если } r \le \lambda/8 \end{cases}, \qquad (3)$$

где r – расстояние от центра i-о канала; V_A – скорость звука в теплоносителе; f_i – частота акустических шумов теплоносителя в i-м канале (Гц).

Исходя из (3), изменение мощности в радиусе r от центра i-о канала определяется формулой

$$\Delta Q_i(r, f_i) = \Delta Q_{ki} A(r, f_i), \qquad (4)$$

где ΔQ_{ki} – изменение мощности, вносимой k-м стержнем в i-й канал.

Изменение мощности в i-м канале в линейном приближении можно записать в виде [2]

$$\Delta Q_{ki} = a_{ki} \cdot \delta\rho_{ki},$$

где a_{ki} – коэффициент связи мощности, вносимой реактивностью $\delta\rho_{ki}$ в i-м канале.

Требуемое изменение мощности в i-м канале для поддержания энергораспределения определяется соотношением

$$\Delta Q_i^* = Q_i - Q_{iDOP}, \qquad (5)$$

где Q_i – текущая мощность i-о канала; Q_{iDOP} – допустимая мощность i-о канала.

Если для устранения неравномерности энергораспределения достаточно реактивности органов регулирования, т.е. величина $\delta\rho_{ki}$ для всех стержней находится в допустимом диапазоне при требуемой величине ΔQ^*_i, то нет необходимости производить поиск эквивалентной схемы, включающей несколько стержней, для обеспечения реактивности $\delta\rho_{ki}$. Характеристики исполнительных механизмов обеспечивают поддержание энергораспределения. В этом случае управление энергораспределением описывается СП, приведенной на рис. 1. Данная СП реализует синхронное моделирование.

Рассмотрим особенности функционирования данной СП.

Первоначально в сети Петри все вероятности, кроме p_{ii}:=1, обнуляются и маркеры стираются. В исходную позицию S_0 помещается маркер, если хотя бы мощность одного канала пре-

вышает допустимую. Позиции S_0 сопоставляется вектор отклонений ΔQ_{0i} мощности в соответствии с (5).

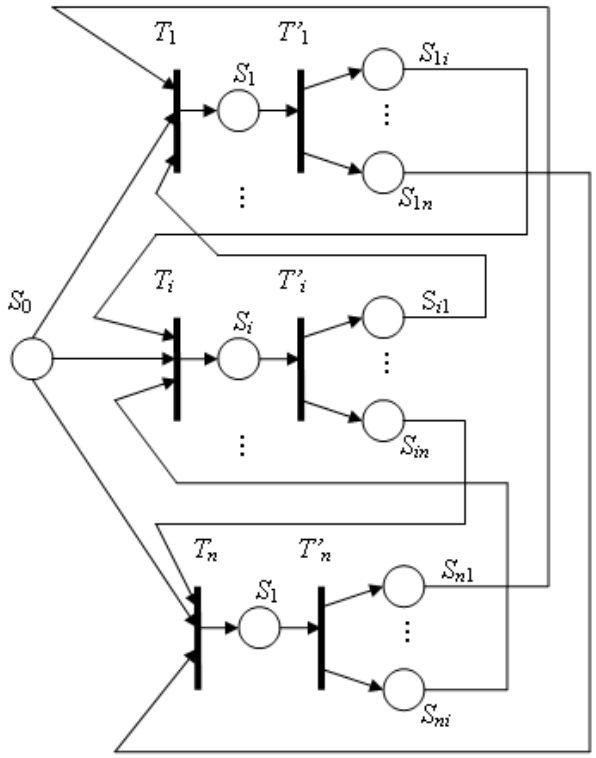

Рис. 1. Сеть Петри, моделирующая управляющие воздействия для поддержания энергораспределения на заданном уровне.

Переходу T_i ($i = \overline{1,n}$) соответствует i-й канал. Дугам, связывающим S_0 и T_i ($i = \overline{1,n}$) сопоставляется вероятность

$$p_{0i} = \begin{cases} 1, \text{ если } Q_i > Q_{iDOP} \\ 0, \text{ в противном случае} \end{cases}.$$

Переход T_i ($i = \overline{1,n}$) является безусловным. Входной позиции S_{ji} ($i = \overline{1,n}$; $j = \overline{1,n}$, $i \neq j$) перехода T_i соответствует значение мощности ΔQ_{ji}, переносимой волновым процессом от j-о канала к i-у каналу.

Переход T_i срабатывает, если на его входе есть дуги с ненулевыми вероятностями, соединяющие переход с маркированными позициями. При его срабатывании вычисляется значение

$$\Delta_i = \sum \Delta Q_{ji} \qquad (6)$$

В выражении (6) рассматриваются значения ΔQ_{ji} ($i = \overline{0,n}$; $j = \overline{1,n}$), сопоставленные только позициям с маркерами. Позиции S_i сопоставляется Δ_i, маркер помещается в данную позицию, p_{ij}:=0 ($i = \overline{0,n}$).

Переход T'_i срабатывает, если в позиции S_i есть маркер, и истинен предикат

$$\Pr : \left\{ \left| Q_i + \Delta_i \right| > Q_{iDOP} \right\}.$$

Активизация перехода запускает работу следующего алгоритма расчета изменения мощности.

1. Определяем значения

$$\Delta Q_i(r_{ij}, f_i) = \Delta_i \cdot A(r_{ij}, f_i) \ \ (i = \overline{1,n};\ j = \overline{1,n},\ i \neq j).$$

2. Для всех $i = \overline{1,n}$; $j = \overline{1,n}$, $i \neq j$ если $\Delta Q_i(r_{ij}, f_i) > \varepsilon$, то $\Delta Q_{ij} := \Delta Q_i(r_{ij}, f_i)$, p_{ij}:=1 и помещается маркер в позицию S_{ij}, иначе позиция S_{ij} не помечается.

Когда алгоритмы всех переходов T_i ($i = \overline{1,n}$) завершили работу, первый такт выполнен, и начинается второй такт моделирования. Моделирование продолжается до тех пор, пока может быть активизирован хотя бы один из переходов.

В результате работы сети позиция S_i ($i = \overline{1,n}$) содержит значение Δ_i, определяющее изменение мощности, которое необходимо внести компенсационным стержнем в i-й канал.

Управление компенсационными стержнями при критическом превышении энерговыделения в канале

Рассмотрим случай, когда невозможно понизить мощность в канале до допустимой величины, используя один компенсационный стержень.

При таком варианте развития событий необходимо найти схему перемещения нескольких компенсационных стержней, позволяющую учитывая волновые процессы в активной зоне, используя колебания энергии в противофазе. При реализации такого подхода предлагается для описания каждого канала ввести дополнительно переход T''_i, для которого позиция S_i является выходной (рис. 1). Фрагмент сети Петри, определяющий необходимые изменения для рис. 1, приведен на рис. 2.

Функции переходов T_i изменятся следующим образом.

При срабатывании перехода T_i вычисляются два значения

1) $\Delta'_i = Q_{KP} - \sum \Delta Q_{ji} + \Delta Q_{ki}^{\max A}$ ($\Delta Q_{ki}^{\max A}$ – максимальная мощность, которой располагает *k*-й стержень в текущий момент времени при его вводе);

2) $\Delta_i = \Delta Q_{ki}^{\max}$.

Позиции S_i сопоставляются уже два значения Δ_i и Δ'_i.

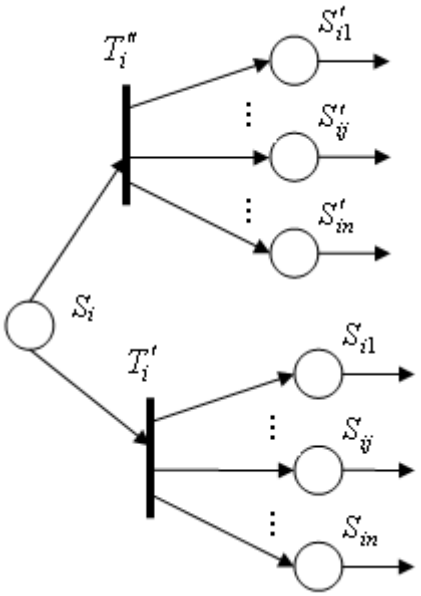

Рис. 2. Фрагмент сети Петри, позволяющий моделировать управляющие воздействия при критическом превышении энерговыделения в канале.

Переход T''_i является условным. Его срабатывание происходит, если $\Delta'_i > 0$. При активизации перехода T''_i алгоритм расчета изменения мощности включает следующие действия.

1. Формируем множество **L** номеров (*j*) каналов, находящихся от *i*-го канала на расстоянии кратном половине длины волны, вызванной возможным извлечением стержня из *j*-о канала:

$$r_{ji} = \frac{5\lambda_j}{8} \quad \text{или} \quad r_{ji} = \frac{9\lambda_j}{8}.$$

2. Определяем для элементов множества **L** $\Delta''_j = \min\{ Q_{KP} - Q_j ; \Delta Q_{ki}^{\max B} \}$ ($\Delta Q_{ki}^{\max B}$ – максимальная мощность, которой располагает *k*-й стержень в текущий момент времени при егоизвлечении).

3. Удаляем из множества **L** номера каналов, для которых $\Delta''_j < \varepsilon$.

4. Определяем значения

$$\Delta Q_j(r_{ji}, f_j) = \Delta''_j \cdot A(r_{ji}, f_j)$$

($i = \overline{1,n}$; $j = \overline{1,n}$, $i \neq j$).

5. Упорядочиваем номера каналов в множестве **L** по убыванию $\Delta Q_j(r_{ji}, f_j)$.

6. Определяем *m* первых элементов множества **L**, дающих следующее соотношение $\Delta'_i \approx \sum_{z=1}^{m} \Delta Q_z$, и получаем множество номеров (l_1, l_2, …,l_m).

7. Помечаем позиции S'_{il_1}, S'_{il_2}, …, S'_{il_m} маркерами и сопоставляем им значения ΔQ_{l_1}, ΔQ_{l_2}, …, ΔQ_{l_m} . Для этих позиций исходящим дугам присваиваем единичные значения вероятностей.

Дальнейшее функционирование СП соответствует приведенному выше описанию для рис. 1.

Заключение

Предложен подход к решению проблемы эффективного управления энергораспределением по объему активной зоны реактора с использованием аппарата сетей Петри. Разработано расширение сети Петри, позволяющее снизить размерность задачи и повысить на порядок быстродействие процесса моделирования расположения компенсационных стержней. Предложено решение задачи управления энергораспределением как при незначительных отклонениях мощности каналов от допустимых значений, так и в аварийной ситуации при стремлении мощности к критическому уровню.

Показано преимущество сетей Петри по сравнению с нейронными сетями и алгоритмами, основанными на переборе и системах линейных уравнений и неравенств.

Управление энергораспределением на основе сетей Петри является перспективным направлением в развитии автоматизированных систем контроля и управления ядерным реактором.

Список литературы

1. Бахмач Е.С. Программно-технические комплексы автоматического регулирования, разгрузки и ограничения мощности реактора и ускоренной предупредительной зашиты: обеспечение и оценка безопасности / Е.С. Бахмач, С.В. Виноградская, К.В. Розен и др. // Ядерная и радиационная безопасность. – 2005. – №1. – С. 67-90.

2. Емельянов И.Я. Научно-технические основы управления ядерными реакторами/ И.Я. Емельянов, А.И. Ефанов, Л.В. Константинов; Под общ. ред. акад. Н.А. Доллежаля – М.: Энергоиздат, 1981. – 360с.
3. Емельянов И.Я. Управление и безопасность ядерных энергетических реакторов / И.Я. Емельянов, П.А. Гаврилов, Б.Н. Селиверстов – М.: Атомиздат, 1975. – 280с.
4. Еременко В.А. Пути обеспечения безопасного управления атомными энергетическими установками – К.: Техника, 1988. –256с.
5. Мирошник И.В. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами / И.В. Мирошник, В.О. Никифоров, А.Л Фрадков – СПб.: Наука, 2000. –382 с.
6. Шаповалова С.И., Шараевский Г.И. Среда моделирования нейронных сетей для решения задач диагностики оборудования АЭС // Проблемы программирования – 2008. – № 2–3. – С. 675–678.
7. Питерсон Д. Теория сетей Петри и моделирование систем /Д. Питерсон – М.: Мир, 1984. – 264с.
8. Качур С.А. Модель стохастических систем и их соединений на основе сетей Петри/ С.А. Качур // Проблемы управления и информатики. – 2002. – №1. – С.93-98.

References

1. Bahmach E.S., Vinogradskaya S.V., Rozen K.V. Programmatic-technical complexes of automatic control, unloading and limitations of power of reactor and speed-up preventive sewn up: providing and estimation of safety. *Yadernya i radiacionnaya bezopasnost'*.2005, No1, pp.67-90.
2. Emel'yanov I.Ya., Efanov A.I., Konstantinov L.V. *Naucho-tehnicheskie osnovy upravleniya yadernymi reaktorami* [Scientific and technical government bases by nuclear reactors]. Moskow, Energoizdat, 1981. 360p.
3. Emel'yanov I.Ya., Gavrilov P.A., Seliverstov B.N. *Upravlenie i bezopasnost' yadernyh energeticheskih reaktorov* [Control and safety of nuclear power reactors]. Moskow, Atomizdat, 1975. 280p.
4. Eremenko V.A. *Puti obespecheniya bezopasnogo upravleniya atomnymi energeticheskimi ustanovkami* [Ways of providing of safe management by the atomic power plants]. Kiev, Techika, 1988. 256p.
5. Miroshnik I.V., Nikiforov V.O., Fradkov A.L. *Nelinejnoe i adaptivnoe upravlenie slozhnymi dinamicheskimi sistemami* [Adaptive control by the difficult dynamic systems]. SPb, Nauka, 2000. 382 p.
6. Shapovalova S.I., Sharoevskij G.I. Environment of design of neuron nets for the decision of tasks of diagnostics of equipment of APP. *Problemy hrogrammirovaniya***,** 2008, № 2-3, pp. 675-678.
7. Piterson D. *Teoriya setej Petri i modelirovanie sistem* [Theory of the Petry nets and systems simulation] Moscow , Mir, 1984, 264 p.
8. Kachur S.A. Model of the stochastic systems and their combination on the basis of the Petry nets. *Problemy upravleniya i informatiki*, 2002, No.1, pp. 93-98

УДК 534.2:532.5

Гидродинамическая акустика. Сообщение 2. Турбулентное движение жидкости

В.А.Пухлий[1], С.Т.Мирошниченко[1], В.В.Соколов[1], К.В.Пухлий[2]

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Курчатова, 7
г.Севастополь, 299015, Россия, e-mail: pu1611@rambler.ru
Предприятие «Аэротекс», 127349, Москва, ул.Мурановская, 17-147

Статья поступила 14.01.2019 г.; после доработки 16.01.2019 г.

Аннотация

Структурный подход распространяется на турбулентное движение жидкости. Получено распределение структурных составляющих следа за плохо обтекаемым телом, представляющих из себя вихревые образования различного вида по всей его длине.

Ключевые слова: структурные модели, вихревые образования, вихрь-решётки, отрывные течения, турбулентность, кинетика ближнего следа.

Hydrodynamic acoustics. The message 2. Turbulent movement of a liquid

V.A.Pukhliy[1], S.T.Miroshnichenko[1], V.V.Sokolov[1], K.V.Pukhliy[2]

Sevastopol state university, Kurchatova, 7 Sevastopol, 299015, Russia, e-mail: pu1611@rambler.ru
Enterprise "Aerotex", 127349, Moscow, street Muranovsky, 17-147

Received 14.01.2019 y.; received in final form 16.01.2019 y.

Abstract

The structural approach extends on turbulent movement of a liquid. Distribution of structural components of a trace behind badly streamline body, being vortical educations of a various kind on all its length is received.

Keywords: structural models, vortical educations, whirlwinds-lattices, spasmodic currents, turbulence, kinetic a near trace

Введение

В предыдущей работе [1] рассмотрены структурные модели обтекания тел и модель струйного истечения, составляющими элементами которых являются вихревые образования. Структурные образования типа вихря-решетки и активной вихревой дорожки в различных сочетаниях позволяют строить расчетные схемы отрывных обтеканий различных тел с вычислением аэродинамической силы сопротивления и кинетики ближнего следа. В настоящем разделе анализ распространяется на турбулентное движение жидкости. Настоящая статья является продолжением работы [1], поэтому в ней сохраняется сквозная нумерация формул и рисунков.

Постановка цели и задач научного исследования

Целью данной работы является изучение проблем современного состояния аэрогидроди-

намической акустики и распространения структурного подхода, к уравнениям движения в аэрогидромеханике и аэродинамической акустике на турбулентное движение жидкости.

Влияние поляризованных вихрей-решеток

Влияние колеблющихся «поляризованных» вихрей-решеток аналогично действию турбулентной (вихревой) вязкости. В самом деле, они осуществляют поперечный перенос массы и импульса во внешний поток или обратно во внутреннюю область.

Средний прирост удельной энергии струйки потока ΔE за период колебания, при переходе из внутренней области ближнего следа во внешний поток на основании анализа движения стационарного двойника колеблющегося вихревого ряда составляет:

$$\Delta\tilde{E} = \tilde{P}_{b-b} - \tilde{P}_{c-c} + \frac{\rho}{2}\tilde{u}^2_{b-b} - \alpha = 2\cdot\frac{1}{2}\tilde{u}^2_{(b-b)_0} - \alpha_1, \quad (13)$$

где $\tilde{P}_{b-b} = \frac{1}{T}\frac{1}{L}\iint_{TL} P_{b-b}\,dldt$;

$$\tilde{P}_{c-c} = \frac{1}{T}\frac{1}{L}\iint_{TL} P_{c-c}\,dldt \quad (14)$$

– соответственно средние за цикл значения давлений на внешней границе ряда и на линии, где скорости протекания на-правлены в строго нормальном направлении к средней линии вихревого ряда.

$$\tilde{u}^2_{b-b} = \frac{1}{T}\frac{1}{L}\iint_{TL} u^2_{b-b}\,dldt \ ;$$

$$\tilde{u}^2_{(b-b)_0} = \frac{1}{T}\frac{1}{L}\iint_{TL} u^2_{(b-b)_0}\,dldt \quad (15)$$

– соответственно среднеквадратичные значения за цикл касательных составляющих скорости в исследуемом сечении и в начале отрыва на внешней границе вихревого ряда; ρ – плотность жидкости; T – период колебания исследуемой локальной области вихревого ряда; L – сечение струйки ряда;

α – приближение, учитывающее конечную толщину вихревого ряда, расстояние между вихрями и т.д.

$$\alpha << \rho\tilde{u}^2_{(b-b)_0}.$$

Так как удельную энергию струйки можно трактовать и как поток импульса на единицу сечения струйки, то формула (13) выражает перенос импульса $\Delta\tilde{J}$ в поперечном направлении:

$$\Delta\tilde{J} = -\left(\rho\tilde{u}^2_{(b-b)_0} - \alpha_1\right);$$

$$\alpha_1 << \rho\tilde{u}^2_{(b-b)_0}. \quad (16)$$

Пульсационные скорости $\bar{v}'_{b-b}, \bar{u}'_{b-b}$ (рис.3.4) корреляционно взаимосвязаны между собой и количественно отражают величину прироста импульса при переходе струйки через вихревой ряд во внешнюю область течения (поперечный перенос импульса):

$$\Delta\tilde{J} = -\left(\rho\widetilde{\bar{u}'_{b-b}\bar{v}'_{b-b}} - \alpha_2\right), \quad (17)$$

где $\Delta\tilde{J}$ – среднее за цикл колебания T или за время Δ>>T значение прироста по тока импульса при переходе через внешнюю границу вихревого ряда.

$$\widetilde{\bar{u}'_{b-b}\bar{v}'_{b-b}} = \frac{1}{T}\frac{1}{L}\iint_{TL} u'_{b-b}v'_{b-b}\,dldt \quad (18)$$

– среднее за цикл колебания T значение осредненного по сечению струйки произведения касательной и нормальной к внешней границе вихревого ряда составляющих скоростей (рейнольдсово напряжение); ρ – плотность жидкости;

$$\alpha_2 << \rho\widetilde{\bar{u}'_{b-b}\bar{v}'_{b-b}}.$$

Касательное напряжение турбулентного трения τ будет равно:

$$\tau = -\Delta\tilde{J} = \rho\widetilde{\bar{u}'_{b-b}\bar{v}'_{b-b}} - \alpha_2. \quad (19)$$

На основании (13) и (16) можно записать следующее:

$$\tau = \rho\widetilde{\bar{u}'_{b-b}\bar{v}'_{b-b}} = \tilde{P}_{b-b} - \tilde{P}_{c-c} + \frac{\rho}{2}\tilde{u}^2_{b-b} - \gamma = \rho\tilde{u}^2_{(b-b)_0} - \beta, \quad (20)$$

где

$$\beta = \alpha_1 - \alpha_2 << \rho\tilde{u}^2_{(b-b)_0},$$

$$\gamma = \alpha - \alpha_1 << \rho\tilde{u}^2_{(b-b)_0}.$$

Формула (20) осуществляет теоретическую связь между пульсационным (турбулентным) движением и осредненным движением. Связь пульсационных составляющих скоростей с изменениями, происходящими в структуре вихря-решетки более сложная, чем описанная выше, и зависит от изменения давления не только в поперечном, но и в продольном направлении.

Последнее приводит к вращению квазивихревого диполя.

В случае представления вихревых рядов поверхностями Жуковского-Миловича коэффициенты $\alpha, \alpha_1, \alpha_2, \beta, \gamma$ обращаются в нуль и выражения (13), (16), (19) и (20) становятся точными.

Сравним соотношения с формулами Прандтля, основанными на гипотезе о пути смешения [2]. Согласно теории Прандтля касательное напряжение турбулентного трения τ имеет вид:

$$\tau = \rho l^2 \left(\frac{d\bar{u}}{dn} \right)^2 = \rho \left(l \frac{d\bar{u}}{dn} \right)^2, \qquad (21)$$

где l – путь смешения, или иначе говоря, масштаб участвующих в переносе жидкости масс; $\bar{u}$ – осредненная скорость.

В непосредственной близости к месту отрыва толщину участвующих в переносе жидких масс l можно считать равной толщине вихревого слоя n.

Тогда с точностью до несущественной величины π формулы (20) и (21) можно считать идентичными.

Формула (20), связывающая пульсационные скорости со скоростями осредненного движения, основана на простейшем представлении вихревого слоя как однорядной цепочки вихрей-решеток.

На самом деле такой слой быстро расширяется при удалении от места отрыва, чему можно найти экспериментальное подтверждение [3, 4].

Таким образом, вихревые слои представляют из себя как бы «многослойную упаковку» вихрей-решеток, и поэтому пульсационные скорости будут иметь значительно меньшую величину [5, 6].

Конструкция вихря-решетки, принадлежащего вышеназванной упаковке такова, что возмущающее действие его на внешнюю к нему область будет записываться (для плоского движения) следующим образом:

$$\vec{w}(r,\alpha) = \frac{(\vec{n} \times \vec{r})}{r} \times \times \left[c_1(r,\alpha) e^{-K_1 r^2} + c_2(r,\alpha) \frac{1}{r} + c_3(r,\alpha) e^{-K_2 r^2} \right]. \qquad (22)$$

Здесь 1-й и 2-й члены связаны с невозмущенным вихрем, а 3-й означает влияние возмущения; $\vec{w}$ – индуцированная вихрем скорость в пределах и вне его; r, α – координаты, связанные с центром вихря, K_1 и K_2 – константы, $\vec{n}$ – вектор циркуляции, $\vec{r}$ – радиус-вектор от исследуемой точки до центра вихря-решетки; $c_1(r,\alpha), c_2(r,\alpha), c_3(r,\alpha)$ – функции распределения.

Влияние этих вихрей на многослойную упаковку таково, что в непосредственной близости от него колебания скорости, обусловленные внутренними вихревыми возмущениями, достигают значительной величины.

Однако экспоненциально уменьшаясь с ростом расстояния от вихря, они становятся несущественными на некотором удалении от возмущенного вихря, где главную роль начинает играть 2-й член, работающий в классическом плане.

Достоинством же однорядовой упаковки является ее относительная простота при полной представимости с ее помощью связи пульсационного и среднего движений, а также возможность с ее помощью достаточно легко строить вычисляемые схемы стационарных двойников ближнего следа.

Движение дорожки в целом удовлетворяет условиям неразрывности.

Из этих условий вытекают поперечные колебания ближнего следа. Действительно, допустим, что под действием повышенного давления внешнего потока верхний ряд дорожки движется вниз.

Тогда в результате действия квазивихревых структур количество вытекающей жидкости значительно увеличивается на этом этапе, что можно представить следующей схемой (рис.5), где $\bar{w}_1$ и $\bar{w}_2$ – средние по сечению струйки скорости вытекания через вихревые ряды.

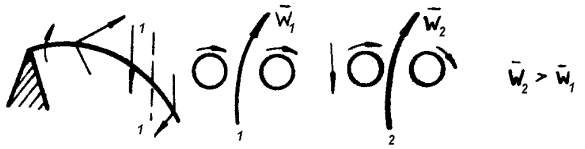

Рис.5. Поперечные колебания ближнего следа (верхний ряд вихревой дорожки движется вниз).

При этом сечение 1-1, разделяющее области вытекания и втекания жидкости через вихревой ряд, смещается в конец дорожки.

Количество жидкости, которую нужно восполнить во внутренней области пониженного давления, достигается за счет движения вниз нижнего вихревого ряда и протекания через него внутрь области Ω жидкости, которое обеспечивается квазивихревыми структурами по следующей схеме (рис.6).

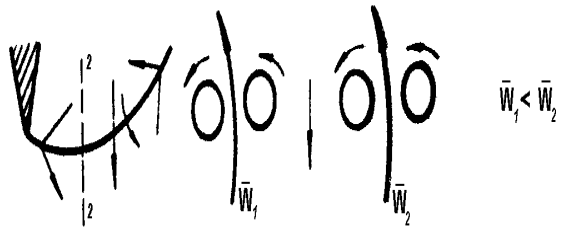

Рис.6. Поперечные колебания ближнего следа (нижний ряд вихревой дорожки движется вниз).

Сечение 2-2, разделяющее области вытекания и всасывания вихревого ряда, смещается при этом к началу дорожки.

Таким образом, мы получаем колеблющуюся вниз-вверх дорожку ближнего следа (рис.3), [1] положения $B_u H_v A$ и $B_\omega J_z A$. Эти колебания дорожки, как мы отмечали выше, обусловлены периодическим образованием квазивихревых структур внутри вихрей-решеток вследствие деформационного влияния внешнего давления и обычной вязкости, какой бы малой величины она не была.

В результате колебания длина вихревых рядов периодически изменяется.

Например, при движении вниз верхний ряд, работающий, в основном, на выброс жидкости из внутренней области, имеет меньшую длину, чем нижний. Компенсация завихренности происходит за счет образования в конце верхнего ряда достаточно крупного вихря и отделения его от замкнутой системы в предельно нижнем отклонении.

Затем наступает очередь за нижним рядом и т.д. Таким образом, происходит периодическое отделение вихрей с концов замкнутой дорожки ближнего следа.

Движение вихрей в момент отрыва и на некотором расстоянии от конца ближнего следа обуславливается взаимодействием их со следом, т.е. происходит во внешнюю от места отрыва сторону и назад по течению.

Это можно представить следующей схемой (рис.7). На рис.7 обозначено: $F = k\rho\Gamma\bar{v}$, где k – коэффициент пропорциональности (k < 1); Γ – интенсивность вихря; $\bar{v} = \frac{1}{d}\int_0^d v dn$ – средняя скорость; d – диаметр вихря; n – нормаль к элементарной струйке на месте поперечного сечения вихря; p_1, p_2 – давления на внешней границе вихря.

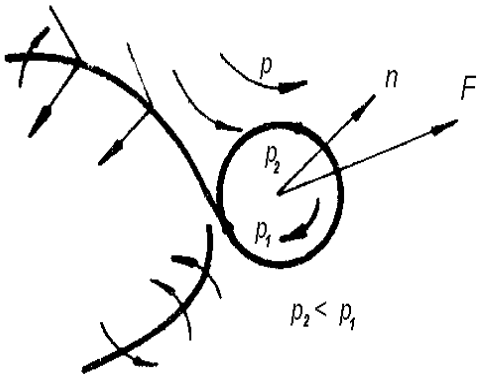

Рис.7. Периодическое отделение вихрей с концов замкнутой дорожки ближнего следа.

Таким образом, замкнутую дорожку ближнего следа можно рассматривать как «упругую» систему, материалом которой являются вихри-решетки, совершающие поперечные колебания под воздействием более высокого давления внешнего потока.

Если рассматривать однородный стационарный поток, набегающий на тело, то получим типичный пример возбуждения колебательных движений с помощью постоянной внешней силы, т.е. так называемых автоколебательных движений.

Каждый элемент такой системы, вихрь-решетка в свою очередь, совершают поперечные колебания вверх-вниз. Частота таких колебаний определяется размером вихря-решетки, его положением в пространстве и др.

Кроме того, вихри-решетки могут образовывать подсистемы – крупные вихревые моли различной протяженности, также обладающие собственной частотой.

И, наконец, каждый простейший элемент вихревого ряда – вихорек, являющийся элементом вихря-решетки, совершает поперечные колебания при общем движении вниз по потоку.

Характер колебания каждого из вихорьков обусловлен, вообще говоря, множеством факторов, как то: вращение внутри вихря-решетки, сдвиг и дополнительное вращение при образовании неоднородности внутри его, различная величина и интенсивность вихорьков и т.д.

Поэтому можно считать, что движение каждого вихорька достаточно индивидуализировано и вносит свой вклад в общее поле колебаний.

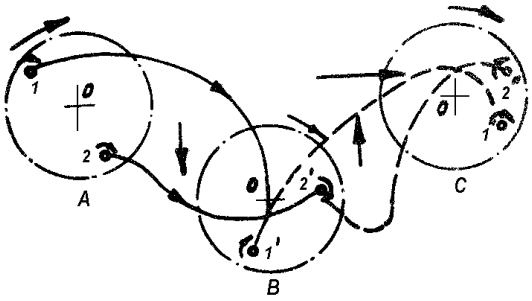

Рис.8. Движение элементов вихря-решетки: А, 1, 2 – начальное положение вихря-решетки и его элементов, соответственно; В, 1, 2, С, 1, 2 – положения через последующие промежутки времени движения вниз-вверх, соответственно.

На рис.8 показано движение нескольких таких элементов внутри вихря-решетки с учетом собственного движения последнего.

Рассмотренные выше «жидкие образования», начиная с простейшего вихорька, составляющего элемент структуры вихря-решетки и кончая дорожкой ближнего следа, ограничивающей зону разряжения, находятся в состоянии пульсационного движения по отношению к среднему движению. Эти колебания в совокупности образуют достаточно широкий спектр турбулентных пульсаций.

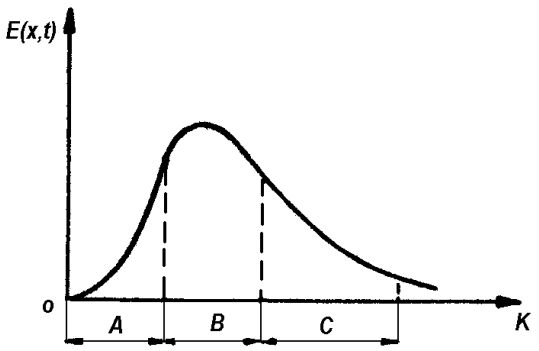

Рис.9. Спектральное распределение кинетической энергии турбулентности E (k, t) [7]: A – область излучения крупных вихревых систем; B – область энергосодержащих вихрей; C – область универсального равновесия; K – волновое число.

На рис.9 представлено спектральное распределение турбулентной энергии $E = E(K)$ [7].

Рассмотренные структуры вихрей-решеток и комплексных их образований, а также всей дорожки ближнего следа принадлежат к так называемым «энергосодержащим» вихрям, вносящим наибольший вклад в кинематическую энергию турбулентности. В спектральном распределении – это область максимума турбулентной энергии.

В самом деле, именно образования типа вихре-решеток в структуре ближнего следа ответственны, как показывает вышеприведенный анализ, за возникновение наибольших турбулентных пульсаций, с которыми непосредственно связаны касательные напряжения турбулентного трения, а значит и потери энергии при обтекании тела.

Поэтому частота этих вихрей тесно связана с относительной скоростью изменения энергии турбулентности [7].

$$\frac{1}{u'^2}\frac{du'^2}{dt} \approx -u'K\,, \qquad (23)$$

где u'^2 – квадратичное значение пульсационной составляющей скорости; $K = \frac{2\pi n}{\bar{u}}$ – волновое число, n – частота колебаний; $\bar{u}$ – скорость среднего движения.

Очень мелкие вихорьки, являющиеся элементами вихрей-решеток вследствие статической независимости связанного с ними турбулентного движения от области энергосодержания вихрей и зоны сильной диссипации, можно отнести к области универсального равновесия (рис.9).

Однако введенных структур еще недостаточно для заполнения энергетического спектра, т.е. рассмотренная выше структурная схема, несмотря на то, что она дает решение задачи гидродинамического сопротивления, не является полной.

Пополнение схемы связано с введением новых структур, которые образуются при прохождении струек через межвихревое пространство рядов дорожки. Возникновение их можно представить следующим образом.

Пусть струйка вытекает через межвихревое пространство во внешнее поле потока, вихрь-решетка находится в состоянии движения вниз, т.е. структура квазивихрей имеет вид, изображенный на рис.10, а.

Следует заметить, что элементами вихря-решетки являются не только вихорьки, вращающиеся по направлению основного вихря, но и в противоположном направлении.

Это объясняется тем, что с границы тела, задней к направлению потока, вливается в свободно-вихревой след определенного вращения пограничный слой противоположной завихренности.

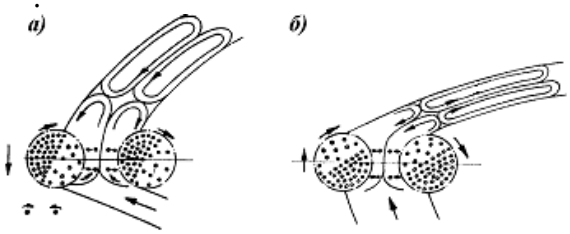

Рис.10. Модель образования «жидких» квадруполей при протекании струйки через межвихревое пространство во внешнюю область потока: а – движение вихревого слоя вниз; б – движение вихревого слоя вверх.

Под действием внешнего градиента давления возникает квазивихревое движение внутри вихря-решетки, приводящее к усилению вращательной компоненты с одной стороны вихря и ослаблению с другой. Изменение величины вращения с противоположных сторон вихря-решетки и связанное с этим ориентированное смещение вихорьков влево или вправо, в зависимости от направления их вращения (рис.10), приводит к усилению отделения в межвихревое пространство струйки вышеуказанных вихорьков определенной ориентации, которые становятся, образно говоря, «центрами кристаллизации» вихревого движения в пространстве между вихрями.

Вязкость ориентирует закручивание в межвихревом пространстве струйки в сторону ближайшего квазивихря. Это означает, что в полуцикле движения вниз образуется структура двух вихрей встречного вращения по схеме, показанной на рис.10,а. Давление в зоне образующейся структуры постепенно снижается книзу. В полуцикле движения вверх образуется структура двух вихрей противоположного к двум первым вращениям по схеме, показанной на рис.10,б. Давление в зоне вновь организующейся структуры повышается книзу.

Таким образом, за цикл колебания образуется жидкая вихревая структура – «закономерно построенный моль» квадрупольного типа. Величина его представляет из себя масштаб турбулентности в области поля вне вихревых рядов дорожки. Вихревая интенсивность элементов, составляющих этот жидкий квадруполь, так сказать, вихрей-решеток второго порядка, ниже интенсивности основных энергосодержащих вихрей. Небольшие различия в процессе колебания основных вихрей ряда создают некоторое смещение между образующимися квадруполями, так что в целом в зоне вытекания образуется ячеистая структура, составляющими которой являются квадруполи. Воздействие каждой из таких частиц на границу тела нейтрализуется соседними частицами так, что в целом гидродинамическое воздействие поля таких частиц на тело, с точностью до несущественно малой, равно нулю. Таким образом, мы получаем важный вывод: область протекающих через вихревые ряды струек представляет из себя квазипотенциальное поле квадруполей.

Размеры (осредненные) этой области S вблизи тела, ограничиваемые с одной стороны линией тока, разделяющей набегающий поток и зону отрыва, а с другой – внешними границами «активных» вихревых рядов дорожки определяются из решения кинематической картины течения на основании вышерассмотренной скелетной и вихревой схемы (рис.3, границы BP, BM и AN, AQ).

Наиболее характерное свойство частиц этой области – это непрерывное воздействие друг на друга из-за различного давления на границах таких частиц. В результате такого воздействия происходит периодическая перекачка давления с одной частицы на другую, а также изменение их внутренних моментов. С этим процессом связано возникновение пульсаций скоростей, которые вместе с налагающимися на них осцилляциями скоростей от основных вихрей определяют турбулентное скоростное поле вне вихревых рядов. Разумеется, поддержание процесса непрерывного воздействия частиц друг на друга может происходить только за счет избыточного притока энергии извне со стороны внешнего потока. Этот приток энергии по характеру проникновения ее внутрь области S подобен разобранному выше при анализе расчетной схемы движения дорожки ближнего следа (рис.3) [1], т.е. избыточное внешнее давление натекающего потока стремится сплющить внутреннюю область Ω пониженного давления, причем импульс давления приходится вначале на область S турбулентного квадрупольного поля, вызывая в ней за счет действия вязкости, какой бы малой величины она не была, деформации в вихревых элементах квадруполя, приводящие к общему усилению их моментов количества движения ΔM внутри этой области за цикл воздействия ΔT:

$$\Delta M = \frac{\rho}{2\Delta T} \times \times \left[\iint\limits_{\Delta TG} (\omega \pm \omega')(r + r')^2 dgdt - \iint\limits_{\Delta TG} \omega r^2 dgdt \right] > 0, \quad (24)$$

где ρ – плотность жидкости, r – расстояние до вихорька от центра вихря-решетки 2-го порядка, являющегося элементом кавдруполя; ω – угловая скорость движения вихорька на выходе из межвихревого канала вихревого ряда; r′, ω′ – приращения r и ω вихорька при дополнительном воздействии со стороны давления внешнего потока в области S; G – величина области интеграции, определяемой внешней границей вихревого ряда, границей внешнего течения и поперечного течения следа; ΔT – период колебания вихревого ряда дорожки.

Тем самым увеличиваются составляющие рейнольдсовых напряжений $\overline{\rho v_i \cdot v_j}$ внутри области S, т.е. со стороны внешнего потока часть работы уходит на увеличение турбулентности в этой области.

Необходимо отметить, что верхняя и нижняя части области S, в силу образования их вихревыми рядами определенного вращения, в какой-то мере односторонне закручены в сторону формирующих их вихревых рядов, хотя и не в такой степени, как сами ряды, что и позволяет квалифицировать их как квазипотенциальные зоны.

В силу же существования ориентированной завихренности в этих зонах образуются вихревые структуры дипольного типа, хотя и гораздо более слабые, чем в основных вихревых рядах дорожки.

Таким образом, зоны вихревых рядов дорожки и «буферная» область S ведут себя аналогично упругим средам, если следовать определению В.Томсона [8] упругости, «как рода внутреннего движения».

В нашем случае такими движениями можно считать квазивихревые образования в основных вихрях-решетках, а также вихревые движения в поле S на любом уровне, в том числе квадрупольные и т.д.

Согласно общему положению для «скрытых движений», выдвинутому Гельмгольцем [9], они являются причинным фактором, определяющим направление движения, которое может идти в обратном направлении только в случае обращения скрытых движений.

Модель турбулентной среды с позиций упругого твердого тела рассматривалась Таунсендом [10].

Необходимо отметить, что всюду при рассмотрении внутренняя замкнутая зона разрежения Ω, ограничиваемая вихревой дорожкой ближнего следа, принимается квазипотенциальной с интенсивностью турбулентности $\sqrt{\overline{w}'^2} << 1$, где $\overline{w}'^2 = \overline{u}'^2 + \overline{v}'^2$, так что в целом она почти не влияет на общее состояние турбулентного движения.

Это дает возможность принимать мгновенные величины давления и скорости с внутренней стороны вихревых рядов неизменными за весь цикл колебаний рассматриваемой области дорожки ближнего следа (рис.4) [1].

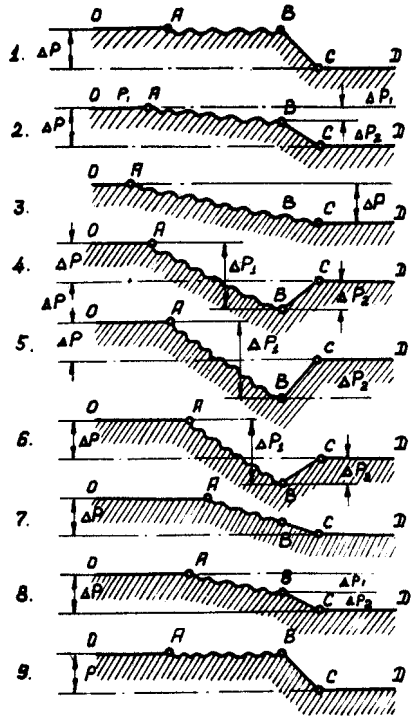

Рис.11. Изменение поля давления в сечении нормальном к внешней границе вихревых рядов дорожки: ОА – область внешнего потока; АВ – буферная область; ВС – вихревой ряд дорожки; СД – внутренняя область разрежения; Поз. 1-9 обозначают последовательные состояния поля за полный цикл колебания вихревого ряда. (Волнообразная поверхность условно обозначает вихревое квадрупольное поле).

Изменение внешних границ и полей давлений зоны отрыва вблизи тела, состоящей из буферной зоны S, вихревых рядов Γ_1 и зоны разрежения Ω, с учетом внутренних движений, образуемых вихревых структур, рассмотренных выше, может быть описано за цикл колебания с помощью нижеследующей схемы, представленной на рис.11.

Схема представляет собой поперечный разрез области спутной зоны плоскостью, перпендикулярной осевой линии следа, в различные моменты цикла колебания.

Возникновение градиентов давления в поле S (линия АВ), а не только в области вихревого ряда (линия ВС), дает внешнему потоку возможность воздействовать не только на вихревой ряд, но и на буферный слой, увеличивая его интенсивность турбулентности, о чем говорилось выше.

Изменение внешних границ зоны S вблизи тела кинематически представлено на рис.12,а, из которого видно, что изменение ее ширины в процессе колебания начинается с самого начала отрыва от границ тела.

Оно объясняется возникновением квазивихрей, воздействующих на вытекающий поток в зоне рассматриваемого сечения, как дипольные образования, увеличивающие или уменьшающие протекание через вихревой слой, а тем самым ширину этой зоны.

На рис.12,б показана локальная структура области S на границе с внешним потоком М. Элементами этой структуры являются квадрупольные образования, состоящие из четырех вихрей-решеток второго порядка, взаимно встречного вращения. Последние состоят из простейших элементов-вихорьков.

Процесс образования квадрупольного поля струек описан выше.

По характеру воздействия друг на друга, представляющему процесс непрерывной перекачки давления и энергии вращения от одних частиц в другие и обратно, усиливаемому за счет воздействия градиента со стороны внешнего потока, квадрупольные образования можно отнести к области универсального равновесия, где любое изменение эффективных масштабов длины и времени для этой турбулентности может быть только результатом влияния двух параметров: ε – скорости притока энергии, обеспечиваемой за счет возникновения градиентов давления и вязкости ν.

Образование мелких волн l на границе спутной зоны с внешним потоком (рис.12,б) можно объяснить с помощью квадрупольных вихрей так изменяющих форму границы, что образуются всплески и впадины в местах вытекания и втекания через эти вихри.

Величина микроволн l адекватна масштабу квадрупольных вихрей, определяемых из соотношения А.Н.Колмогорова [11]:

$$l = \nu^{3/4} \cdot \varepsilon^{-\frac{1}{4}}, \qquad (25)$$

где $\varepsilon(t) = -\frac{3}{2}\frac{du'^2}{dt}$; u'^2 – квадратичное значение пульсационной скорости в рассматриваемом месте.

Таким образом, зона ближнего следа состоит из области разрежения Ω, ограничиваемой активными вихревыми рядами дорожки Γ_1, ответственными, в основном, за гидродинамическое воздействие тела и жидкости, а также лежащей вне этой дорожки буферной турбулентной области S, граничащей с внешним, набегающим потоком.

Основными гидродинамическими структурными составляющими этого следа, как отмечалось выше, являются вихревые монополии, а также диполи и квадруполи, построенные на основе вихревых элементов.

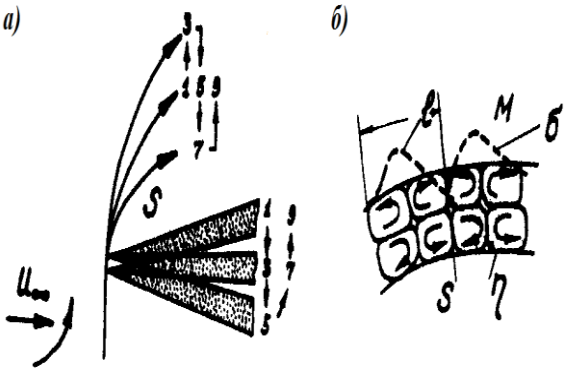

Рис.12. Изменение ширины зоны S в процессе колебания и кинематическая структура квадрупольных составляющих этой зоны: а – положения внешней границы области S отрывного течения и вихревого ряда дорожки за цикл колебания (нумерация соответствует тем же самым промежуткам времени, что и на рис.11); б – одно из положений локальной области квадрупольного поля S на границе с внешним потоком. Размер квадруполя затемнен.

Остановимся на явлении перемежаемости [10], т.е. периодического волнообразного искажения граничной поверхности σ, разделяющей турбулентную зону S спутного следа и область М внешнего нетурбулентного потока.

Граница σ не является материальной поверхностью, которая движется вместе с жидкостью. Она означает границу, непрерывно перемещающуюся в поперечном направлении, через которую осуществляется взаимное проникновение (эжекция) областей М и S.

Экспериментальные исследования явлений перемежаемости и эжекции проводились различными авторами [10].

Теоретически явления перемежаемости и эжекции на основе «упругой» и «вязкой» гипотез для турбулентной жидкости,

движущейся с постоянной скоростью относительно внешней потенциальной среды, рассматривались Таунсендом [10].

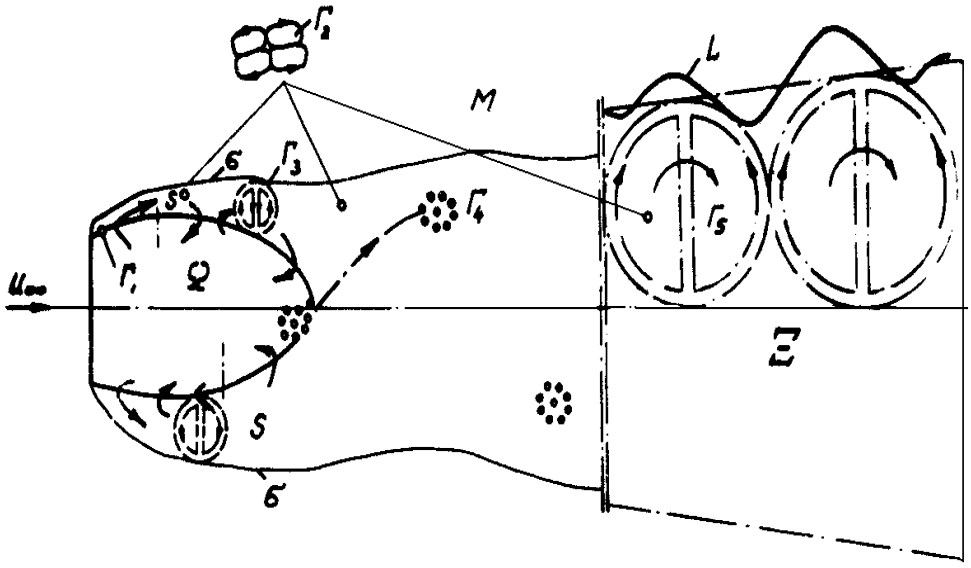

Рис.13. Форма отрывного течения за тонким телом с острыми кромками: Ω – область разрежения ближнего следа; Ξ – область дальнего следа; S – область буферного слоя; $\Gamma_1, \Gamma_3, \Gamma_4, \Gamma_5$ – вихри-решетки одностороннего вращения; Γ_2 – вихревой квадруполь; L – форма волновой группы от вихрей решеток Γ_5.

Следует подчеркнуть, что эти явления рассматривались применительно к области дальнего следа и ее модельным представлениям и не связывались с зоной ближнего следа. Приведенный гидродинамический структурный анализ зоны ближнего следа позволяет не только «наблюдать» явления перемежаемости и эжекции в этой зоне, но и установить место их зарождаемости и последующее распространение в область дальнего следа. В самом деле, как уже отмечалось выше, буферная зона (область турбулентных квадруполей) характеризуется существованием градиентного поля давлений. Направление градиента (с точностью до одного положения) – всегда к оси следа, однако значения его периодически меняются (рис.11) Такое направление градиента обуславливает непрерывное втекание внешней потенциальной жидкости внутрь области S. Величина этого втекания также постоянно меняется в связи со следующими факторами: изменением градиентного поля давления, а также в результате воздействия вихрей-решеток Γ_2, имеющих размер ширины зоны S (рис.13).

Воздействие их на внешний поток – обратно градиентному полю давлений, т.е. направлено в сторону уменьшения подсоса потенциальной жидкости. Еще раз отметим, что появление этих вихрей обусловлено тем, что буферная область S не является квазипотенциальной в полном смысле слова, но в той или иной степени имеет ориентацию вращения, что и ближайший к ней вихревой ряд дорожки. Двумя последними факторами и определяется количество подсасываемой жидкости внутрь квадрупольной зоны. В целом же градиентный подсос всегда выше, чем противоположное действие квазивихрей, так как интенсивность этих больших вихрей невелика и поэтому подсос существует всегда внутрь следа, однако максимум его будет не в положении 5 (рис.11), а сместится к положению 7 или 8, т.е. максимальный подсос приходится как раз на период возрастания квадрупольной зоны. Эта связь показывает, что в период роста выступов происходит наибольший подсос внешней жидкости.

Экспериментальные и теоретические исследования [12, 13, 10] указывают на существование увеличения эжекции в период наибольшего расширения границы турбулентной области.

Однако теоретическое объяснение этому эффекту, основанное на так называемой «гипотезе равновесия», выдвинутой Таунсендом [10], отличается от приведенного в настоящем разделе.

Существование подсоса через граничную поверхность σ (рис.13) существенно меняет кинематику потока, однако в непосредственной

близости от границ тела, где колебания активной дорожки и граничной зоны невелики, кинематическая картина близка к расчетной (рис.3) [1].

Изменение градиентного поля рассматривалось в локальной зоне, представляющей из себя узкий прямоугольник, перпендикулярный к оси следа. Таким образом, фиксируется локальная зона, в которой происходят упомянутые процессы.

Движение этой волны выступов, связанной с изменением градиентов поля давления, вообще говоря, зависит от «жесткости» буферной зоны, связанной с интенсивностью турбулентного квадрупольного движения внутри этой зоны и, как показывают исследования Таунсенда [10], имеет значительную продольную скорость относительно внешнего потока.

Представляет интерес вопрос о связи между колебаниями дорожки ближнего следа, вызывающими периодически отрыв вихрей Γ_3, и возникновением перемежающихся выступов с обеих сторон следа. В работах [8, 12, 14] отмечается, что возникновение выступов не связано по частоте с вихрями, распространяющимися сзади тела (цилиндра). Очевидно, что частота зарождения выступов зависит, в основном, от начального участка отрыва l, имеющего длину $l < \frac{L}{2}$, где L – длина ближнего следа, и определяется рядом параметров, как-то: формой тела, толщиной вихревого следа δ, градиентом скорости в нормальном к следу сечении $\frac{du}{dn}$ и т.д.

В целом это влияние может оказаться таким, что частота зарождения выступов не обязательно будет совпадать с частотой отрыва вихрей вне зоны смыкания ближнего следа. Зарождение выступов с двух сторон носит несимметричный характер.

Это непосредственно вытекает из следующего: в зоне отрыва течения непосредственно за телом увеличение вытекания через верхний вихревой ряд дорожки, в силу условия неразрывности, должно приводить, соответственно, к уменьшению вытекания через нижний ряд, т.е. условия сверху и снизу антисимметричны. Можно предположить, что начальные возмущения, распространяясь вниз по течению, порождают антисимметричные всплески и в дальнем следе.

В работах [10, 15] было показано, что вихревой след конечной толщины неустойчив к несимметричным колебаниям.

Структура дальнего следа представляет из себя вихри-решетки Γ_4 диаметром, равным полуширине следа с наибольшей завихренностью в областях максимальной средней скорости сдвига, центры которых находятся на среднем расстоянии $\frac{1}{4T}\int_0^T (a+b)dt$ от оси следа (рис.14), если считать T – достаточно большим промежутком времени, а сечение находящимся на постоянном расстоянии от тела.

Эти вихри-решетки в свою очередь состоят из квадрупольного вихревого поля и «размазанных» по полуширине следа односторонне ориентируемых вихрей Γ_3, сходящих с конца дорожки ближнего следа.

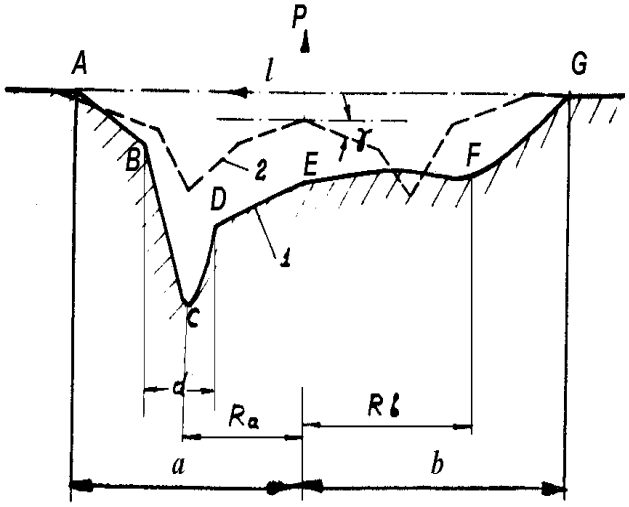

Рис.14. Сечение области дальнего следа плоскостью, перпендикулярной его оси: 1 – мгновенное состояние сечения; 2 – осредненная форма сечения.

Существующее поле градиентов давлений между внешней границей и осью следа определяет поперечное движение с образованием квазивихревых структур в пределах крупных вихрей-решеток.

Рельеф поля давления в сечении следа определяет состояние движения в данный момент времени в области длиной примерно равной $[-C, +C]$, если считать сечение началом отсчета, где $C = \frac{a+b}{2}$ – полуширина следа в сечении; a, b – текущие значения верхней и нижней полуширин следа.

Например, на рис.14 представлена картина,

когда верхняя половина следа (левая сторона) находится в момент наиболее развитого квазивихревого движения, противодействующего градиентному втеканию внешней жидкости, а также наибольшего насыщения квадрупольного поля турбулентным движением; нижняя половина следа (правая сторона) отвечает моменту минимального квазивихревого движения, вследствие чего градиентный подсос жидкости (эжекция) максимален, т.е. происходит выпучивание турбулентной жидкости во внешнюю область, иначе говоря образование выступов.

Турбулентное движение, характеризуемое величиной закрученности $\omega \pm \Delta\omega'$ (где ω – некоторая средняя закрученность; $\Delta\omega'$ – величина ее изменения в различные моменты времени) минимально с нижней стороны.

Грубо говоря, внешнему потоку передается часть той энергии, которой «подзаряжается» квадрупольное поле в момент максимального развития квазивихревого движения.

Существующая постоянно эжекция приводит к возрастанию ширины следа при удалении от начала отрыва.

Устойчивость фиксированной области следа длиной $[-C, +C]$ к внешним воздействиям, приводящим к периодическому усилению эжекции жидкости и перемежаемости можно охарактеризовать углом стыковки γ двух полуширин следа, образующих рельеф давления.

При этом форма рельефа принимается осредненной за достаточно большой промежуток времени.

Чем меньше этот угол, тем больше смещение места стыковки E в поперечном направлении при изменении перепадов давления, т.е. тем меньше жесткость системы.

В самом деле, изменение давления Δp дает смещение места стыковки в верхнюю или нижнюю половину следа на величину Δl, которые связаны (в линейном случае) с углом стыковки γ:

$$\Delta l = |\Delta p| \cdot tg\left(\frac{\pi}{2} - \gamma\right). \qquad (26)$$

Из формулы видно, что в случае малых значений угла γ (пологий рельеф) при условии $|\Delta p| = \text{idem}$, величина смещения сильно увеличивается.

В общем случае нелинейного изменения профиля сечения поля давления угол стыковки вследствие непрерывности давления должен быть равен нулю, поэтому условие (26) необходимо рассматривать как первое приближение при замене части кривой рельефа в месте стыковки на прямолинейный участок.

В нелинейном случае существенное значение играет кривизна профиля сечения в месте стыковки. Малые ее значения (слабые изменения градиентов давления) ведут к значительному возрастанию выступов.

Явление перемежаемости все увеличивающихся клубов дыма при удалении их от трубы наглядно подтверждает это. Эксперименты также говорят об увеличении величины выступов при удалении от начала [10], т.е. при ослаблении поля градиентов давления.

Цикл роста-распада выступов происходит по следующей схеме: увеличение градиента давления со стороны внешнего потока – увеличение турбулентной интенсивности квадрупольного поля и одновременно возникновение квазивихрей, которые противодействуют втеканию внешней жидкости – переход через состояние равновесия – рождение вихрей противоположной ориентации и связанное с этим уменьшение интенсивности прежних, рост подсасываемой жидкости с образованием выступов (перемежаемости), а также уменьшение интенсивности турбулентного квадрупольного движения, связанное с отдачей энергии внешнему потоку – опять равновесие – и затем повторение всего в прежнем порядке.

С нижней стороны, как показывают исследования [10, 15], нужно ожидать антисимметричного или, по крайней мере, независимого от верхней половины развития этого же явления. Грант [14] и Таунсенд [10] определяют последовательные состояния цикла роста-распада другим способом на основе гипотезы равновесия.

С помощью квазивихревого движения можно объяснить полученную в экспериментах [12, 14] и теоретически рассматриваемую [10] относительно простую форму волны выступов. Эта форма образуется воздействием двух «расщепленных» на квазивихревые образования крупных турбулентных вихрей, имеющих диаметр полуширины следа; на рис.13 приведена такая форма искажения границы дальнего следа.

С точки зрения распределения турбулентной энергии крупные вихри принадлежат области малых волновых чисел, а

мелкие квадрупольные вихревые образования и вихри, образующиеся в результате размазывания по всей области дальнего следа периодически отделяющихся вихревых структур – к области энергосодержащих вихрей в области универсального равновесия.

С введением последних структур весь спектр турбулентной энергии (рис.9) оказывается заполненным.

В итоге мы получили распределение структурных составляющих следа, представляющих из себя вихревые образования различного вида, по всей его длине.

На рис.13 приведена схематически структурная картина турбулентного следа за плохо обтекаемым телом.

Выводы

1. Воздействие внешнего градиента поля, а в случае турбулентного движения и перепада давления на границах вихрей, составляющих вихревые слои совместно с действием вязкости, какой бы малой величины она не была, формирует внутренние движения, так называемые квазивихревые структуры, влияние которых на внешний поток приводит, например, в случае турбулентного движения, к поперечному переносу импульса и т.д.
2. Для турбулентного потока жидкости получено распределение структурных составляющих следа за плохо обтекаемым телом, представляющих из себя вихревые образования различного вида по всей его длине.

Список литературы

1. Пухлий В.А., Мирошниченко С.Т., Соколов В.В., Пухлий К.В. Гидродинамическая акустика. Сообщение 1. Структурный подход к уравнениям движения. – Энергетические установки и технологии, 2018, том 4, №4, с.
2. Prandtl L. Unfersuchungen zur cnesqebildete Turbulentz. – Zeitschrift für Anqewandten. – Math. Und Mech, vol.5, 1925, s.24-31.
3. Петров Г.И., Штейнберг Р.И. Исследование потока за плохо обтекаемыми телами. – Труды ЦАГА, вып.482. – М., 1940. – 20 с.
4. Goldstein S. Modern developments in fluid dynamics. Vol.1-2. – New-York, Dover, 1965. – 375 p.
5. Фидман Б.А. Поле скоростей в водном потоке при внезапном увеличении глубины. – Известия АН СССР, МЖГ, №4, 1963, с.512-522.
6. Чжень П. Отрывные течения. Т.2. Перевод с англ. – М.: Мир, 1973. – 280 с.
7. Хинце И.О. Турбулентность, ее механизмы и теория. – М.: Физматгиз, 1963.– 342 с.
8. Kelvin, William Thomson. Steps forwards a kinetic theory of matter. – Brit. Ass. Rep., 1884, p.613-622.
9. Helmholz H. Über die physikalische Bedentung der prinzip der kleinsten Wirkung. – Journal für reine und angewandte Mathematik, B.100, H.2, 1886, s.137-166.
10. Townsend A.A. The mechanism of entraiment in free turbulent flow. – J. of Fluid Mechanics, 1966, Vol.26, Part 4, p.689-715.
11. Колмогоров А.М. Локальная структура турбулентности в несжимаемой вязкой жидкости при очень больших числах Рейнольдса. – Доклады АНСССР, том 30, №4, 1941, с.299-303.
12. Keffer J.F. The uniform distortion of a turbulent wake. – J. fluid Mechanics, vol.22, 1965, p.135-160.
13. Reynolds A.J. Observations on distorted turbulent wakes. – J. Fluid Mechanics, vol.13, 1962, p.333-355.
14. Grant H.L. The large eddics of turbule motion. – J. Fluid Mechanics, vol.4, Part 2, 1958, p.149-190.
15. Петров Ю.И., Новожилов С.Я., Хорошев Г.А. Способ снижения шума судовых вентиляторов. – Судостроение, №1, 1974, с.26-27.

Reference

1. Pukhliy V. A., Miroshnichenko S.T., Sokolov V.V., Pukhliy K.V. Hydrodynamic acoustics. The message 1. The structural approach to the movement equations. Scientific magazines Power plants and technologies, 2018, vol.4, №4, p.
2. Prandtl L. Unfersuchungen zur cnesqebildete Turbulentz. – Zeitschrift für Anqewandten. – Math. Und Mech, vol.5, 1925, p.24-31.
3. Petrov G. I, Steinberg R. I. Stream research behind badly streamline bodies. - Works Central Aerohydrodynamic institute named after N.E.Zhukovsky, rel.482. - M, 1940. - 20 p.
4. Goldstein S. Modern developments in fluid dynamics. Vol.1-2. – New-York, Dover, 1965. – 375 p.
5. Fidman B.A. field of speeds in a water stream at sudden increase in depth. - News AS USSR, MGH, №4, 1963, p.512-522.
6. Zhen P. Spasmodic of a current. T.2. Transfer with English - M: World, 1973. - 280 p.
7. Hinze I.O. turbulence, its mechanisms and the theory. - M: Fizmathgis, 1963.342 p.
8. Kelvin, William Thomson. Steps forwards a kinetic theory of matter. – Brit. Ass. Rep., 1884, p.613-622.
9. Helmholz H. Über die physikalische Bedentung der prinzip der kleinsten Wirkung. – Journal für reine und angewandte Mathematik, B.100, H.2, 1886, p.137-166.

10. Townsend A.A. The mechanism of entraiment in free turbulent flow. – J. of Fluid Mechanics, 1966, Vol.26, Part 4, p.689-715.
11. Kolmogorov A.M. Local turbulence structure in an incompressible viscous liquid at Reynolds's very big numbers. - Reports AS USSR, volume 30, №4, 1941, p.299-303.
12. Keffer J.F. The uniform distortion of a turbulent wake. – J. fluid Mechanics, vol.22, 1965, p.135-160.
13. Reynolds A.J. Observations on distorted turbulent wakes. – J. Fluid Mechanics, vol.13, 1962, p.333-355.
14. Grant H.L. The large eddics of turbule motion. – J. Fluid Mechanics, vol.4, Part 2, 1958, p.149-190.
15. Petrov J.I., Novozhilov S.J., Horoshev G. A. A way of decrease in noise of ship fans. - Shipbuilding, №1, 1974, p.26-27.

УДК 539.3; 536.46

Полуаналитический метод решения краевых и начальных задач применительно к расчету рабочих лопаток центробежных насосов открытого типа

В.А.Пухлий, А.А.Журавлев, Е.В.Глушкова, Н.К.Корнеева, Л.Н.Пичугова
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет» Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия.

Статья поступила 15.02.2019 г.; после доработки

Аннотация

Излагается полуаналитический метод расчета на прочность рабочих лопаток центробежных насосов открытого типа. На первом этапе исходная система дифференциальных уравнений в частных производных эллиптического типа (прочность), либо гиперболического типа (динамика) методом прямых приводится к системе обыкновенных дифференциальных уравнений, в общем случае с переменными коэффициентами. Интегрирование полученной системы уравнений в дальнейшем осуществляется модифицированным методом последовательных приближений, разработанным проф.В.А.Пухлий и опубликованным им в академической печати.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и города Севастополя в рамках научного проекта №18-48-920002.

Ключевые слова: центробежные насосы открытого типа, рабочие лопатки, метод прямых, модифицированным метод последовательных приближений

Semianalytical method of the decision of regional and initial problems with reference to calculation of working blades of centrifugal pumps open type

V.A.Pukhliy, A.A.Zhuravlev, E.V.Glushkova, N.K.Korneeva, L.N.Pichugova
Sevastopol state university, 299053, Sevastopol, Russia

Received 15.02.2019; received in final form

Abstract

The semianalytical method of calculation on durability of working blades of centrifugal pumps of open type is stated. At the first stage initial system of the differential equations in private derivatives of elliptic type (durability), or hyperbolic type (dynamics) is led by a method of straight lines to system of the ordinary differential equations, generally with variable coefficients. Integration of the received system of the equations is carried out further by the modified method consecutive approaches, the developed prof. V.A.Pukhliy and published by it in the academic press.

Research is executed at financial support of the Russian Federal Property Fund and a city of Sevastopol within the limits of the scientific project №18-48-920002.

Keywords: centrifugal pumps of open type, working blades, a method of the straight lines, modified a method consecutive approaches

Введение

Центробежные насосы представляют собой класс турбомашин, используемых в современной энергетике. Одной из наиболее сложных проблем в конструировании и эксплуатации центробежных насосов являются проблемы

прочности, обусловленные сложностью нагрузок, воздействующих на рабочее колесо.

В настоящей работе исследуется напряженно-деформированное состояние (НДС) рабочих лопаток центробежных насосов открытого типа постоянной толщины.

Из вариационного принципа Лагранжа получена система уравнений в частных производных, описывающая НДС лопатки.

Излагается полуаналитический метод расчета рабочих лопаток центробежных насосов открытого типа, основанный на применении метода прямых [1] и модифицированного метода последовательных приближений, разработанного проф. В.А.Пухлий и опубликованного им в академической печати [2-5]. При таком подходе обходятся трудности аналитических методов, связанных с удовлетворением граничных условий задачи [11].

Постановка цели и задач научного исследования

Целью научной работы является построение полуаналитического метода расчета рабочих лопаток центробежных насосов открытого типа.

В этой связи используется теория пологих оболочек Власова-Доннела. Исходные уравнения в частных производных методом прямых приводятся к системе обыкновенных дифференциальных уравнений, к решению которых затем применяется модифицированный метод последовательных приближений.

Формулировка исходной задачи

На рис.1 приведена конструктивная схема центробежного насоса открытого типа.

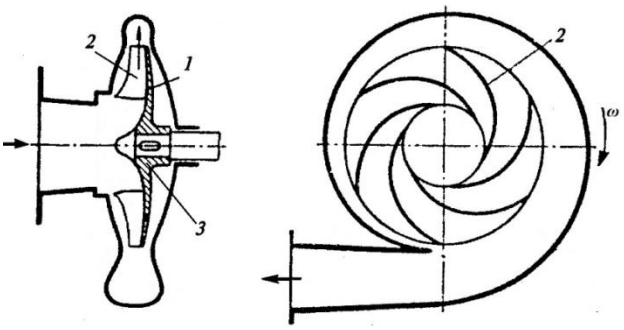

Рис.1. Конструктивная схема рабочего колеса центробежного насоса открытого типа:
1 – основной диск; 2 – лопатка; 3 – втулка.

Лопатка такого насоса с точки зрения механики представляет собой в общем случае консольную трапециевидную оболочку, защемленную вдоль края, прилегающего к основному диску $\eta_1 = k_1 m\xi + 1$ и свободную вдоль края $\eta_2 = \alpha(k_1 m\xi + 1)$ (рис.2). По остальным двум краям оболочки соблюдены граничные условия свободного края.

Лопатка насоса рассматривается в поле действия центробежных сил инерции собственных масс лопаток и гидродинамического давления потока жидкости [6, 7].

Рассмотрим напряженно-деформированное состояние трапециевидной лопатки центробежного насоса открытого типа.

Задача сводится к системе линейных уравнений Власова-Доннела [8, 9] теории пологих оболочек смешанного типа относительно нормального перемещения и функции напряжений. Эта система уравнений в безразмерных координатах $\xi = x/l$ и $\eta = y/b$ записывается в следующем виде:

$$\left.\begin{aligned} \nabla_m^4 \overline{w} - sm^2 \frac{l^2 Ep}{D} \frac{\partial^2 \overline{F}}{\eta^2} &= 1 - \frac{p_x l^3}{D} \frac{\partial \overline{w}}{\partial \xi}; \\ \nabla_m^4 \overline{F} + m^2 \frac{l^2}{pR} \frac{\partial^2 \overline{w}}{\partial \eta^2} &= -\frac{(1-\nu) l^2}{p^2} \frac{\partial^2 U}{\partial \xi^2}. \end{aligned}\right\} \quad (1)$$

Здесь $\overline{w} = w/p$; $\overline{F} = F/p^2 E$ – безразмерные величины функции прогибов и функции напряжений; $s = h/R$, $m = l/b$ – геометрические параметры лопатки; $p = ql^4/D$ – параметр нагрузки; q и $p_x = -\dfrac{\partial U}{\partial x}$ – нормальная и тангенциальная компоненты центробежной силы элемента лопатки, отнесенные к единице площади срединной поверхности:

$$q = \frac{\gamma}{g} \omega^2 h R_2 \cos\beta_2;$$

$$p_x = \frac{\gamma}{g} \omega^2 h (R_2 \sin\beta_2 - \xi l). \quad (2)$$

Тангенциальная нагрузка p_x имеет потенциал:

$$U = \frac{1}{2} \frac{\gamma}{g} \omega^2 h (R_2 \sin\beta_2 - \xi l)^2. \quad (3)$$

Граничные условия на косых краях лопатки имеют вид:

$$\overline{w} = 0, \qquad \frac{\partial \overline{w}}{\partial n} = 0 \text{ для края } \eta_1 = 1 - k_1 m\xi;$$

$$\frac{\partial^2 \overline{w}}{\partial \eta^2} + \nu m^2 \frac{\partial^2 \overline{w}}{\partial \xi^2} = 0 \text{ и}$$

$$\frac{\partial^3 \overline{w}}{\partial \eta^3} + (2-\nu) m^2 \frac{\partial^3 \overline{w}}{\partial \eta \partial \xi^2} = 0 \text{ для края}$$

$$\eta_2 = \alpha(k_1 m \xi + 1). \qquad (4)$$

По входной и выходной кромкам лопатки рассматриваются условия свободного края:

$$\frac{\partial^2 \overline{w}}{\partial \xi^2} + \nu m^2 \frac{\partial^2 \overline{w}}{\partial \eta^2} = 0;$$

$$\frac{\partial^3 \overline{w}}{\partial \xi^3} + (2-\nu) m^2 \frac{\partial^3 \overline{w}}{\partial \xi \partial \eta^2} = 0. \qquad (5)$$

Граничные условия для функции напряжений при отсутствии нагрузки на контуре записываются следующим образом:

$$\overline{F} = \frac{\partial \overline{F}}{\partial n} = 0. \qquad (6)$$

Представим систему уравнений (1) следующим образом:

$$\left.\begin{aligned} L_{11}(\overline{w}) + L_{12}(\overline{F}) = L_1; \\ L_{21}(\overline{w}) + L_{22}(\overline{F}) = L_2, \end{aligned}\right\} \qquad (7)$$

где L_{ik} $(i,k = 1,2)$ – безразмерные дифференциальные операторы теории оболочек, отнесенные к линиям кривизны поверхности; L_m $(m = 1,2)$ – компоненты заданной поверхностной нагрузки.

Решение двумерной краевой задачи

К решению двумерной краевой задачи, описываемой системой уравнений (1) и граничными условиями (4) – (6) применим полуаналитический подход, основанный на сочетании метода прямых [1] и модифицированного метода последовательных приближений [2-5].

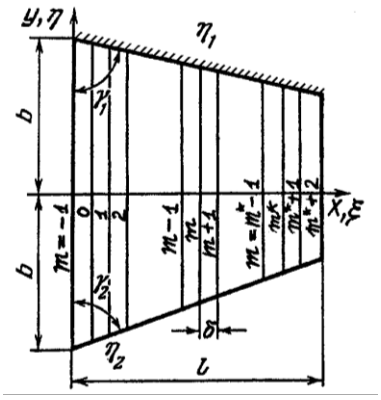

Рис.3. Применение метода прямых при расчете НДС трапециевидных лопаток.

В соответствии с методом разбиваем лопатку на полоски постоянной ширины δ, параллельные оси η (рис.3) и далее используем конечно-разностную аппроксимацию производных по координате ξ:

$$\left.\begin{aligned} \frac{\partial \overline{w}_m}{\partial \xi} &= \frac{(\overline{w}_{m+1} - \overline{w}_{m-1}) l}{2\delta}; \\ \frac{\partial^2 \overline{w}_m}{\partial \xi^2} &= \frac{(\overline{w}_{m+1} - 2\overline{w}_m + \overline{w}_{m-1}) l^2}{\delta^2}; \\ \frac{\partial^3 \overline{w}_m}{\partial \xi^3} &= \frac{(\overline{w}_{m+2} - 2\overline{w}_{m+1} + 2\overline{w}_{m-1} - \overline{w}_{m-2}) l^3}{2\delta^3}; \\ \frac{\partial^4 \overline{w}_m}{\partial \xi^4} &= \frac{(\overline{w}_{m+2} - 4\overline{w}_{m+1} + 6\overline{w}_m - 4\overline{w}_{m-1} + \overline{w}_{m-2}) l^4}{\delta^4}. \end{aligned}\right\} \qquad (8)$$

В формулах (8) обозначено: m – номер прямой, разделяющей две соседние полоски, m = -1, 0, 1, 2,…, $m^* + 1, m^* + 2$.

Рассмотрим уравнения (7) для каждой прямой (m = 1, 2,…, m^*). В результате получим систему обыкновенных дифференциальных уравнений относительно функций $\overline{w}$ и $\overline{F}$ с переменными коэффициентами. Граничные условия на параллельных краях лопатки используются для замыкания системы уравнений, минуя законтурные точки. При этом для стороны ξ = 0 используются конечные разности “вперед”, а для стороны ξ = 1 – конечные разности “назад” с точностью до δ^2 [10].

Запишем полученную систему обыкновенных дифференциальных уравнений следующим образом:

$$\overline{w}_m^{IV} = \sum_{\nu=-2}^{2} \sum_{i=0}^{3} A_{\nu,i}^m w_{m+\nu}^i + \sum_{\nu=-2}^{2} \sum_{i=0}^{3} B_{\nu,i}^m F_{m+\nu}^i + \phi_w^m,$$

$$\overline{F}_m^{IV} = \sum_{\nu=-2}^{2} \sum_{i=0}^{3} C_{\nu,i}^m w_{m+\nu}^i + \sum_{\nu=-2}^{2} \sum_{i=0}^{3} D_{\nu,i}^m F_{m+\nu}^i + \phi_F^m \quad (m = 1,2,\ldots,m^*). \qquad (9)$$

Здесь $A_{\nu,i}^m, B_{\nu,i}^m, C_{\nu,i}^m, D_{\nu,i}^m$ и ϕ_w^m, ϕ_F^m – переменные коэффициенты.

Применение модифицированного метода последовательных приближений к интегрированию систем дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами

К решению системы обыкновенных дифференциальных уравнений (9) применим модифицированный метод последовательных при-

ближений. В соответствии с методом переменные коэффициенты представим степенными полиномами, непрерывными на интервале изменения независимой переменной [2-5]:

$$A^m_{\nu,i} = \sum_{k=0}^{\theta} a^m_{\nu,i,k}\eta^k; \qquad B^m_{\nu,i} = \sum_{k=0}^{\theta} b^m_{\nu,i,k}\eta^k;$$

$$C^m_{\nu,i} = \sum_{k=0}^{\theta} c^m_{\nu,i,k}\eta^k; \qquad D^m_{\nu,i} = \sum_{k=0}^{\theta} d^m_{\nu,i,k}\eta^k; \tag{10}$$

$$\phi^m_w = \sum_{k=0}^{\theta} f^m_{k,w}\frac{\eta^k}{k!}; \qquad \phi^m_F = \sum_{k=0}^{\theta} f^m_{k,F}\frac{\eta^k}{k!}.$$

Общее решение системы уравнений (9) на основе модифицированного метода последовательных приближений записывается следующим образом:

$$\left.\begin{aligned} \overline{w}_m &= \sum_{\mu=1}^{8m^*} C_\mu\left[\frac{\eta^\chi}{\chi}\lambda + \sum_{n=1}^{\infty}\overline{w}^m_{\mu,n}\right] + \sum_{n=1}^{\infty}\overline{w}^*_n; \\ \overline{F}_m &= \sum_{\mu=1}^{8m^*} C_\mu\left[\frac{\eta^\chi}{\chi!}(1-\lambda) + \sum_{n=1}^{\infty}\overline{F}^m_{\mu,n}\right] + \sum_{n=1}^{\infty}\overline{F}^*_n, \end{aligned}\right\} \tag{11}$$

где $\chi = \mu - 8m + 7$, $\lambda = 1$ при $8(m-1) < \mu \le 8m - 4$ и $\lambda = 0$ для остальных μ.

В решении (11) первые слагаемые в квадратных скобках представляют собою нулевые приближения:

$$\overline{w}^m_{\mu,n} = \sum_{j=1}^{3n-2+\gamma} r^m_{\mu,n,j}\frac{\eta^\omega}{\omega!};$$

$$\overline{F}^m_{\mu,n} = \sum_{j=1}^{3n-2+\gamma} s^m_{\mu,n,j}\frac{\eta^\omega}{\omega!}. \tag{12}$$

Здесь $\omega = n + j + 2$, $\gamma = 0$ при $\mu = 1 + 4K, \gamma = 1$ при $\mu = 2 + 4K, \gamma = 2$ при $\mu = 3 + 4K, \gamma = 3$ при $\mu = 4 + 4K$.

Коэффициенты $r^m_{\mu,n,j}$ и $s^m_{\mu,n,j}$ определяются через коэффициенты предыдущего приближения по рекуррентным формулам:

$$r^m_{\mu,n,j} = \sum_{\nu=-2}^{2}\sum_{i=0}^{3}\sum_{k=0}^{\theta}\left[a^m_{\nu,i,k}r^{m+\nu}_{\mu,(n-1),\chi} + b^m_{\nu,i,k}s^{m+\nu}_{\mu,(n-1),\chi}\right]\times$$
$$\times\frac{1}{n+j-1}\prod_{\gamma=0}^{k}(n+j-1-\gamma);$$

$$s^m_{\mu,n,j} = \sum_{\nu=-2}^{2}\sum_{i=0}^{3}\sum_{k=0}^{\theta}\left[c^m_{\nu,i,k}r^{m+\nu}_{\mu,(n-1),\chi} + d^m_{\nu,i,k}s^{m+\nu}_{\mu,(n-1),\chi}\right]\times$$
$$\times\frac{1}{n+j-1}\prod_{\gamma=0}^{k}(n+j-1-\gamma), \tag{13}$$

где $\chi = j + i - k - 3$.

Частное решение системы уравнений (11) запишем в следующем виде $(\beta_1 = 3n + 2)$:

$$\overline{w}^*_n = \sum_{j=1}^{\beta_1} t^m_{j,n}\frac{\eta^\omega}{\omega!}; \qquad \overline{F}^*_n = \sum_{j=1}^{\beta_1} u^m_{j,n}\frac{\eta^\omega}{\omega!}. \tag{14}$$

Коэффициенты $t^m_{j,n}$ и $u^m_{j,n}$ определяются через коэффициенты предыдущего приближения по рекуррентным формулам:

$$t^m_{j,n} = \sum_{\nu=-2}^{2}\sum_{i=0}^{3}\sum_{k=0}^{\theta}\left[a^m_{\nu,i,k}r^{m+\nu}_{(n-1),\chi} + b^m_{\nu,i,k}s^{m+\nu}_{(n-1),\chi}\right]\times$$
$$\times\frac{1}{n+j}\prod_{\gamma=0}^{k}(n+j-\gamma);$$

$$u^m_{j,n} = \sum_{\nu=-2}^{2}\sum_{i=0}^{3}\sum_{k=0}^{\theta}\left[c^m_{\nu,i,k}r^{m+\nu}_{(n-1),\chi} + b^m_{\nu,i,k}s^{m+\nu}_{(n-1),\chi}\right]\times$$
$$\times\frac{1}{n+j}\prod_{\gamma=0}^{k}(n+j-\gamma). \tag{15}$$

Постоянные интегрирования C_μ, входящие в общее решение системы (11) находятся из граничных условий по входной $(\xi = 1)$ и выходной $(\xi = 0)$ кромках лопатки (5) и (6).

Заметим, что при формулировке граничных условий на наклонных кромках лопатки используется понятие производной по направлению.

Выводы

1. Излагается полуаналитический подход к расчету на прочность лопаток рабочих колес центробежных насосов открытого типа.
2. Полуаналитический подход основан на применении численного метода прямых [1] и модифицированного метода последовательных приближений [2-5].

Список литературы

1. Слободянский М.Г. Способ приближенного интегрирования уравнений с частными производными и его применение к задачам теории упругости. – ПММ, 1939, том 3, вып.1, с.75-83.
2. Пухлий В.А. Метод аналитического решения двумерных краевых задач для систем эллиптических уравнений. – Журн. вычислит. матем. и матем. физики, 1978, 18, №5, с.1275-1282.
3. Пухлий В.А. Об одном подходе к решению краевых задач математической физики. – Дифференциальные уравнения, 1979, том 15, №11, с.2039-2043.
4. Пухлий В.А. Решение начально-краевых задач математической физики модифицированным методом последовательных приближений. – Обозрение прикладной и промышленной математики, 2017, том 24, вып.1, с.37-48.
5. Пухлий В.А. Об ускорении сходимости решения в модифицированном методе последовательных приближений. – Обозрение приклад-

ной и промышленной математики, том 23, вып.4, 2016, с.381-383.
6. Пухлий В.А. Влияние аэродинамического давления потока на напряженное состояние лопаток центробежных воздуходувок. - Прикладная механика, 1974, том X, №4, с.86-92.
7. Pukhliy V.A. Fluid flow pressure effect on stresses in centrifugal turbine-fan impeller blades. – Proc. 5th Conf. Fluid Mach. vol.2, 1975, Budapest Acad. Kiado, p.869-879.
8. Власов В.З. Общая теория оболочек и ее приложения в технике. – М.-Л.: Гостехиздат, 1949. – 784 с.
9. Donnel L.H. Stability of thin walled tubes under torsion. – NACA, Rep. №479.
10. Гельфонд А.О. Исчисление конечных разностей. – М.:Наука, 1967, 375 с.
11. Пухлий В.А., Мирошниченко С.Т., Соколов В.В. и др. К расчету на прочность рабочих лопаток центробежных насосов открытого типа. – Труды 11-й МНТК «Гидроэнергетика. Гидротехника. Новые разработки и технологии». – Санкт-Петербург: ГК «РусГидро», 2017, с.208-210.

References

1. Slobodjansky M.G.Sposob of the approached integration of the equations with private derivatives and its application to problems of the theory of elasticity. - ПММ, 1939, volume 3, rel.1, s.75-83.
2. Pukhliy V. A. A method of the analytical decision of two-dimensional regional problems for systems of the elliptic equations. – J. will calculate. mathem. and mathem. physicists, 1978, 18, №5, p.1275-1282.
3. Pukhliy V. A. About one approach to the decision of regional problems of mathematical physics. - Differential equations, 1979, volume 15, №11, p.2039-2043.
4. Pukhliy V. A. The decision of nachalno-regional problems of mathematical physics the modified method consecutive approaches. - Review of applied and industrial mathematics, 2017, volume 24, rel.1, p.37-48.
5. Pukhliy V. A. About acceleration of convergence of the decision in the modified method consecutive approaches. - Review of applied and industrial mathematics, volume 23, rel.4, 2016, p.381-383.
6. Pukhliy V. A. Influence of aerodynamic pressure of a stream on an intense status of blades centrifugal turbine-fan. - Applied mechanics, 1974, volume X, №4, p.86-92.
7. Pukhliy V.A. Fluid flow pressure effect on stresses in centrifugal turbine-fan impeller blades. – Proc. 5th Conf. Fluid Mach. vol.2, 1975, Budapest Acad. Kiado, p.869-879.
8. Vlasov V. Z. The general theory of covers and its application in the technician. - M.-L.: Gostehizdat, 1949. - 784 p.
9. Donnel L.H. Stability of thin walled tubes under torsion. – NACA, Rep. №479.
10. Gelfond A.O. Calculation of final differences. - M.: Science, 1967, 375 p.
11. Pukhliy V. A, Miroshnichenko S.T., Sokolov V.V., etc. To calculation on durability of working blades of centrifugal pumps of open type. - works of 11th MNTK «Water-power engineering. Hydraulic engineering. New workings out and technologies». - St.-Petersburg: GK «Rushydro», 2017, p.208-210.

УДК.621.039.73

Анализ возможности переработки трапных вод при пониженном давлении

А.В. Сукрушев[1], Ю.В. Браславский[2], К.П. Аникевич[3]
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия.
[1]sukrushev1949@yandex.ru, [2]a1a67@yandex.ru, [3]anikonst@mail.ru

Статья поступила 07.02.2019 г.; после доработки 11.02.2019 г.

Аннотация

При эксплуатации энергоблока АЭС с ВВЭР образуется значительное количество загрязненных трапных вод, требующих переработки в специальной установке. В статье оценено влияние применения вакуумного испарителя на затраты энергии в установке очистки трапных вод, а также возможность использования центробежных нагнетателей для обеспечения снижения давления. Показана возможность снижения затрат тепловой энергии на работу очистительной установки при переработке трапных вод при пониженном давлении.

Ключевые слова: трапные воды, вакуумный испаритель, пониженное давление, центробежный нагнетатель.

Analysis of the possibility of trap water processing under reduced pressure

A.V. Sukrushev[1], Yu.V. Braslavskiy[2], K.P. Anikevich[3]
Sevastopol State University, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia.
[1]sukrushev1949@yandex.ru, [2]a1a67@yandex.ru, [3]anikonst@mail.ru

Received 07.02.2019 y.; received in final form 11.02.2019 y.

Abstract

A lot of polluted trap water is produced during operation of NPP with VVER. This water must be processed with the help of special installation. Influence of the vacuum evaporator upon energy consumption of the trap water treatment installation is estimated. Use of centrifugal blowers to reduce the pressure is examined. Opportunity of energy consumption lowering during trap water treatment under decreased pressure is shown.

Key words: trap water, vacuum evaporator, decreased pressure, centrifugal blower.

Введение

При эксплуатации энергоблока АЭС накапливается значительное количество жидких радиоактивных отходов (ЖРО). Жидкие отходы образуются при проведении различных технологических операций: дезактивации оборудования и помещений, регенерации фильтров системы продувочной воды первого контура и организованных протечек, опорожнении различных систем и механизмов и т.д.

Также источником являются протечки радиоактивного теплоносителя. Все эти отходы нужно перерабатывать и утилизировать. Для этого на на атомных электростанциях применяются различные установки спецводоочистки (СВО), такие, как установка очистки трапных вод СВО-3.

С помощью системы СВО-3 осуществляется сбор трапных вод, их первоначальная очистка от механических и химических примесей, а также радиоактивных загрязнений. Кроме того, в системе выполняется переработка трапных вод в выпарном аппарате, после чего получается концентрированный объем радиоактивных вод (кубовый остаток), который помещается в хранилище жидких радиоактивных отходов либо отправляется на переработку.

К трапным водам относятся [1]:

- неорганизованные протечки первого контура и спецкорпуса;
- воды дезактивации оборудования и помещений контролируемой зоны;
- воды дренирования оборудования во время вывода в ремонт;
- воды после взрыхления, отмывок и регенерации системы низкотемпературной очистки продувочной воды первого контура и организованных протечек;
- сбросы химических лабораторий;
- некондиционный дистиллят из контрольных баков очистки трапных вод, очистки вод спецпрачечной и системы регенерации борной кислоты;
- декантат из промежуточного узла хранения ЖРО.

Переработка этих вод требует затрат энергии, что снижает КПД всей ядерной установки.

Постановка цели и задач научного исследования

Целью проводимого исследования является оценка возможности снижения потерь тепловой энергии при очистке трапных вод реакторного отделения ЯЭУ с ВВЭР-1000. Для выполнения поставленной цели необходимо решить следующие научные задачи:

- оценить влияние применения вакуумного испарителя на затраты энергии в установке очистки трапных вод;
- рассмотреть целесообразность использования центробежного нагнетателя для создания разряжения в выпарном аппарате СВО-3.

Очистка трапных вод в установке СВО-3

Трапные воды, как правило, имеют сложный химический состав, высокое солесодержание (до 10 г/дм^3, в среднем, 3 г/дм^3), а также содержат органические вещества, коллоидные примеси, а также борную кислоту. Удельная активность трапных вод изменяется в пределах 10^{-8}…10^{-5} Ки/л. При этом активность вод значительно увеличивается во время ремонтов и достигает значений 10^{-4} Ки/л и более.

Очистка трапных вод в установке СВО ведется в три этапа:

1. Очистка от механических загрязнений.
2. Дистилляция, дегазация и конденсация.
3. Очистка полученного дистиллята от ионных примесей.

Функциональная схема системы СВО-3 представлена на рис. 1.

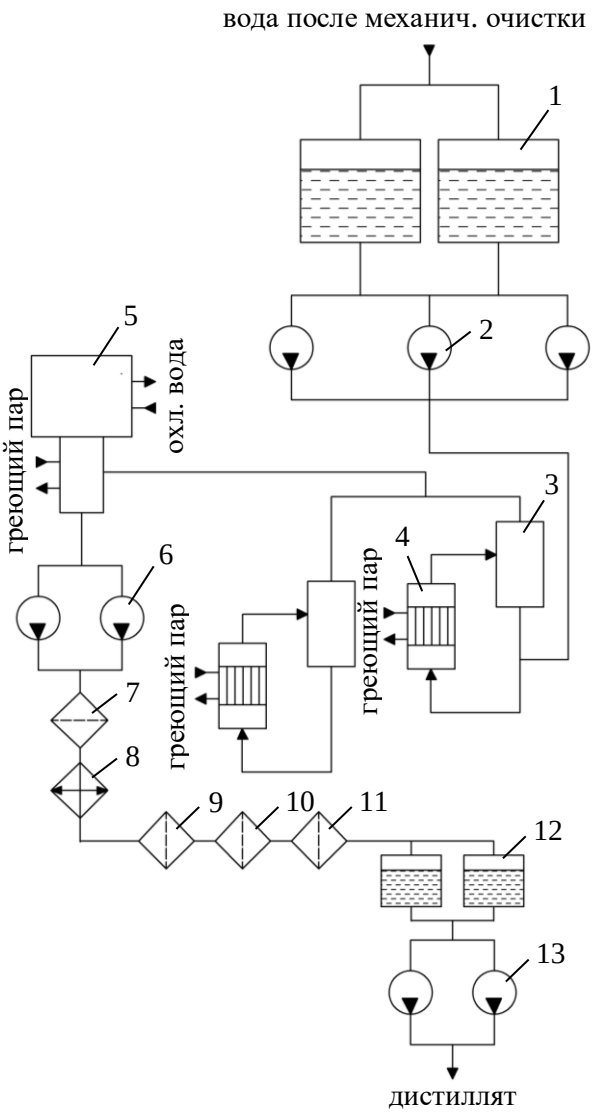

Рис. 1. Функциональная схема системы СВО-3 : 1 – бак трапных вод; 2 – насосы трапных вод; 3 – выпарной аппарат; 4 – доупариватель; 5 – конденсатор-дегазатор; 6 – насос дегазированной воды; 7 – механический обезмасливающий фильтр; 8 – охладитель дистиллята; 9 – катионитовый фильтр в H^+-форме; 10 – анионитовый фильтр в OH^--форме; 11 – фильтр-ловушка; 12 – контрольный бак; 13 – насос очищенной воды

Трапная вода при помощи насосов трапных вод направляется из баков в испаритель (выпарной аппарат). В испарителе вода первоначально подается в нижнюю часть греющей камеры, после чего поднимается по трубному пространству, нагревается до температуры насыщения, частично испаряясь. Полученная смесь воды и пара попадает в сепаратор через верхнюю перепускную трубу, где скорость этого потока стре-

мительно уменьшается, что обеспечивает отделение основной массы воды от пара. Водяные капли соединяются и стекают в нижнюю часть сепаратора, откуда снова направляются в греющую камеру по нижней перепускной трубе. Отделенный от воды пар поднимается вверх и попадает в жалюзийный отбойник, обеспечивающий окончательное отделение капель воды от пара за счет многократного изменения направления движения парового потока. На завершающем этапе пар промывается в барботажной тарелке, а также в насадке из колец Рашига.

Глубокое концентрирование упариваемого раствора производится в отдельном выпарном аппарате (доупаривателе). При этом часть раствора из выпарного аппарата постоянно перетекает в доупариватель за счет его более низкого расположения. Особенностью работы доупаривателя является то, что в результате давления столба жидкости, перетекающей из выпарного аппарата, зона кипения выпариваемого раствора выносится за пределы греющей камеры, что позволяет уменьшить количество отложений на поверхностях выпарного аппарата.

Система очистки трапных вод также предназначена для получения чистого дистиллята, который используется для борного регулирования в реакторной установке. Получение чистого дистиллята осуществляется по следующей схеме. Пройдя испаритель, вторичный пар попадает в конденсатор-дегазатор, где конденсируется, а полученный конденсат очищается от растворенных в нем газов. Основными элементами конденсатора-дегазатора являются дегазационная колонка, конденсатор, и испаритель-конденсатоотводник.

Выделившиеся в дегазаторе газы направляются в линию сдувки, а затем – в дефлегматор сдувок через центральный патрубок. В дефлегматоре происходит конденсация влаги из сдувок. После этого сдувка подается в систему вентиляции.

Пройдя конденсацию и дегазацию, полученный дистиллят вторичного пара, имеющий температуру около 104 ºС, насосами дегазированной воды прокачивается через механические обезмасливающие фильтры, загруженные активированным углем, охлаждается в охладителе дистиллята до 50 ºС и направляется далее для очистки на ионообменные фильтры. Критерием окончания ионообменной очистки дистиллята является появление ионов калия и натрия после катионитового фильтра и хлоридов после анионитового (проскок ионов).

После завершения ионообменной очистки дистиллят направляется в контрольные баки, где выполняется его химический и радиохимический анализ. Если результаты анализа удовлетворяют текущим требованиям, дистиллят направляется в баки системы чистого дистиллята или в баки собственных нужд блока СВО.

Механизм образования накипи в выпарном аппарате СВО-3

Существенной проблемой для эффективной работы установки СВО-3 является образование накипи в выпарном аппарате. Одним из способов борьбы с накипеобразованием является испарение загрязненной воды со сниженной температурой кипения.

Основными факторами, оказывающими влияние на структуру и основные свойства образующейся накипи (плотность и теплопроводность), являются рабочая концентрация кипящей воды с повышенным содержанием растворенных веществ (рассола), температура кипения и температурный напор.

Исследования, проведенные рядом ученых, показали, что сульфат и карбонат кальция, а также гидроксид магния являются основными видами накипи, образующимися в испарителях загрязненной воды в зависимости от теплофизических условий их работы.

При этом карбонат кальция ($CaCO_3$) и гидроксид магния ($Mg(OH)_2$) являются результатом разложения двууглекислого кальция ($Ca(CO_2)_2$), при котором выделяется углекислый газ (CO_2).

Бикарбонаты и карбонаты кальция в загрязненной воде полностью ионизированы

$$Ca(HCO_3) \Leftrightarrow Ca^{2+} + 2HCO_3^{-}; \quad (1)$$

$$CaCO_3 \Leftrightarrow Ca^{2+} + CO_3^{-}. \quad (2)$$

Как известно, если нагреть воду до температуры насыщения, то парциальное давление газов в ней, в том числе, и углекислого, снизится практически до нуля. В результате этого бикарбонат-ионы распадаются на ионы карбонатов, воду и углекислый газ, который выделяется из воды при ее кипении. При этом протекает химическая реакция, в результате которой образуется накипь

$$2HCO_3^{-} \rightarrow CO_3^{2-} + 2H_2O + CO_2. \quad (3)$$

Если в испарителе создать условия, при которых загрязненная вода будет кипеть при температуре менее 79 ºС, то за счет испарения воды вырастет концентрация карбонат-ионов, причем часть этих ионов соединится с ионами кальция, что обеспечит выпадение $CaCO_3$ из раствора

$$CO_3^{2-} + Ca^{2+} \rightarrow CaCO_3 \quad (4)$$

В то же время, карбонат кальция может оставаться в рассоле во взвешенном состоянии – в виде суспензии или шлама, т.е. будут наблюдаться отложения в виде накипи. Если температура кипения в испарителе превысит 80 °С, то карбонат-ионы будут распадаться с образованием гидроксид-ионов. Эти ионы будут соединяться с ионами магния, что приведет к образованию гидроксида магния, выпадающего в виде накипи

$$CO_3^{2-} + H_2O \rightarrow CO_2 + 2OH^-; \quad (5)$$

$$Mg^{2+} + 2OH^- \rightarrow Mg(OH)_2. \quad (6)$$

Гидроксид магния при температуре в пределах 82…83 °С также остается в рассоле в виде суспензии, причем с увеличением температуры он будет интенсивно выпадать как на обогреваемых, так и на необогреваемых поверхностях.

Согласно исследованиям, приведенным в работе [3], образование накипи в испарителях воды нужно рассматривать не как цикличный процесс выпадения сухого состава из воды при образовании паровых пузырьков и не как эффект электрического неравновесия поверхностей, имеющих локальные положительные и отрицательные электрические заряды. Накипеобразование – сложный электрохимический процесс кристаллизации, обусловливаемый рядом физико-химических и тепломеханических факторов.

В определенном смысле процесс образования накипи можно сравнить с процессом гальваностегии. Если при гальваностегии количество и структура металла покрытия являются функциями плотности тока, концентрации электролита и его температуры, то при образовании накипи ее количество и структура являются функциями величины теплового потока (или температурного напора), концентрации и температуры кипящего рассола. При ядерном кипении в перегретом граничном слое сольваты разрушаются, при этом ионы солей соединяются в кристаллы накипи, которые затем укрупняются и разрастаются. Каждый из этих процессов протекает с определенной скоростью в зависимости от нескольких определяющих факторов. В зависимости от того, какой процесс является преобладающим, образуется накипь мелко-, средне- или крупнозернистой структуры. Если химический состав образующейся накипи изменяется из-за изменений концентрации и температуры кипящего рассола, механизм накипеобразования еще больше усложняется.

Применительно для вакуумных испарителей, в которых температура испарения не более 75…78 °С, наиболее типичной является карбонатная накипь. Причем единственной кристаллической модификацией карбоната кальция, образующейся в подобных испарителях, является кальцит, имеющий наиболее простую решетку. Отличительными особенностями карбонатной накипи являются рыхлая структура, относительно малая плотность, а также низкая прочность.

Подобные особенности карбонатной накипи позволяют существенно облегчить удаление отложений на поверхностях выпарного аппарата (продувка выпарного аппарата очищаемой водой). Кроме того, представляется возможным упростить конструкцию выпарного аппарата путем исключения из схемы доупаривателя.

Влияние разряжения в выпарном аппарате на затраты греющего пара

Наиболее строгой характеристикой, определяющей экономичность выпарной установки, является удельный расход тепла, т. е. количество тепла, необходимое для работы опреснителя для получения 1 килограмм дистиллята. В то же время, на практике, экономичность выпарной установки часто оценивается с помощью другой величины – удельного расхода греющего пара, которая является более наглядной. Она, как правило, выражается в килограммах на 1 килограмм дистиллята. Также нашла применение и величина, обратная указанной – коэффициент продуктивности или выход дистиллята на 1 килограмм греющего пара, представляющая собой количество дистиллята, получаемое на 1 килограмм греющего пара.

Производительность одноступенчатой выпарной установки можно определить из уравнения ее теплового баланса [3]:

$$W_2 = \eta \cdot Q_1 / r_2 = \eta / r_2 \cdot \left[D_1 \left(i_1'' - i_1' \right) - W_1 \left(i_2'' - i_2' \right) \right], \quad (7)$$

где W_2 – производительность установки по чистому дистилляту, кг;

Q_1 – расход тепла на установку, кДж/кг;

η – коэффициент сохранения тепла, учитывающий потери тепла через корпус и трубопроводы;

r_2 – скрытая теплота образования вторичного пара, кДж/кг;

D_1 – расход греющего пара, кг/ч;

i_1'' – энтальпия греющего пара, кДж/кг;

i_1' – энтальпия конденсата греющего пара при температуре конденсации в нагревательном элементе, кДж/кг;

W_1 – количество питательной воды, кг/ч,

i_2'' – энтальпия греющего пара, кДж/кг;

i_2' – энтальпия рассола в испарителе, кДж/кг.

Кроме того,

$$W_i = mD_i, \quad (8)$$

где m – коэффициент подачи воды;

Отсюда удельный расход греющего пара

$$d_1 = \frac{D_1}{W_2} = \frac{r_2/\eta + m\left(i_2'' - i_{\text{пв}}\right)}{i_1'' - i_1'} = \frac{q}{i_1'' - i_1'}, \quad (9)$$

где q – удельный расход тепла, кДж/кг

$$q = \frac{r_2}{\eta} + m\left(i_2' - i_{\text{пв}}\right). \quad (10)$$

Определим d_1 для обычных условий, имеющих место в испарителях избыточного давления. Примем давление греющего пара (насыщенного) $p_1 = 0{,}3$ МПа.

Соответственно, $i_1' = 561{,}4$ кДж/кг; $i_1' =$ $= 2725{,}5$ кДж/кг.

Примем также $m = 2$; $i_{\text{пв}} = 125{,}66$ кДж/кг при $t_{\text{пв}} = 30\ ^{\circ}\text{C}$; давление вторичного пара $p_2 = 0{,}12$ МПа; $r_2 = 2244{,}08$ кДж/кг. Соответствующая ему температура кипения чистой воды $t_{\text{â}} = 104{,}2\ ^{\circ}\text{C}$. Температура кипения рассола двойной концентрации превышает указанную величину на 1,2 °С и составляет $t_2 = 105{,}4\ ^{\circ}\text{C}$, его теплоемкость – 4,199 кДж/(кг·град.), а энтальпия – $i_2' = c \cdot t_2 = 4{,}199 \cdot 105{,}4 = 442{,}57$ кДж/кг.

Коэффициент сохранения тепла η при достаточно тщательной изоляции может быть принят равным 0,99.

Подставляя эти величины в уравнения (9) и (10), получим

$$q = 2244{,}08/0{,}99 + 2 \cdot (442{,}57 - 125{,}66) =$$

$$= 2923{,}39 \text{ кДж/кг};$$

$$d_1 = 2923{,}39/(2725{,} - 561{,}4) = 1{,}35 \text{ кг/кг}.$$

Определим d_1 для условий, имеющих место в вакуумных испарителях.

Для этого примем те же параметры греющего пара и питательной воды, а температуру кипения чистой воды –равной 70 °С. При этом давление вторичного пара $p_2 = 0{,}0311$ МПа; $r_2 = 2333{,}79$ кДж/кг.

Температура кипения рассола составит 71,2 °С, его теплоемкость – 4,18 кДж/(кг·град.), а энтальпия – $i_2' = c \cdot t_2 = 4{,}18 \cdot 71{,}2 = 297$ кДж/кг.

Тогда

$$q = 2333{,}79/0{,}99 + 2 \cdot (297{,}61 - 125{,}66) =$$

$$= 2701{,}26 \text{ кДж/кг};$$

$$d_1 = 2701{,}26/(2725{,}5 - 561{,}4) = 1{,}24 \text{ кг/кг}.$$

Таким образом, внедрение в установку очистки трапных вод вакуумного испарителя указанной конфигурации позволит снизить расход греющего пара на 9,2 %.

Использование центробежного нагнетателя для создания разряжения в испарителе

Для создания пониженного давления и поддержания его при переработке трапных вод в установку спецводоочистки требуется включить дополнительный элемент. Таким элементом может быть струйный аппарат, обеспечивающий повышение инжектируемого потока без непосредственных затрат механической энергии и имеющий простую конструкцию. К рассмотрению предлагается центробежный нагнетатель (ЦБН) – компрессор, в котором используется преобразование кинетической энергии, полученной при вращении газа совместно с рабочим колесом, в потенциальную энергию давления в свободном пространстве корпуса.

Различают следующие основные виды ЦБН: полнонапорные (с двумя рабочими колесами) и неполнонапорные (с одним рабочим колесом). Для первого вида степень сжатия достигает значения 1,45, для второго – в пределах 1,23…1,2. При этом КПД ЦБН превышает КПД струйных аппаратов.

Мощность, необходимая для вращения вала центробежного нагнетателя можно определить по следующей формуле [4]:

$$P = \frac{k_з Q H}{\eta_п \eta_в}, \text{ Вт}, \quad (2)$$

где $k_з$ – коэффициент запаса (1,1...1,6);

Q – подача вентилятора, м^3/с;

H – давление воздуха, Па;

$\eta_п$ – коэффициент полезного действия передачи (если электродвигатель и насос соединены без передачи, то $\eta_п$ = 1, при клиноременной передаче $\eta_п$ = 0,92...0,94; при плоскоременной $\eta_п$ = 0,87.....0,9);

$\eta_в$ – коэффициент полезного действия вентилятора (для центробежных вентиляторов

$\eta_в$ = = 0,4...0,7, для осевых $\eta_в$ = 0,5...0,85).

Q – подача ЦБН может варьироваться в широких пределах, которые определяются объемом резервуара забираемого воздуха, герметичностью резервуара и систем, функционирующих

в условиях разряжения, а также требуемой скоростью снижения давления в резервуаре;

H – давление воздуха для нагнетателя. Данная величина определяется как разность давлений на выходе и входе ЦНБ с учетом потерь на гидравлические сопротивления самих трасс и предусмотренных на этих трассах устройств.

При выполнении представленных исследований принималось: потери на гидравлические сопротивления трасс – 5 %, на жалюзийный сепаратор – 10 %;

$k_з$ – коэффициент запаса, равный 1,2;

$\eta_в$ – коэффициент полезного действия вентилятора, равный 0,7.

Результаты расчета при различных давлениях и расходах показаны в табл. 1 и 2.

Таблица 1. *Параметры центробежного нагнетателя в зависимости от температуры насыщения.*

Температура насыщения, ^{0}C	**Давление на входе, Па**	**Давление на выходе, Па**	**Давление для ЦБН с учетом потерь, Па**
70	31173,333	101375,465	96278,93
60	19918,919	101375,465	112409,97

Таблица 2. *Потребляемая мощность центробежного нагнетателя в зависимости от температуры насыщения.*

Температура насыщения, ^{0}C	**Мощность в зависимости от расхода, Вт**				
	Q_1	**Q_2**	**Q_3**	**Q_4**	**Q_5**
	0,5 м^3/с	0,4 м^3/с	0,3 м^3/с	0,2 м^3/с	0,1 м^3/с
70	69199	55359	41520	27680	13399
60	80293	64234	48176	32117	16059

Учитывая, что производительность системы для очистки трапных вод реакторного отделения на современных АЭС составляет около 7…8 тонн в час, то даже при КПД ЯЭУ брутто ядерной установки 30…40 % очевидна экономия тепловой энергии при переработке трапных вод при сниженном давлении с использованием центробежных нагнетателей.

Таким образом, очистка трапных вод с использованием вакуумного испарителя позволяет снизить затраты энергии на установку спецводоочистки даже при использовании дополнительного элемента для создания разряжения.

Заключение

Выполненные исследования по оценке возможности снижения потерь тепловой энергии на очистку трапных вод реакторного отделения ЯЭУ с ВВЭР-1000 показали следующие результаты:

- использование в установке очистки трапных вод вакуумного испарителя с температурой кипения чистой воды 70 ^{o}C позволит снизить затраты греющего пара на 9,2 %;
- затраты тепловой энергии всей установки очистки трапных вод в целом при использовании вакуумного испарителя уменьшатся даже при условии введения дополнительного элемента для создания разряжения.

Список литературы

1. Сукрушев А.В. Основы водно-химического режима контуров ЯЭУ АЭС: учеб. пособие / А.В. Сукрушев, Ю.В. Браславский. – Севастополь: СевГУ, 2017 . – 260 с.: ил.
2. Сычев Е.Н. Комплекс программ для интерполяции табличных данных термодинамических свойств воды и водяного пара / Е.Н. Сычев. – Севастополь: СИЯЭиП, 2001. – 16 с.
3. Коваленко В.Ф. Судовые водоопреснительные установки / В.Ф. Коваленко, Г.Я. Лукин. – Л., «Судостроение», 1970.
4. Пятибрат В.П. Упрощенные способы расчета нагнетателей: метод. указания / В. П. Пятибрат. – 2-е изд., исправ. – Ухта : УГТУ, 2013. – 22 с.

References

1. Sukrushev A.S., Braslavskiy Yu.V. *Osnovy vodnokhimicheskogo rezhima konturov YAEU AES.* [Water chemistry principles of NPP NPI circuit]. Sevastopol, FAEI HE SSU Publ., 2017, 260 p.
2. Sychev E.N. *Kompleks programm dlya interpolyatsii tablichnykh dannykh termodinamicheskikh svojstv vody i vodyanogo para.* [Programm complex for tabular data interpolation of thermodynamics properties of water and water steam]. Sevastopol, SINEI Publ., 2001, 16 p.
3. Kovalenko V.F, Lukin G.Ya. *Sudovye vodoopresnitelnye ustanovki.* [Ship water-desalinating installations]. Leningrad, Shipbuilding Publ., 1970
4. Pyatibrat V.P. *Uproshhennye sposoby rascheta nagnetatelej: metod. ukazaniya.* [Simplified calculation methods of superchargers: metodical pointing]. Ukhta, UGTU Publ., 2013, 22 p

УДК 621.039.5

Механизм протекания кризиса теплоотдачи и влияние его на температурное поле тепловыделяющего элемента в корпусных ядерных реакторах кипящего типа

В.В. Шаповаленко[1], Г.Я.Мерзликин[2], К.Б. Матузаев[3], Ю.В.Браславский[4]
[1,2,3,4]ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33, г. Севастополь, 299053, Россия.
[1]shapovalenkovita@rambler.ru , [2]merzlikinG@mail.ru , [3]matuzaev@mail.ru., [4]a1a67@yandex.ru

Статья поступила 25.02.2019 г.; после доработки 28.02.2019 г.

Аннотация
В статье описываются особенности протекания кризиса теплоотдачи в кипящем корпусном ядерном реакторе, дается методика расчета температуры оболочки твэла в условиях кризиса теплоотдачи.

Ключевые слова: кипящий корпусной ядерный реактор**,** кризис теплоотдачи, температура оболочки твэла.

The mechanism of the heat transfer crisis, his influence on temperature field in the fuel element in the BWR

V.V. Shapovalenko[1] , G. Yu. Merzlikin[2], K.B. Matyzaev[3], Yu.V Braslavskiy[4]
[1,2,3,4]Sevastopol stat university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia,
[1]shapovalenkovita@rambler.ru , [2]merzlikinG@mail.ru , [3]matuzaev@mail.ru, a1a67@yandex.ru

Received 25.02.2019 y.; received in final form 28.02.2019 y.

Abstract
The article describes the features of the heat transfer crisis in the nuclear reactor BWR, provides a method for calculating the temperature of the fuel rod cladding in a heat transfer crisis.

Keywords: boiling water reactor, the crisis of heat transfer, the temperature of the fuel rod cladding.

Введение

Основное распространение корпусные кипящие водо-водяные реакторы (BWR) получили за рубежом: в США, ФРГ, Японии.

В таких реакторах пар генерируется непосредственно в активной зоне, осушается в сепарационных устройствах, также расположенных в ядерном реакторе, а далее направляется для работы в турбину.

Сложность эксплуатации связана с наличием гидродинамической и нейтронной нестабильностью, которая возникает при превышении предельных значений паросодержания в активной зоне реактора, что приводит к неустойчивой работе энергоустановки.

Кроме того, в активной зоне реактора, устанавливаются тепловыделяющие сборки (ТВС) с тепловыделящими элементами (твэл) с оболочкой из циркониевого сплава (циркалоя) и ядерного топлива - диоксида урана.

В условиях ухудшенного теплообмена, протекающего со значительной потерей теплоносителя и при высоких паросодержаниях, резко снижаются прочностные характеристики оболочки твэла.

Это связано с тем, что при высоких температурах оболочки твэла из циркалоя более 400 ^{o}C тонкие пассивирующие плёнки оксидов легирующих элементов сплава разрушаются, а цирконий активно окисляется водой

$$Zr + 2H2O \rightarrow ZrO2 + 2H2 + Q$$

с образованием диоксида циркония, водорода и выделением дополнительно тепла, которое еще более вследствие химической реакции разогревает оболочку твэла, что приводит к её расплавлению [2].

Постановка цели научной работы

Целью данной научной работы является исследование изменения температурного поля тепловыделяющего элемента в условиях ухудшенного теплообмена со значительной потерей теплоносителя в активной зоне ядерного реактора типа BWR.

В качестве объекта для анализа принимается тепловыделяющий элемент.

Методика расчета температурного поля тепловыделяющего элемента

При рассмотрении одного твэла толщина слоя теплоносителя была принята равной:

$$D_{тн} = \frac{a - d_{твэл}}{2}, \qquad (1)$$

где α - величина шага решетки.

Основным уравнением, по которому производился данный расчет, было дифференциальное уравнение теплопроводности с внутренними источниками тепла [3].

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \lambda\left(\frac{\partial^2 T}{\partial^2 x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial^2 y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial^2 z^2}\right) = q_v, \qquad (2)$$

Так как весь процесс рассматривался в цилиндрической системе координат, то в данной системе координат уравнение (2) имеет вид:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \lambda\left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1\partial T}{r\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) = q_v, \qquad (3)$$

Для решения дифференциального уравнения были приняты следующие начальные и граничные условия.

Для топлива:

$$t_0 = 0\begin{cases} r = 0; T = 0; (\frac{dT}{dr})_{r=0} = 0 \\ r = r_1; T = T_{ст1}; \left(\frac{\partial T}{\partial r}\right)_{r=r_1} = -\frac{\lambda_2}{\lambda_1 \partial}(T_{ст1} - T_{ст2}) \end{cases}$$

Для оболочки:

$$t_0 = 0\begin{cases} r = r_1; T = T_{ст1}; \left(\frac{\partial T}{\partial r}\right)_{r=r_1} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1 \partial}(T_{ст1} - T_{ст2}) \\ r = r_2; T = T_{ст2}; \left(\frac{\partial T}{\partial r}\right)_{r=r_2} = -\alpha(T_{ст1} - T_{ст2}) \end{cases}$$

где r_1 - радиус топливной таблетки;

r_2 - радиус оболочки твэла (внешний);

$\delta = r_2 - r_1$ - толщина оболочки твэл;

$T_{ст1} = f(z)$ – температура поверхности топлива;

$T_{ст2} = f(z)$ - температура поверхности ТВЭЛ;

λ_1 - коэффициент теплопроводности топлива;

λ_2 - коэффициент теплопроводности оболочки твэл;

$\alpha = f(z)$ – коэффициент теплоотдачи от стенки к теплоносителю;

$T_ж = f(z)$ – температура жидкости.

В остановленном реакторе основным источником тепла является радиоактивный распад накопленных осколков деления, основная часть которых накоплена в топливе, следовательно, мощность внутренних источников для оболочки равна $q_v = 0$.

Для топлива, мощностью внутренних источников (при неработающем реакторе) является мощность остаточных тепловыделений, которая зависит от качественного состава накопленных радиоактивных продуктов деления, которые зависят от мощности реактора, времени работы на данной мощности и времени стоянки, а также от характеристики накопленных осколков.

При использовании топлива одинакового обогащения из UO_2 можно принять, что средняя характеристика накопленных осколков одинаковая. Время работы реактора и его стоянки не оказывают влияние на вид функции распределения остаточного тепловыделения, следовательно, мощность остаточного тепловыделения определяется мощностью реактора, которая определяется плотностью потока нейтронов во всех его частях.

Если пренебречь тепловыделением в конструкционных элементах, то можно утверждать, что мощность реактора определяется только тепловыделением внутренних источников тепла, которые размещены в ядерном топливе.

При рассмотрении топлива, было принято, что мощность внутренних источников теплоты,

при работе реактора на мощности, изменяется по высоте по закону косинуса

$$q_v'(z) = \overline{q_v'} \cdot \cos\left(\frac{\pi z}{H_{эф}}\right), \quad (4)$$

Это допущение было сделано на основе следующего допущения, а именно, что в процессе работы реактора нейтронное поле по высоте активной зоны изменялось по закону косинуса (что на самом деле не так, так как на форму нейтронного поля влияло изменение положение ОР СУЗ).

На основании всего этого можно принять, что мощность остаточного тепловыделения изменяется по высоте по закону косинуса. Следовательно, функция зависимости мощности остаточного тепловыделения от высоты имеет вид:

$$q_v(z) = \overline{q_v} \cdot \cos\left(\frac{\pi z}{H_{эф}}\right), \quad (5)$$

Для этого уравнения нужно определить коэффициент $\overline{q_v}$. Зная, что геометрический смысл интеграла – это площадь фигуры, ограниченная функцией, по которой ведется интегрирование, то можно смело утверждать, что:

$$\int_{-H/2}^{H/2} \overline{q_v} \cdot \cos\left(\frac{\pi z}{H_{эф}}\right) dz = \frac{Q_\tau}{\pi \cdot n_{твс} \cdot n_{твэл} \cdot r_1^2 \cdot H}$$

решение интеграла имеет вид:

$$\int_{-H/2}^{H/2} \overline{q_v} \cdot \cos\left(\frac{\pi z}{H_{эф}}\right) dz = \overline{q_v} \frac{H_{эф}}{\pi} \int_{-H/2}^{H/2} \cos\left(\frac{\pi z}{H_{эф}}\right) d\frac{\pi z}{H_{эф}} =$$

$$= \frac{H_{эф}}{\pi} \cdot \overline{q_v} \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot z}{H_{эф}}\right) = \frac{H_{эф}}{\pi} \cdot \overline{q_v} \cdot \left(\sin\left(\frac{\pi \cdot H}{2H_{эф}}\right) - \sin\left(\frac{\pi \cdot H}{2H_{эф}}\right)\right) =$$

$$= \frac{2H_{эф}}{\pi} \cdot \overline{q_v} \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot H}{2H_{эф}}\right)$$

Тогда

$$\frac{2 \cdot H_{эф}}{\pi} \overline{q_v} \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot H}{2H_{эф}}\right) = \frac{Q_\tau}{\pi \cdot n_{твс} \cdot n_{твэл} \cdot r_1^2 \cdot H}$$

Отсюда

$$\overline{q_v} = \frac{\pi \cdot Q_\tau}{\pi \cdot n_{твс} \cdot n_{твэл} \cdot r_1^2 \cdot H \cdot 2H_{эф} \cdot \sin\left(\frac{\pi H}{2H_{эф}}\right)}$$

также для учета временного изменения мощности остаточного тепловыделения использовалась формула Вэя-Вигнера.

$$Q_\tau = 0.066 \cdot Q_p \cdot \tau^{-0.2}, \quad (6)$$

С учетом данного решения, распределение мощности остаточного тепловыделения по высоте активной зоны будет иметь вид:

$$q_v(z) = \frac{0.066 \cdot Q_p \cdot \tau^{-0.2}}{n_{твс} \cdot n_{твэл} \cdot r_1^2 \cdot H \cdot 2H_{эф} \cdot \sin\left(\frac{\pi H}{2H_{эф}}\right)} \cdot \cos\left(\frac{\pi z}{H_{эф}}\right)$$

Описание процесса теплообмена между поверхностью тела и окружающей средой происходило по закону Ньютона-Рихмана:

количество теплоты, отдаваемое единице поверхности тела в единицу времени, пропорционально разности температур поверхности тела и окружающей среды.

$$q = \alpha(T_c - T_{ж}), \quad (7)$$

Поскольку, рассматриваемый реактор является реактором кипящего типа, в котором пар генерируется в активной зоне, но не во всей, а только в её части, где теплоноситель нагрет до температуры насыщения, то коэффициент теплоотдачи для этой части рассчитывается по соответствующим формулам.

В начальный момент времени в реакторе был некоторый уровень теплоносителя, часть из которого была нагрета до температуры кипения.

При этом уровень теплоносителя в реакторе за счет испарения теплоносителя постепенно снижался, то можно предположить, что за время снижения уровня теплоносителя до уровня верхних концов твэл весь теплоноситель по высоте твэл нагреется до температуры насыщения.

В результате продолжения процесса кипения, испарение теплоносителя привело к снижению его уровня в реакторе ниже верхней части активной зоны, что привело к оголению твэлов. Для оголенной части твэл теплоотвод осуществлялся паром.

Для каждого случая теплоотвода, то ли это пар, то ли кипящая жидкость, учитывались свои условия теплоотвода, и применялись соответствующие расчетные зависимости.

В случае окружения слоем теплоносителя, при котором теплоотвод осуществлялся ки-

пящей жидкостью, коэффициент теплоотдачи рассчитывался по формуле Михеева [1].

$$\alpha = 3.14 \cdot q^{0.7} p^{0.15} \quad (8)$$

где p - давление, [бар].

q - плотность тепловыделения, [Вт/м^2].

Так как тепловыделения по высоте не постоянны, то, следовательно, и коэффициент теплоотдачи является функцией высоты, тогда формула (8) примет вид:

$$\alpha = 3.14 \cdot \left(\frac{0.066 \cdot Q_p \cdot \tau^{-0.2}}{n_{твс} \cdot n_{твэл} \cdot r^2 \cdot H \cdot 2H_{эф} \sin\left(\frac{\pi H}{zHэH}\right)} \cdot \cos\left(\frac{\pi z}{H_{эф}}\right)\right)^{0.7} \cdot p^{0.15} \quad (9)$$

где $\frac{\pi r_1^2}{2\pi r_2}$ - переход от объемной плотности тепловыделения к поверхностной плотности тепловыделения.

Для теплоотвода паром, коэффициент теплоотдачи от стенки к пару рассчитывался с помощью чисел подобия конвективного теплообмена [1].

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_г}, \quad (10)$$

где λ- коэффициент теплопроводности пара;

$d_г = 2 \cdot r_2$ – диаметр твэла;

Nu - число Нуссельта.

$$Nu = 0.021 \cdot \mathrm{Re}^{0.8} \cdot \mathrm{Pr}^{0.43}, \quad (11)$$

где *Re* – число Рейнольдса;

Pr – число Прандтля.

Число Рейнольдса определяется по формуле

$$\mathrm{Re} = \frac{\omega \cdot d_э}{\nu}, \quad (12)$$

где ω– скорость течения пара;

ν – коэффициент кинематической вязкости для пара в состоянии насыщения;

$d_э$ – эквивалентный диаметр занимаемый потоком пара.

В нашем случае скорость движения пара величина не постоянна, и зависит от величины теплоты, подведенной к пару. При этом, количество подведенной теплоты переменно во времени, и определяется временем стоянки реактора (из-за простоя мощность остаточного тепловыделения падает) и уровнем теплоносителя (по мере снижения уровня количество подведенного тепла уменьшается).

Так как весь теплоноситель находится на линии насыщения, то все подведенное тепло идет на парообразование.

$$Q_\tau = G \cdot r, \quad (13)$$

где r -скрытая теплота парообразования;

G – расход пара.

Отсюда

$$G = \frac{Q_\tau}{r}, \quad (14)$$

тогда объемный расход будет равным:

$$V = G \cdot \nu, \quad (15)$$

а скорость пара соответственно равна:

$$\omega = \frac{\nu}{S}, \quad (16)$$

где $S = \pi\left(\frac{a^2}{4} - r_2^2\right)$ - площадь проходного сечения.

Величина подведенной теплоты в единицу времени будет равна интегралу

$$Q_\tau = \int_{-\frac{H}{2}}^{z} \frac{\pi 0.066 \cdot Q_p \cdot \tau^{-0.2}}{n_{твс} \cdot n_{твэл} \cdot 2H_{эф} \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot H}{2 \cdot H_{эф}}\right)} \cdot \cos\left(\frac{\pi z}{H_{эф}}\right) dz =$$

$$= \frac{H_{эф}}{\pi} \cdot \frac{\pi \cdot 0.066 \cdot Q_p \cdot \tau^{-0.2}}{2H_{эф} \cdot n_{твс} \cdot n_{твэл} \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot H}{2 \cdot H_{эф}}\right)} \int \cdot \cos\left(\frac{\pi z}{H_{эф}}\right) d\frac{\pi z}{H_{эф}} =$$

$$= \frac{0.066 \cdot Q_p \cdot \tau^{-0.2}}{2 \cdot n_{твс} \cdot n_{твэл} \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot H}{2 \cdot H_{эф}}\right)} \sin\left(\frac{\pi \cdot z}{H_{эф}}\right)\Big|_{-\frac{H}{2}}^{z} =$$

$$\frac{0.066 \cdot Q_p \cdot \tau^{-0.2}}{2 \cdot n_{твс} \cdot n_{твэл} \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot H}{2 \cdot H_{эф}}\right)} \left(\sin\left(\frac{\pi \cdot z}{H_{эф}}\right) + \sin\left(\frac{\pi \cdot H}{2H_{эф}}\right)\right) =$$

$$= \frac{0.066 \cdot Q_p \cdot \tau^{-0.2}}{2 \cdot n_{твс} \cdot n_{твэл}} \left(1 + \frac{\sin\left(\frac{\pi \cdot z}{H_{эф}}\right)}{\sin\left(\frac{\pi \cdot H}{2H_{эф}}\right)}\right), \quad (17)$$

Подставляя выражения (17), (15), (14) в формулу (16) получим:

$$\omega = \frac{\frac{0.066 \cdot Q_p \cdot \tau^{-0.2}}{2 \cdot n_{твс} \cdot n_{твэл}} \left(1 + \frac{\sin\left(\frac{\pi z}{H_{эф}}\right)}{\sin\left(\frac{\pi \cdot H}{2H_{эф}}\right)}\right)}{r \cdot \pi \cdot \left(\frac{a^2}{4} - r_2^2\right)} \cdot \nu, \quad (18)$$

Но не только величина скорости пара оказывает влияние на величину отводимого тепла, также на величину отводимого тепла оказывает влияние температура пара, которая изменяется по высоте из-за нагрева пара от стенок оболочки.

Распределение температуры можно получить с помощью формулы

$$T(z) = T_s + \frac{Q_\tau}{C_p \cdot G}, \qquad (19)$$

Необходимо учитывать, что подвод теплоты производится не по всей длине твэла, а только на участке контакта пара с оболочкой

$$T(z) = T_s + \frac{1}{C_p \cdot G}\left(\frac{0.066 \cdot Q_p \cdot \tau^{-0.2}}{2 \cdot n_{твс} \cdot \mathrm{n}_{твэл}}\left(1 + \frac{\sin\left(\frac{\pi z}{H_{эф}}\right)}{\sin\left(\frac{\pi \cdot \mathrm{H}}{2 \cdot H_{эф}}\right)}\right) - \right.$$

$$\left. - \frac{0.066 \cdot Q_p \cdot \tau^{-0.2}}{2 \cdot n_{твс} \cdot \mathrm{n}_{твэл}}\left(1 + \frac{\sin\left(\frac{\pi z}{H_{эф}}\right)}{\sin\left(\frac{\pi \cdot \mathrm{H}}{2 \cdot H_{эф}}\right)}\right)\right) \cdot \qquad (20)$$

где L– высота уровня теплоносителя.

Расчет времени, за которое происходит снижение уровня теплоносителя на заданную величину производился с помощью уравнения сохранения энергии.

$$E_{произ} = E_{потреб} \qquad (21)$$

Величину $E_{произ}$ можно найти через мощность тепловыделения и время:

$$E_{произ} = Q \cdot t = \frac{0.066 \cdot Q_p \cdot \tau^{-0.2}}{2 \cdot n_{твс} \cdot n_{твэл}}\left(1 + \frac{\sin\left(\frac{\pi H}{2} - L_1\right)}{\sin\left(\frac{\pi \cdot H}{2 \cdot H_{эф}}\right)}\right) \cdot t \qquad (22)$$

В уравнение мощности тепловыделения (17) было внесено некоторое изменение в аргумент синуса $\frac{\pi \cdot \frac{H}{2} - L_1}{H_{эф}}$, которое учитывает то, что подвод теплоты идущей на парообразование осуществляется только на участке высоты твэл, который непосредственно контактирует с теплоносителем. Данная подведенная теплота полностью идет на парообразование.

Для того чтобы испарить теплоноситель на высоту ΔL необходимо затратить определенное количество энергии. Это количество энергии равно:

$$E_{потреб} = \Delta L \cdot S \cdot \rho \cdot r, \qquad (23)$$

где ρ - плотность воды на линии насыщения;

r - скрытая теплота парообразования;

S - площадь, занимаемая теплоносителем.

Следовательно, время необходимое на испарение заданной высоты слоя теплоносителя будет равно:

$$t = \frac{\Delta L \cdot S \cdot \rho \cdot r}{\frac{0.066 \cdot Q_p \cdot \tau^{-0.2}}{2 \cdot n_{твс} \cdot \mathrm{n}_{твэл}}\left(1 + \frac{\sin\left(\pi \frac{\mathrm{H}}{2} - L_1\right)}{H_{эф}}\right)} \qquad (24)$$

Определенное по данной формуле время является не достаточно корректным, так как происходит непрерывное уменьшение уровня теплоносителя, что приводит к непрерывному уменьшению количества подводимой теплоты. Для более корректного определения времени испарения применялось усреднение двух значений времени, одно из которых получено при уровне теплоносителя соответствующему L+ΔL, а другое при уровне теплоносителя соответствующему L.

Заключение

Данная методика расчета температурного поля твэла позволяет проанализировать динамику изменения температуры оболочки твэла во времени с учетом резкого снижения уровня теплоносителя в активной зоне в условиях бурнопротекающей пароциркониевой реакции.

Позволит рассчитать временной запас для принятия необходимых действий для предотвращения аварии с расплавлением активной зоны, а в случае её минимизации последствий.

Список литературы

1. Клементьев М. Ф., Топоровский М. П. Теоретические основы теплотехники. -Ч. 2. Основы теории тепломасообмена: Учеб. пособие. – Севастополь: СИЯЭиП, 1997. - 278 с.
2. Кирилов П.Л. Терентьева М.И. Денискина Н.Б. Теплофизические свойства материалов ядерной техники. - М.: ИздАт, 2007. - 200с.
3. Шаповаленко В.В. «Теплогидравлический расчет ЯР»: СНУЯЭиП, 2011 -196с.

References

1. Clementyev M. F., Toporovsky M. P. Theoretical foundations of heat engineering. Part 2. Fundamentals of the theory of heat and mass transfer: Sevastopol, SUNEI, 1997. - 278 p.
2. Kirillov P. L. Terentyeva M. I. Deniskina N. B. Thermophysical properties of nuclear materials. - Moscow, 2007. – 200 p.
3. Shapovalenko V. V. Thermal hydraulic calculation of the nuclear reactor: Sevastopol, SUNEI, 2011-196 p.

УДК 621.039

Эволюция поиска решения в области выравнивания тепловыделений в ВВЭР

В.В.Шаповаленко
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33, г.Севастополь,299053, Россия, shapovalenkovita@rambler.ru

Статья поступила 30.01.2019 г.; после доработки 04.02.2019 г.

Аннотация

Дан обзор используемых в активных зонах материалов-поглотителей, рассмотрены особенности конструкционных элементов, с учетом используемого в них поглотителя и назначения.

Ключевые слова: уран-гадолиниевое топливо, уран-эрбиевое топливо, выгорающий поглотитель, неравномерность тепловыделений в активной зоне, реактор ВВЭР.

Evolution of the search for a solution in the field of heat generation equalization in the VVER

V.V. Shapovalenko
Sevastopol stat university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, shapovalenkovita@rambler.ru

Received 30.01.2019 y.; received in final form 04.02.2019 y.

Abstract

A review is given of the materials used in the active zones of the absorbers, considered the features of structural elements, taking into account the absorber used in them and purpose.

Keywords: uranium-gadolinium fuel, uranium-erbium fuel, burnable absorber, the thermal conductivity, VVER reactor.

Введение

В активных зонах ядерных реакторов, работающих на среднем тепловом спектре нейтронов для поглощения тепловых нейтронов с целью уменьшения неравномерности тепловыделений в ней, используются различные материалы поглотители, например, кадмий, гафний, европий, гадолиний, карбид бора, эрбий.

Значительная неравномерность тепловыделений в активной зоне реактора приводит к сложностям в управлении реакторной установкой.

К ограничениям тепловой нагрузки с поверхности тепловыделяющего элемента, являющимся главным барьером на пути выхода радиоактивных веществ в контур циркуляции теплоносителя.

Основной принцип выравнивания поля тепловыделений сводится к установке материалов-поглотителей в область с максимальным тепловым потоком.

Постановка цели и задачи

Задачами работы является обобщить направления поиска материалов-поглотителей с целью определения наиболее эффективного его применения для реализации выравнивания тепловыделений в объёме активной зоны реактора ВВЭР.

Этапы исследования

В таблице 1 представлены характеристики некоторых материалов – поглотителей, где (σ_a) - микроскопическое сечение поглощения тепловых нейтронов, Σа - макроскопическое сечение поглощения тепловых нейтронов.

Таблица 1. *Характеристики сечений поглощения материалов поглотителей [6]*

Элемент	Атомный вес	Тип реакции	Температура плавления, °С	Плотность, г/см^3	σ_a, барн	Σ_a, см$^{-1}$
Бор	10,81	(*n, a*)	2300	2,4	3840	568
Гафний	178,5	(*n, γ*)	2230	13,1	105	4,8
Европий	153	(*n, γ*)	900	5,22	4300	92,5
Гадолиний	157,26	(*n, γ*)	1311	7,95	46000	1390
Кадмий	112,41	(*n, γ*)	321	8,65	2450	118
Эрбий	167,27	(*n, γ*)	1550	9,1	173	5,7

Поглощающие материалы разделяют на две большие группы: резонансного (гафний, европий, диспрозий) и нерезонансного (материалы с изотопом ^{10}B) поглощения нейтронов.

По типу протекания ядерных реакций они подразделяются на (*n,* α) и (*n, γ*) поглотители. К (*n,* α) поглотителям относятся материалы на основе изотопа B, остальные поглощающие материалы относятся к (*n, γ*) поглотителям и характеризуются отсутствием газообразных продуктов деления.

Кроме того, поглощающие материалы разделяют на выгорающие (гадолиний, эрбий) — с уменьшением плотности поглощающих изотопов в процессе облучения и невыгорающие (европий, гафний, диспрозий) [5].

Применение стержней с выгорающим поглотителем

В первых проектах ВВЭР-1000 активная зона реактора загружалась серийными тепловыделяющими сборками, в которых для целей выравнивания тепловыделений использовалась конструкция, которая представляла собой пучок выгорающих поглотителей (СВП).

Конструкция СВП по своему конструктивному исполнению похожа на конструкцию органа регулирования системы управления и защиты (ОР СУЗ), однако в ней имеются отличия.

Пучок СВП состоит из головки, которая представляет собой втулку с отверстиями под 18 самовыгорающих элементов.

Стержни СВП закреплены в головке с помощью гаек и сварки. Устанавливаются СВП в направляющие каналы ТВС, которые не задействованы под перемещение в них ОР СУЗ.

Рис.1. Конструкция ОР СУЗ (слева) и СВП (справа)

Кроме того, имеются различие в конструкционных материалах между СВП и ПС СУЗ. Плотность бора в поглощающем материале, дибориде хрома, в СВП значительно меньше (используются три типа СВП с плотностями бора 0,02; 0,036; 0,05 т/м^3), чем в карбиде бора в ПС СУЗ. Оболочка СВП в отличие от оболочки ПС СУЗ изготовлена из сплава Zr + 1% Ni.

Эти отличия объясняются тем, что СВП должны на конец компании иметь минимально - возможное сечение поглощения нейтронов.

В процессе эксплуатации выявились значительные недостатки выравнивания энерговыделений в ТВС с помощью СВП.

Они были обусловлены ограниченностью вариации местоположения СВП из-за своей конструкции, кроме того в составе поглощающего материала имелся бор, который при взаимодействии с нейтроном испускает газообразные продукты деления, что приводит к увеличению внутреннего давления под оболочкой стержня и его деформации.

К вышеперечисленным недостаткам можно добавить еще один недостаток конструкции, а именно, при переработке ТВС требовалось извлечение из них СВП.

При модернизации конструкции ТВС с целью повышения её технико-экономических показателей и повышению уровня выгорания топлива полностью отказались от применения СВП, а для выравнивания тепловыделений в ТВС стали использовать тепловыделяющий элемент с

топливной композицией, содержащей не только топливо, но и выгорающий поглотитель гадолиний (твэг).

Тем более, что положительный пример их применения был отработан на зарубежных легководных реакторах PWR.

Применение тепловыделяющих элементов с уран-гадолиниевым топливом (Gd_2O_3 - UO_2)

По конструкции твэг идентичен конструкции тепловыделяющего элемента (рис.2), отличие составляет топливная композиция. Твэл состоит из циркониевой оболочки 2, заглушек (верхней - 1 и нижней - 5), набора топливных таблеток 4, пружинного фиксатора 3 и проставки 6.

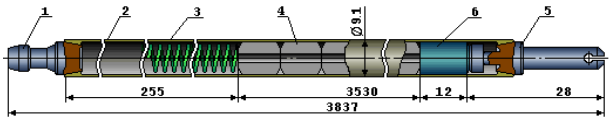

Рис.2 Конструкция тепловыделяющего элемента.

Рассматривались разные вариации по размещению гадолиния в топливной таблетке. Предлагалось разместить гадолиний в виде стержня в центральном отверстии топливной таблетки, использовать гадолиний непосредственно в составе самого топлива, как вариант использовать уран-гадолиниевое топливо с покрытиями, например, из нитрида бора.

Наиболее удачным является гомогенное размещение гадолиния в составе ядерного топлива, поскольку при таком размещении достигаются более высокие показатели выгорания топлива.

Преимуществами использования выгорающего поглотителя гадолиния в составе ядерного топлива в конструкции твэга являются:

- компенсация запаса реактивности в начальный момент загрузки ядерного топлива в активную зону, что позволяет снизить объём вводимой борной кислоты;
- сохранение водо-уранового отношения топливной решётки и более полное (чем при стержневых выгорающих поглотителях) выгорание топлива;
- возможность установки твэга в любую ячейку ТВС, в том числе под поглощающий стержень ОР СУЗ;
- возможность управления тепловыделением, мощностью и реактивностью ТВС при выгорании путём вариации местоположения, количества элементов и концентрации в них поглотителя;
- невозможность извлечения поглотителя без нарушения целостности ТВС, что повышает безопасность хранения свежего топлива;
- удержание поглотителя в топливной матрице при авариях;
- отсутствие дополнительных затрат на транспортировку и захоронение.

Недостатками использования уран-гадолиниевого топлива являются:

- увеличение неравномерности распределения энерговыделения в свежих ТВС в начальный период их работы;
- ограничение мощности твэла с уран-гадолиниевым топливом из-за меньшей теплопроводности топливной таблетки с интегрированным гадолинием. Из-за меньшей теплопроводности уран-гадолиниевого топлива обогащение топлива в стержнях по урану необходимо понижать, чтобы температура топлива не превышала заданного максимального предела;
- оксид гадолиния замещает урановое топливо, что приводит к уменьшению массы топливного элемента в тепловыделяющей сборке [1], [2], [6], [7], [8].

На сегодняшний день для ВВЭР разработано уран-гадолиниевое топливо, с обогащением по ^{235}U до 5%, в составе которого содержится от 5% до 8% гадолиния. В перспективе для реакторов ВВЭР-1200 и ВВЭР-ТОИ будет разработано топливо с обогащением по ^{235}U до 7%.

Применение тепловыделяющих элементов с уран-эрбиевым топливом (Er_2O_3 - UO_2)

Имеется положительный опыт использования уран-эрбиевого топлива, в кипящих канальных ядерных реакторах типа РБМК-1000.

Технология изготовления такого топлива сводилась к смешиванию с помощью вихревого смесителя диоксида урана (UO_2) и оксида эрбия (Er_2O_3) с последующим спеканием.

Содержание окиси эрбия в ядерном топливе составляет от 0,46 до 0,64 вес.% по эрбию при условной массовой доле ^{235}U в ядерном топливе от 2,6 до 2,8 вес.%.

Причем открытая пористость спрессованной и спеченной смеси двуокиси урана с добавкой окиси эрбия не превышает 1% [3], [4].

Недостатками уран-эрбиевого топлива являются технологическая сложность его изготов-

ления с повышением концентрации эрбия в топливе.

Кроме того, отмечается, что с повышением концентрации эрбия в топливе увеличивается его пористость, тем самым уменьшается его плотность, что также является недостатком.

Применение уран-эрбиевого топлива для данного типа реактора позволило решить ряд проблем: снижения парового коэффициента реактивности, выравнивания энерговыделения в активной зоне, снижение расхода топлива замедлило темп заполнения бассейнов выдержки и хранилища отработанным топливом, уменьшение максимальной линейной тепловой нагрузки на твэл соответственно привело к снижению количества негерметичных ТВС.

Поэтому положительный опыт использования уран-эрбиевого топлива было решено опробовать для выравнивания энерговыделений в активной зоне новых проектов ВВЭР, таких как ВВЭР-1200 и ВВЭР-ТОИ с электричесткой мощностью 1300 МВт.

Переход от уран-гадолиниевого топлива продиктован не только возможностью достичь равномерного распределения тепловыделений как по высоте, так и по радиусу активной зоны, но и желании увеличить длительность топливной кампании с 12 месяцев до 24 месяцев.

В этом случае, эрбий имеет некоторые преимущества, потому что он не так быстро выгорает, как гадолиний, и улучшает характеристики безопасности в начальный момент топливного цикла.

Однако из-за меньшей концентрации эрбия в ядерном топливе потребуется большая по массе загрузка эрбия в активную зону реактора, вследствие чего предлагается использовать в каждом твэле профилированное уран-эрбиевое топливо с различными вариациями по содержанию в топливе поглотителя-эрбия и обогащения по урану.

Для реакторов ВВЭР-1200, ВВЭР-1300 предполагается разработка уран-эрбиевого топлива с обогащением по ^{235}U более 5%.

На данное топливо возлагаются большие надежды в повышении эффективности топливоиспользования.

Положительный опыт эксплуатации данного топлива в ТВС на российских реакторах типа ВВЭР может быть реализован в конструкции ТВС-Квадрат, разработанной российскими конструкторами для эксплуатации в зарубежных легководных реакторах PWR.

Заключение

Обобщен опыт применения выгорающих материалов в активной зоне ядерного реактора в АЭС с реакторами типа ВВЭР, проведен анализ влияния поглощающих материалов на нейтронное поле.

Обозначены основные направления и способы достижения выравнивания энерговыделений в активной зоне реактора, а также проблемы, с которыми приходится сталкиваться для решения данной задачи.

Исследованный материал по использованию поглощающих материалов в активных зонах ядерных реакторов позволяет проанализировать имеющийся опыт, оценить достоинства и недостатки каждого из направлений и выделить из него наиболее эффективные.

Список литературы

1. Горский И.В. Уран-гадолиниевое окисное топливо.Ч.1- Основные свойства Gd_2O_3 и UO_2+Gd_2O_3. /Атомная техника за рубежом, 1989. – Вып. 2 - С. 3-11.
2. Горский И.В. Уран-гадолиниевое окисное топливо.Ч.2-Теплофизические свойства UO_2+Gd_2O_3 и методы их измерения /Атомная техника за рубежом, 1989. – Вып .4 – С. 6-15.
3. Межуев В.А. и др. Некоторые аспекты конструкции и технологии изготовления ТВС энергетических реакторов с увеличенным ресурсом и повышенной надежностью, Атомная энергия, т. 84, вып. 2, февраль 1998, с. 126, 127
4. Давахра Саду. Использование выгорающих поглотителей в реакторах типа ВВЭР: Дис. канд.тех.наук: 05.14.03 Москва, 2006 13с.
5. Габараев Б.А., Смирнов Ю.Б., Черепнин Ю.С. Атомная энергетика 21 века. – М.:Издательский дом МЭИ, 2013.- С.54, 55 .
6. Кириллов П.Л., Терентьева М.И., Денискина Н.Б. Теплофизические свойства материалов ядерной техники.М:ИздАт, 2007.- С. 145-151.
7. M. Schlieck Technical note Optimized. Gadolinia concepts for advanced in-core fuel management in PWRs. / M. Schlieck, H.D. Berger, A. Neufert// Nuclear Engineering and Design 205. – 2001. - P.191–198.
8. S.G.Popov Thermodynamic analysis of uranium-gadolinium fuel stability at high temperatures / S.G.Popov, V.N.Proselkov, V.A.Lysenko // Atomic Energy. - 2011.- Vol. 110, No. 4. –P.188–194.

References

1. Gorsky, I. V. Uranium-gadolinium oxide fuel.P.1 - Basic properties of Gd2O3 and UO2+Gd2O3./ Atomnaya tekhnika za rubezhom . – 1989. - Issue No. 2. - P . 3-11.

2. Gorsky, I. V., Uranium-gadolinium oxide fuel. P.2-Thermal properties of UO2+Gd2O3 and methods of measurement/ Atomnaya tekhnika za rubezhom . – 1989. - Issue No. 4. – P. 6-15.
3. Mezhuyev V.A. Some aspects of the design and manufacturing technology of fuel assemblies of power reactors with increased resource and increased reliability. Atomic energy, vol. 84, issue. 2, February 1998, P. 126, 127.
4. Dawahra Sadu. Use burnable absorbers in VVER reactors: the Dissertation: 05.14.03 Moscow, 2006 13 p.
5. Gabaraev B. A., Smirnov Yu. b., Cherepnin Yu. s. Nuclear energy in the 21 century. – M.: MEI, 2013.- P. 54-55 .
6. Kirillov P. L., Terentyeva M. I., Deniskina N. B. Thermophysical properties of nuclear materials.M: PEI, 2007.- P. 145-151.
7. M. Schlieck Technical note Optimized. Gadolinia concepts for advanced in-core fuel management in PWRs. / M. Schlieck, H.D. Berger, A. Neufert// Nuclear Engineering and Design 205. – 2001. - P.191–198.
8. S.G.Popov Thermodynamic analysis of uranium-gadolinium fuel stability at high temperatures / S.G.Popov, V.N.Proselkov, V.A.Lysenko // Atomic Energy. - 2011.- Vol. 110, No. 4. –P.188–194.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ

УДК 621.039.58:681.518

Влияние надежности технических средств информационных и управляющих систем энергоблоков на безопасность эксплуатации АЭС

Н.И. Кузнецова[1], В.А. Нурзай[2]
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33, г. Севастополь, 299053, Россия. [1]*nika100452@gmail.com,* [2]*Mengsk777@yandex.ru*

Статья поступила 21.01.2019 г.; после доработки 23.01.2019 г.

Аннотация

Выполнен анализ надежности технических средств информационных и управляющих систем (ИУС) и оценено их влияние на безопасность эксплуатации АЭС. Рассмотрены относящиеся к этим системам проблемы эксплуатации с позиции надежности и приведены основные показатели надежности ИУС. Рассмотрена функциональная надежность и отказы ИУС по общей причине. Проанализировано взаимодействие ИУС с внешней средой в контексте взаимосвязи ИУС и безопасности АЭС.

Ключевые слова: информационные и управляющие системы (ИУС), надежность ИУС, безопасность АЭС.

Influence of reliability of technical means of information and control systems of power units for safety NPP operation

N.I. Kuznetsova[1], V.A. Nurzai[2]
Sevastopol state university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, [1]*nika100452@gmail.com,* [2]*Mengsk777@yandex.ru*

Received 21.01.2019 y.; received in final form 23.01.2019 y.

Abstract

The reliability analysis of technical means of information and control systems (ICS) was performed and their impact on the safety of NPP operation was evaluated. The problems of operation related to these systems are considered from the position of reliability, and the main indicators of the reliability of ICS are given. The functional reliability and failures of ICS for a common reason are considered. The interaction of ICS with the external environment is analyzed in the context of the interrelation of ICS and NPP safety.

Keywords: information and control systems (ICS), ICS reliability, NPP safety.

Введение

С самого начала строительства АЭС установилась проблематика влияния информационных и управляющих систем (ИУС) на надежность работы энергоблока в целом.

В статье рассматривается связь технических средств ИУС и их надежности, так как подобные системы влияют на безопасность эксплуатации атомной станции, а установленные требования к надежности определяют построение, функции и, соответственно, технические характеристики ИУС.

С позиций сегодняшнего дня основными недостатками информационных и управляющих систем (ИУС) блоков ВВЭР-1000 АЭС являлись:

- малая надежность технических средств автоматизации;
- невозможность полной диагностики технического и программного обеспечения;
- опасность возникновения возгораний;
- невыполнение требований сейсмоустойчивости;
- усложнение систем информационной поддержки обслуживающего персонала;
- громоздкость и территориальная распределенность оборудования, что требует значительных трудовых и временных затрат обслуживающего персонала;
- отсутствие унификации элементной базы и технических решений для разных ИУС, даже аналогичного назначения, в пределах одного блока;
- физическое старение некоторых компонентов и т.д.

В связи с постоянным ростом роли атомной энергетики в нашей стране и в мире проблема надежности и безопасности производства становиться все более актуальной. Вопрос обеспечения надежности и безопасной эксплуатации блоков АЭС не теряет своей актуальности, как на территории России, так и за рубежом, в то время, как РФ возводит энергоблоки в Турции, Иране, Бангладеш и других дружественных странах [1].

Постановка цели научной работы

Целью данной научной работы является анализ надежности технических средств информационных и управляющих систем (ИУС), а также влияние надежности на такой важнейший параметр, как безопасность эксплуатации атомных электростанций (АЭС).

Показатели надежности ИУС

Надежностью ИУС называется свойство системы сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность системы осуществлять необходимые функции во всех задаваемых режимах и возможных условиях эксплуатации.

Нормативная база в области надежности представляет собой ряд международных и межгосударственных стандартов [2,3].

Согласно стандартам РФ надежность является комплексным свойством, которое включает *безотказность, ремонтопригодность, долговечность* и *сохраняемость*. Как же трактуют нормативные документы эти понятия?

Безотказность - это свойство системы сохранять работоспособность в течение требуемого интервала времени непрерывно без вынужденных перерывов.

Ремонтопригодность – свойство системы, заключающееся в ее приспособленности к предупреждению, обнаружению и устранению причин возникновения отказов, а также поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем проведения технического обслуживания и ремонтов.

Долговечность - свойство системы сохранять работоспособность до наступления предельного состояния с необходимыми перерывами для технического обслуживания и ремонтов.

Сохраняемость - свойство системы сохранять значения показателей безотказности и ремонтопригодности в течение (и после) срока хранения и транспортировки.

Но, в настоящее время, существует отличие в трактовке понятия надежность по международным стандартам. В соответствии с этими стандартами [4], надежность - комплексное свойство, применяемое для описания параметра *готовности* и влияющих на него свойств *безотказности, ремонтопригодности и обеспеченности технического обслуживания и ремонта,* то есть в отличие от принятого в РФ термина акцентируется внимание на свойстве готовности и не охватывает свойств долговечности и сохраняемости.

Функциональная надежность и отказы информационных и управляющих систем

Главное значение для безопасности имеет надежность выполнения основных информационных и управляющих функций системы (функциональная надежность).

Она определяется только расчетным путем на основании данных о надежности компонентов ИУС, которые могут быть получены экспериментально или по результатам аналогичных изделий.

Конечно, достоверность расчетов зависит от полноты и корректности требований к надежности технических средств, а также от объективности и обоснованности данных, подтверждающих соответствие изделий этим требованиям.

Поэтому показатели надежности должны устанавливаться в техническом задании таким образом, чтобы по ним можно было рассчитывать функциональную надежность системы в целом.

Основываясь на этом, рекомендуется нормировать список функциональных возможностей, для которых будут нормированы показатели надежности технических средств, номенклатуру показателей, критерии возможных отказов и предельно допускаемые значения безотказности и ремонтопригодности для каждой функции.

Спецификой проблемы безопасности ИУС является то, что обеспечение и оценка безопасности должны последовательно проводиться на разных этапах жизненного цикла ИУС, в том числе на стадиях, предшествующих функционированию в замкнутой системе.

Отсюда следуют основные направления системного подхода:

- ИУС во взаимодействии с технологическим оборудованием и иными компонентами внешней среды, где под внешней средой понимается все то, что окружает ИУС и оказывает на нее воздействие или подвергается от нее воздействию;
- ИУС на различных стадиях ее жизненного цикла;
- ИУС как совокупность технических средств и программного обеспечения, взаимодействующих между собой.

Рассмотрим взаимодействие ИУС с внешней средой. Выбор компонентов внешней среды ИУС определяется рассматриваемой проблемой – взаимосвязью ИУС с безопасностью АЭС. Исходя из этого, из всего набора компонентов внешней среды выбраны следующие (рис. 1):

- управляемое (контролируемое) технологическое оборудование;
- персонал АЭС (оперативный – осуществляющий управление блоком; ремонтный – выполняющий техническое обслуживание и восстановление после отказов; административный – передающий и следящий за исполнением распоряжений Регулирующего органа и Энергокомпании оперативным и ремонтным персоналом);
- вспомогательные системы, обеспечивающие работоспособность (снабжение ИУС электроэнергией, вентилирование, обеспечение требуемых параметров воздуха и рабочих сред и т.п.);
- смежные ИУС блока, связанные с рассматриваемой системой на аппаратном и программном уровне;
- помещения для установки технических средств ИУС, которые могут подвергаться опасным воздействиям, среди которых: разрывы трубопроводов, внутреннее затопление, задымление, ударные воздействия, взрывы или пожары;
- аварийный центр АЭС (также называемый - центр ликвидации аварии или центр технической поддержки);
- внешняя среда вокруг энергоблока, может быть подвержена таким воздействиям, как землетрясения, экстремальные климатические условия, выходящие за рамки регламентных, наводнения, лесные пожары;
- население вне площадки АЭС;
- вышестоящая по отношению к АЭС организация (например, Энергокомпания).

На рис. 1 показаны наиболее существенные взаимосвязи между ИУС и компонентами внешней среды, а также взаимосвязи указанных компонент между собой. Сплошными линиями обозначены связи, существующие при всех состояниях энергоблока, штриховыми линиями - имеющие место только при аварийных ситуациях и авариях.

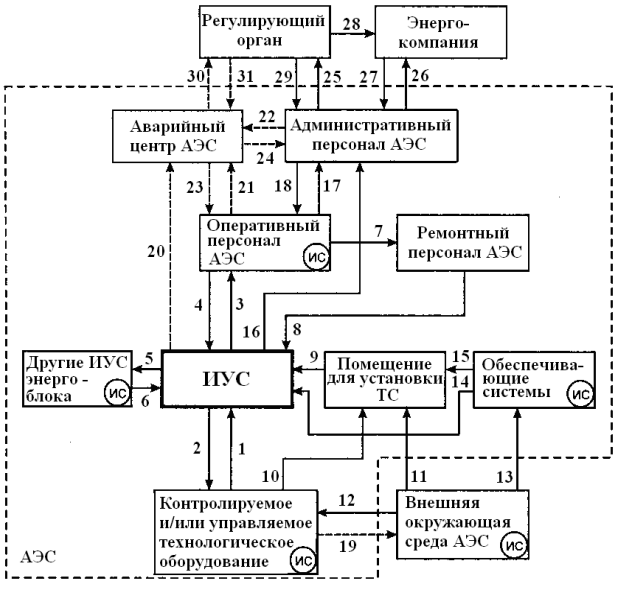

Рис. 1. Взаимодействие ИУС и внешней среды

Связи на рис. 1 пронумерованы следующим образом:

1 - информация о состоянии технологического оборудования, поступающая в ИУС и необходимая для выработки управляющих воздействий во всех режимах работы АЭС (из-

меряемые технологические параметры);

2 - управляющие воздействия на технологическое оборудование от управляющей системы. Эти воздействия определяются функциями безопасности, выполняемыми ИУС. Кроме полезных управляющих воздействий, по этой связи могут поступать и ошибочные воздействия на технологическое оборудование вследствие отказов ИУС;

3 - информация о состоянии технологической системы и ИУС, поступающая к оперативному персоналу;

4 - управляющие воздействия оперативного персонала на управляющую систему (задания, настройки, команды дистанционного управления и т.п.). Кроме полезных воздействий, по этой связи, в принципе, могут поступать и ошибочные действия персонала, включая воздействия вследствие несанкционированного доступа персонала к техническим и программным средствам;

5, 6 - обмен информацией с другими ИУС энергоблока;

7 - заявки ремонтному персоналу на восстановление системы в случае отказа;

8 - исполнение ремонтным персоналом заявок на восстановление системы, выполнение им технического обслуживания; как и для связи **4,** связи **8** могут соответствовать и ошибочные действия ремонтного персонала по восстановлению, включая несанкционированные воздействия;

9 - воздействия на ИУС, передаваемые через помещения, где установлены технические средства (электромагнитные воздействия, вибрация, температурные сейсмические воздействия и др.);

10 - воздействия технологического оборудования на помещение, где установлены технические средства (электромагнитные воздействия, вибрация и др.);

11-13 - воздействия внешней окружающей среды АЭС соответственно на помещения для установки технических средств (ТС), на контролируемое (управляемое) технологическое оборудование, на обеспечивающие технологические системы (например, сейсмические воздействия);

14 - воздействия обеспечивающих технологических систем непосредственно на ИУС (например, электроснабжение);

15 - воздействия обеспечивающих технологических систем на помещение, где установлены ТС (кондиционирование, вентиляция и др.);

16, 17 - информация о параметрах, характеризующих безопасность блока, поступающая административному персоналу АЭС непосредственно от ИУС (связь **16)** или от оперативного персонала (связь 17);

18 - распоряжения оперативному персоналу от административного персонала;

19 - воздействие технологического оборудования на внешнюю окружающую среду АЭС в случае аварии;

20-22 - информация о параметрах, характеризующих безопасность, поступающая в случае аварии в аварийный центр непосредственно от ИУС (связь **20),** от оперативного персонала (связь **21)** и от административного персонала АЭС (связь **22**);

23, 24 - управляющие воздействия в случае аварии от аварийного центра, поступающие оперативному (связь **23)** и административному (связь **24)** персоналу АЭС;

25, 26 - сведения, характеризующие безопасность блока, поступающие от административного персонала АЭС в Регулирующий орган (связь **25)** и в Энергокомпанию (связь **26)** (например, отчеты о нарушениях, сведения о корректирующих мероприятиях в результате расследований нарушений и др.);

Регулирующий орган, включая кризисный (аварийный) центр, предназначен для выработки рекомендаций персоналу АЭС при аварийных ситуациях и авариях.

27 - циркуляры, распоряжения, касающиеся безопасности и поступающие административному персоналу АЭС от Энергокомпании;

28, 29 - циркуляры, распоряжения Регулирующего органа, передаваемые в Энергокомпанию (связь **28)** или непосредственно на АЭС (например, выдача/изъятие Регулирующим органом лицензий или временных разрешений на эксплуатацию) (связь **29**);

30 - информация, поступающая в случае аварии от аварийного центра в Регулирующий орган (например, в кризисный или аварийный центр Регулирующего органа);

31 - рекомендации, поступающие от кризисного центра Регулирующего органа в аварийный центр АЭС.

На рис. 1 знаком (ИС) отмечены те компоненты внешней среды, которые могут быть источником исходных событий:

- внешняя окружающая среда (например, сейсмические воздействия);
- технологическое оборудование (отказы);
- оперативный персонал (ошибки);
- другие ИУС энергоблока (отказы);

- обеспечивающие системы (отказы).

Указанные взаимосвязи с компонентами внешней среды ИУС в той или иной степени существенны для задания требований к ИУС, обеспечения выполнения этих требований при создании и эксплуатации ИУС, государственного регулирования безопасности по вопросам, связанным с ИУС.

Взаимосвязи, подлежащие учету в каждом конкретном случае, определяются:

- назначением рассматриваемой системы;
- решаемой задачей;
- стадией жизненного цикла системы.

При выполнении данного анализа надежности и безопасности ИУС необходимо учесть основное понятие надежности - понятие отказа.

Отказом ИУС называется событие, заключающееся в нарушении хотя бы одного из требований к качеству функционирования системы, установленных в нормативно-технической и/или конструкторской документации.

Надежность (а также, безотказность и ремонтопригодность) ИУС связана со способностью системы выполнять требуемые функции. Таким образом, становится естественной декомпозиция ИУС как многофункциональной системы по отдельным выполняемым функциям.

В частности, **отказ функции ИУС – с**обытие, заключающееся в нарушении хотя бы параметров энергоблока.

При установлении показателей надежности ИУС, их функционал следует детерминировать исходя из двух признаков: временной режим выполнения и сложность.

По уровню сложности функции ИУС можно разделить на простые и составные.

Под *простыми* следует понимать функции, которые невозможно разложить на составляющие.

Составные функции можно подвергнуть структурной декомпозиции до некоторой совокупности простых или составных подфункций, объединенных общей целью, ролью в управленческом процессе, конструктивными, информативными или другими признаками.

В качестве примера простых функций можно привести: измерение или регистрацию и сигнализацию одного технологического параметра, соответствующее автоматическое регулирование или дистанционное управление заданным параметром.

Составными функциями являются, к примеру, автоматическое регулирование или контроль групп параметров энергоблока.

В соответствии с временным режимом выполнения, функции подразделяются на непрерывные и дискретные.

Непрерывные функции должны выполняться постоянно при функционирующем энергоблоке, а некоторые функции информационного характера, и при остановленном блоке.

Для их выполнения требуется безотказная работа блоков, участвующих в аппаратной реализации функции, в течение всего времени, с учетом резервирования.

Примером непрерывной функции может служить контроль или автоматическое регулирование различных технологических параметров.

Дискретные функции состоят в осуществлении по запланированным или случайным во времени вызовам, групп процедур, реализующих определенные операции с заданной последовательностью.

Выполнение процедур, требует безотказной работы всех элементов системы, находящихся до этого в горячем или холодном резерве, а также в ждущем режиме, в соответствующие короткие временные интервалы.

Примерами таких функций являются аварийная защита и иные функции управляющих систем безопасности.

Рассмотрим одни из наиболее опасных для безопасности АЭС виды отказов ИУС - отказы по общей причине.

Под **отказами по общей причине** (ОПП) понимаются одновременные отказы нескольких важных для безопасности систем, возникшие вследствие одной причины (одного отказа, ошибки персонала, внутреннего или внешнего воздействия).

Источники отказов по общей причине - ОПП из-за воздействий внешней среды на ИУС и ОПП из-за систематических отказов, вызванных ошибками при создании системы.

Источниками ОПП могут быть:

- обеспечивающие технологические системы, когда воздействиями являются отказы кондиционеров или центральных систем вентиляции, приводящие к повышению температуры и влажности в помещениях, где установлены ИУС, а также отказы источников энергоснабжения, приводящие к нарушениям параметров электропитания;
- технологические линии трубопроводов, когда воздействиями могут являться разрывы трубопроводов или мощные электромагнитные воздействия при включении электродвигателей;

- окружающая среда, опасными воздействиями которой могут являться аномальные природные явления (землетрясения, удары молний и др.);
- помещение для установки ИУС (заливание водой);
- отказы элементов ИУС;
- оперативный и ремонтный персонал, неправильно действующий при эксплуатации или при техническом обслуживании.

ООП из-за ошибок при создании системы могут появиться на различных этапах создания, но в первую очередь причинами их могут быть ошибки в технических заданиях на ИУС, ПТК и в спецификации ПО.

Кроме того, следует отметить возможные ошибки при разработке ПО, и особенно часто – вновь разрабатываемого прикладного ПО и недостаточно полной его верификации.

Верификация программного обеспечения – важная составляющая процесса создания ПО ИУС.

Верификация ПО определяется как процесс доказательства соответствия результатов, полученных на определенной стадии разработки ПО, с требованиями, установленными на предыдущей стадии.

ООП в ИУС (аналоговых и цифровых) являются одним из наиболее существенных факторов, влияющих на безопасность АЭС.

Поэтому в ИУС должны быть предусмотрены необходимые методы предупреждения и защиты от отказов по общей причине.

Все эти методы можно разделить на две группы: методы, реализуемые вне системы (например, повышение надежности обеспечивающих технологических систем) и методы, реализуемые в самой системе, которые и рассматриваются ниже.

Основными методами защиты от ООП являются:

- различные виды разнообразия (диверсности) - разнообразие технических средств, программного обеспечения, функций, направленных на предотвращение ООП из-за ошибок при проектировании;
- независимость, направленная на предотвращение ООП из-за внешних воздействий, а также ошибок персонала при эксплуатации и техническом обслуживании;
- обеспечение стойкости технических средств к внешним воздействующим факторам (например, повышению температуры в помещениях), стойкости к изменению параметров электроснабжения, электромагнитной совместимости;
- защита от несанкционированного доступа;
- предотвращение дефектов ПО использованием формальных методов и инструментальных средств разработки ПО, методов и приемов программирования, верификации ПО, в частности – независимой верификации.

Отказы по общей причине являются опасными, но редкими событиями. Для сбора достоверной информации по ООП необходим значительный объем статистических данных. Для сбора этих данных существует проект “Международный обмен данными об отказах по общей причине” (International Common Cause Data Exchange - ICDE), где участвуют Великобритания, Германия, Канада, Франция, США и др., но отсутствует Россия.

Поиск места возникновения отказа и определение его причины является основной задачей технического диагностирования. Основная цель, которого, упростить и ускорить восстановление, а в идеале предупредить нарушение работоспособности или правильности функционирования объекта, тем самым уменьшить время пребывания в дефиците безопасности.

Чаще всего эта задача решается автоматически, с помощью встроенных средств диагностирования, непосредственно после обнаружения дефекта (при контроле технического состояния после включения) или отказа (в процессе непрерывного или периодического контроля). При обнаружении дефекта или отказа средства технического диагностирования должны автоматически формировать сигнал тревоги и выдавать диагностическое сообщение, содержащее сведения о месте возникновения и характере обнаруженных дефектов (отказов). В случае одновременного обнаружения нескольких отказов диагностическое сообщение должно содержать данные обо всех дефектах (отказах). Необходимо, чтобы диагностические сообщения получал непосредственно эксплуатационный персонал цеха тепловой автоматики и измерений, отвечающий за техническое состояние ИУС.

Глубина поиска определяется указанием составной части объекта диагностирования, с точностью до которой определяется место возникновения дефекта или отказа. Достаточным считается обнаружение отказавшей сменной составной части объекта, однако такая глубина поиска не всегда обеспечивается в действующих ИУС и поиск осуществляется с глубиной

от одного до нескольких сменных блоков, так что для принятия окончательного решения о месте возникновения отказа может потребоваться участие человека.

Следует иметь в виду, что время восстановления существенно зависит и от других факторов, в том числе нетехнического характера, поэтому автоматический поиск с помощью встроенных средств диагностирования оказывает хотя и важное, но не решающее влияние на повышение ремонтопригодности.

Поиск места возникновения и определение причины или характера отказа представляет более сложную задачу, чем его обнаружение, и требует получения и обработки большего объёма данных. Например, в структуре, функционирования резервированных каналов по мажоритарному принципу «два из трех», глубина поиска ограничивается определением отказавшего канала, который, как правило, состоит из нескольких сменных составных частей (блоков, модулей). Между тем, использование современных информационных технологий позволяет увеличить глубину поиска.

В этом отношении перспективна структура, показанная на рис. 2: малая стоимость однокристальных микроЭВМ позволяет применять их в каждой сменной составной части объекта диагностирования, при этом задачи обнаружения отказа и поиска отказавшей сменной составной части становятся идентичными.

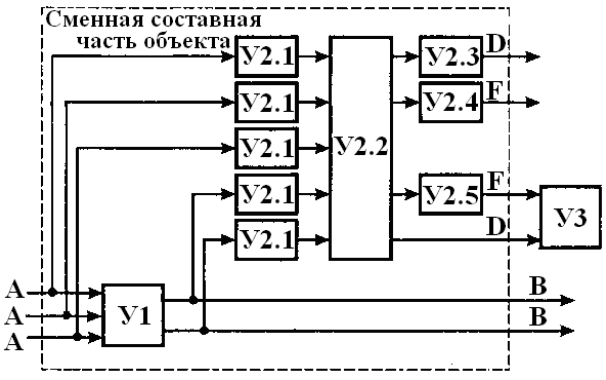

Рис. 2. Контроль функционирования составных частей

У1 - компоненты, реализующие основные функции объекта; У2 - встроенные средства технического диагностирования: У2.1 - элементы разделения и преобразования в цифровую форму; У2.2 - однокристальная микроЭВМ; У2.3 - элемент сигнализации; У2.4 - средства отображения; У2.5 - контроллер связи; У3 - внешние средства технического диагностирования; *A* - входные сигналы (рабочие воздействия на объект диагностирования); *B*- выходные сигналы объекта диагностирования; *D*- тревожные сообщения для оператора; *F*- диагностические сообщения

Дальнейшее увеличение глубины поиска, вообще говоря, неактуально для пользователя, поскольку восстановление объекта диагностирования обычно ограничивается заменой отказавшей сменной составной части на новую, взятую из комплекта ЗИП, тогда как последующий ремонт отказавших составных частей на предприятии, эксплуатирующем сложную технику практически невозможен или экономически нецелесообразен.

Вместе с тем, для изготовителей, которые производят ремонт отказавших сменных составных частей, увеличение глубины поиска может оказаться полезным, способствуя, например, выявлению отказов по общей причине, связанных с качеством покупных комплектующих изделий.

Это может быть реализовано в структуре, показанной на рис. 2: при обнаружении несоответствия между фактическими состояниями выходов и состояниями, соответствующими правильному функционированию, однокристальная микро-ЭВМ переходит к выполнению программы, которая анализирует это несоответствие, определяет код причины отказа и выдаёт диагностическое сообщение, позволяющее установить вероятное место возникновения и характер отказа с глубиной до одного или нескольких элементов диагностируемой сменной составной части.

Результаты технического диагностирования должны автоматически архивироваться, отображаться (непрерывно или по вызову персонала) и регистрироваться в форме протоколов или отчётов. Форма представления диагностических сообщений должна быть удобной для восприятия и позволять эксплуатационному персоналу в любой момент времени быстро и безошибочно установить вид технического состояния объекта диагностирования, время, место возникновения и характер обнаруженных дефектов и отказов, а также время их устранения (восстановления работоспособного состояния объекта).

Следовательно, можно утверждать, что в настоящее время невозможно регламентировать общие требования к таким показателям и характеристикам технического диагностирования, как диагностика технического и программного обеспечения ИУС, в связи с имеющейся громоздкостью ИУС и различием технических решений и элементной базы для различных ИУС, даже дублирующего назначения, в пределах одного блока.

Выполненный анализ позволяет не только рассмотреть связь ИУС и безопасности АЭС в

целом, но и показывает, как ИУС влияют на безопасность станции.

Заключение

В ходе работы произведено исследование надежности технических средств информационных и управляющих систем ИУС и оценено соответствующее влияние надежности на безопасность эксплуатации АЭС.

1) Приведены, показатели надежности ИУС, влияющие на безопасность, прописаны требования к ИУС и их составным компонентам.

Рассмотрена функциональная надежность и отказы ИУС. Установлено, что спецификой проблемы безопасности ИУС является то, что обеспечение и оценка безопасности должны последовательно проводиться на разных этапах жизненного цикла ИУС, в том числе на стадиях, предшествующих функционированию в замкнутой системе.

Проанализировано взаимодействие ИУС с внешней средой. Выполнен выбор компонентов внешней среды ИУС в соответствии с рассматриваемой проблемой - взаимосвязью ИУС с безопасностью АЭС.

Список литературы

1. Ястребенецкий М.А., Васильченко С.В., Виноградская С.В. и др. Безопасность атомных станций: Информационные и управляющие системы. Под ред. М.А.Ястребенецкого - К.: Техніка, 2004, 472с., ил.
2. ГОСТ26291-84. Надежность атомных станций и их оборудования. Общие положения и номенклатура показателей. М.: Издательство стандартов. 1987.
3. ГОСТ24.701-86.: Надежность автоматизированных систем управления. Общие положения. М.: Издательство стандартов. 1986.
4. РМ 25.850-87. Автоматизированные системы управления технологическими процессами атомных электростанций. Надежность. Общие требования.- Минприбор, 1987.

References

1. YAstrebeneckij M.A., Vasil'chenko S.V., Vinogradskaya S.V. *Bezopasnost' atomnyh stancij: Informacionnye i upravlyayushchie sistemy* [Safety of Nuclear Power Plants: information and control systems]. Edited by M.A. Yastrebenetskij – K.: Technika Publ., 2004, 472p., ill.
2. GOST26291-84. *Nadezhnost' atomnyh stancij i ih oborudovaniya. Obshchie polozheniya i nomenklatura pokazatelej.* [Reliability of atomic power stations and their equipment. General statements and reliability index nomenclature]. Moscow, Standards Publ., 1987, 15p.
3. GOST24.701-86.: Nadezhnost avtomatizirovannykh sistem upravleniia. Obshchie polozheniia. [Reliability of automated control systems. General provisions]. Moscow, Standards Publ., 1986.
4. RM 25.850-87. A*vtomatizirovannye sistemy upravleniya tekhnologicheskimi processami atomnyh-ehlektrostancij. Nadezhnost. Obshchie trebovaniya.* [Automated process control systems for nuclear power plants. Reliability. General requirements]. Ministry of IE, 1987.

УДК 681.2/4:535.317.7

Погрешности оптического канала измерения вибрации

В.А. Нурзай[1], Ю.М. Быковский[2], Н.И. Кузнецова[3]
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33, г. Севастополь, 299053, Россия. [1]y.bykovsky@mail.ru, [1]Mengsk777@yandex.ru, [1]nika100452@gmail.com

Статья поступила 28.01.2019 г.; после доработки 31.01.2019 г.

Аннотация

В статье затрагиваются вопросы влияния различных погрешностей измерения на применимость разрабатываемого метода оптического мониторинга вибросостояния протяженных объектов. В этом плане составлен перечень всех возникающих погрешностей измерений и рассмотрены погрешности метода, возникающие из-за несовершенства поверхности вибрирующего объекта, аберраций оптической системы, погрешностей вносимых ПЗС матрицей фотоаппарата и кодировкой оцифрованного изображения.

Ключевые слова: погрешность измерения, оптический канал, измерение вибрации.

Errors of the optical channel of vibration measurement

V.A. Nurzai[1], Ju.M. Bykovsky[2], N.I. Kuznetsova[3]
Sevastopol state university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, [1]y.bykovsky@mail.ru, [1]Mengsk777@yandex.ru, [1]nika100452@gmail.com

Received 21.01.2019 y.; received in final form 21.01.2019 y.

Abstract

The article raises issues of influence of various measurement errors on the applicability of the developed method, the optical monitoring of vibration of extended objects. Compiled a list of all arising measurement errors. Considered error of method, arising from the imperfection of the surface of the vibrating object, the optical system aberrations, errors introduced by the CCD camera, and by coding digitized image.

Keywords: measurement error, an optical channel, vibration measurement.

Введение

Технологические процессы на производствах зачастую сопровождаются вредным вибрационным воздействием, что может приводить к выходу из строя оборудования и оказывать негативное влияние на качество изготавливаемой продукции [1]. В связи с этим обнаружение и фиксация вибрации на производствах являются актуальными вопросами современной науки.

Рассматривается вибрация оборудования и конструкций, принимающих участие в различных производственных процессах.

В рамках решения поставленной задачи [2] нахождения и фиксации изменений вибрационных признаков, предложено применить оптический безлазерный метод, при котором используется видеокамера, в поле зрения которой находится множество вибрирующих объектов.

Разрабатываемый оптический метод измерения параметров вибрации предусматривает наличие оптической системы, специализированного освещения и объектов вибрации с различными свойствами отражающей поверхности.

Метод косвенных измерений, как и система передачи и обработки данных подразумевают неизбежное наличие погрешностей, которые негативно влияют на результаты.

Постановка цели научной работы

Целью научной работы является выявление

погрешностей метода, вносимых разрабатываемым каналом измерения в расчет параметров вибрации.

В рамках решения задачи в статье рассмотрены погрешности метода, возникающие из-за несовершенства поверхности вибрирующего объекта, аберраций оптической системы, погрешностей вносимых ПЗС матрицей фотоаппарата и кодировкой оцифрованного изображения.

Погрешности канала измерения

Разрабатываемый метод оптического мониторинга вибросостояния оборудования предусматривает периодическое измерение таких вибрационных параметров, как: частота вибрации, текущее положение и размах колебаний и виброскорость.

Составлен список причин, вызывающих появление погрешностей в расчете данных параметров:

1. Несовершенство и непостоянство отражающих свойств поверхности вибрирующего оборудования.
2. Аберрации оптической системы.
3. Погрешности ПЗС матрицы (шум матрицы) и ошибки в канале чтения информации с ПЗС.
4. Погрешности кодировки изображения.
5. Погрешности в определении координаты и скорости движения, вызванные временем экспонирования и временем кадра.
6. Погрешности, вызванные сочетанием параметров: геометрический размер объекта и расстояние до него. Так же на результат влияют различные геометрические формы поверхностей.
7. Погрешности, вызванные несовершенством геометрической модели: неизвестен точный размер пикселя, точное расположение матрицы в фотоаппарате.
8. Погрешность в определении частоты, вызванная количеством рассматриваемых кадров процесса колебаний.

В рамках данной статьи рассмотрим первые четыре пункта более подробно.

Несовершенство и непостоянство отражающих свойств поверхности вибрирующего оборудования

В масштабах производств и предприятий, рассматриваемые вибрирующие поверхности характеризуются относительным непостоянством оптических свойств.

Это выражается в самопроизвольном, с течением времени, изменением отражающих качеств, в результате воздействия неблагоприятных факторов (пыль, грязь), а так же старения материалов (ржавчина, отслаивание краски). Возможны и резкие изменения свойств, вносимые человеком, как например: окрашивание поверхностей, удаление накопленных загрязнений.

Таким образом, измерение параметров вибрации именно оптическими методами становится затруднительным из-за невозможности частой перенастройки оптической системы визирования.

Данную проблему следует рассматривать с позиции применимости оптических методов к нахождению конкретных параметров вибрации.

Если, к примеру, речь идет о частоте вибрации, то постепенное изменение отражающих свойств поверхности не приводит к существенным погрешностям до тех пор, пока оптические свойства поверхности не станут таковыми, что практически полностью невозможно будет определить ее перемещение, далее погрешность будет нарастать лавинообразно.

Следует так же учитывать, что изменение отражающих свойств вибрирующей поверхности несет в себе изменение погрешностей измерения вибрации лишь в случае, когда в область визирования не попадают грани, границы или отдельные элементы наблюдаемого объекта с явно выраженной текстурой.

Если же эти элементы присутствуют, то вычисления будут опираться на перемещение контрастных границ объекта [1].

Если же речь идет об измерении перемещения объекта, то даже минимальное изменение отражающих свойств поверхности может существенно влиять на результаты.

Следует рассмотреть некоторые типовые состояния отражающих поверхностей в рамках технологического процесса:

1) Глянцевая отражающая поверхность.
2) Матовая отражающая поверхность (определенного цвета).
3) Поверхность имеет выбоины, царапины расположенные хаотично, но имеющие контрастные очертания.

Для матовой гомогенной поверхности ее цвет, при определении параметров вибрации оптическим методом имеет определяющее значение.

Если цвет поверхности белый, то она способна отражать во всем цветовом диапазоне видимого спектра, что в свою очередь, при орга-

низации специализированного освещения дает возможности диверсифицировать каналы измерения [3] и как следствие уменьшить время на автоматизированный поиск частоты, либо повысить надежность результатов измерения.

Если же поверхность окрашена в один из цветов, то она способна отражать, лишь в узком цветовом спектре, что влечет за собой нарастание погрешности и определенные трудности в организации измерений.

Черный цвет, обладая минимальным коэффициентом отражения, является наихудшим в данном плане.

При проведении опытов выявлено, что если поверхность глянцевая, то при достаточно сильном освещении она отражает объекты окружающего пространства (в особенности источники освещения) подобно зеркалу, что делает влияние ее собственного цвета минимальным. Однако с уменьшением освещенности влияние цвета поверхности нарастает.

При перемещении поверхности, отраженные в ней объекты будут геометрически смещаться или искажаться, следовательно, они могут служить опорными точками для измерений.

Если поверхность имеет хаотически расположенные контрастные элементы, то оптической системе легче навести автофокус для определения точного расстояния до объекта, что улучшает процесс измерения по сравнению с матовой гомогенной поверхностью.

Однако, если поверхность периодически подвергается механическим воздействиям, приводящим к нарушению окрашенного слоя, то с течением времени из-за совокупности суммарных повреждений отражающие свойства изменятся в больших пределах, что не может не повлиять на измерения.

Универсальным решением проблемы, вызванной непостоянством оптических свойств отражающих поверхностей при измерениях, является применение тест-объектов.

Предполагается, что измеряемый объект способен отражать свет во всем спектре видимого света, если же это не так, то на нем можно закрепить отражающий тест-объект содержащий контрастные границы. Его применение позволит производить фокусировку оптической системы на поверхность объекта вне зависимости от ее состояния.

Предполагается использование матовых отражающих тест-объектов, содержащих только два базовых цвета синий и красный, воспринимаемые соответствующими участками ПЗС матрицы видеорегистратора. Зеленый цвет не взят в рассмотрение из-за высокого взаимного влияния его на синий канал ПЗС структуры [3].

Аберрации оптической системы

Аберрация оптической системы – ошибка или погрешность изображения в оптической системе, вызываемая отклонением луча от того направления, по которому он должен был бы идти в идеальной оптической системе. Аберрацию характеризуют различного вида нарушения гомоцентричности в структуре пучков лучей, выходящих из оптической системы.

Качество современных объективов позволяет практически исключить аберрации, а применение широкоугольных объективов дает возможность значительно расширить поле визирования при высокой глубине резкости кадра.

В книге [4] описываются аберрации обусловленные тонкими внеосевыми наклонными пучками лучей.

1. Астигматизм наклонных пучков.
2. Искривление плоскости изображения.

В общем случае плоскость изображения не является поверхностью сферы с центром в объективе оптической системы. А описывается поверхностями, обусловленными меридиональным и сагиттальным наклонными пучками, которые возникают из-за астигматизма системы.

С уничтожением астигматизма обычно стремятся устранить и искривление плоскости изображения, что особенно важно для фотографии, где требуется получение резкого изображения.

3. Дисторсия изображений.

Существуют следующие виды:

- вогнутое изображение - подушкообразная дисторсия
- выпуклое изображение - бочкообразная дисторсия.

Дисторсия обычно не очень вредит наблюдению, но может быть очень опасна, если при помощи оптической системы производятся съемки, предназначенные для промеров (например, в геодезии или, особенно, в аэрофотограмметрии). В данном случае, если речь идет об измерении размаха колебаний, дисторсия может привести к большим погрешностям.

Для фотоаппарата Nikon Coolpix L310, который используется в качестве экспериментальной оптической системы, опытным путем проверено наличие двух видов аберраций Зейделя: кривизны поля (поверхности) изображения и дисторсии.

Одним из важнейших показателей оптиче-

ской системы, служащей для измерений, является глубина резкости. Данный параметр зависит от конструкции и свойств объектива. Чем больше глубина резкости, тем дальше могут быть расположены друг от друга объекты, подлежащие исследованию.

Эксперимент по выявлению влияния глубины резкости и кривизны поверхности изображения

Цель проведения исследования: установить наличие и найти закономерность влияния аберрации Зейделя – искривление поверхности изображения при фиксации объектов находящихся в плоскости перпендикулярной оптической оси видеорегистратора.

Проведена серия снимков статичных изображений на разных дистанциях от плоскости перпендикулярной оптической оси камеры, и определены тенденции нарастания размытости между центром и краями изображений.

Для реализации задачи эксперимента камера была установлена на штативе.

На плоскости были наклеены мирры, содержащие символы различных кеглей (от 6 до 150, штрифт – Times New Roman) так, чтобы одна мирра была в центре кадра, а вторая – на правом краю.

Съемка проводилась на разных расстояниях от плоскости (от 1 до 10 метров с шагом в 1 метр).

Рис. 1. Кадр эксперимента по определению глубины резкости.

Съемка проводилась фотоаппаратом Nikon Coolpix L310 в простом автоматическом режиме без вспышки и зуммирования с использованием эффекта подавления вибраций (Vibration Reduction) в данной модели это достигается перемещением матрицы ПЗС. Величина исходного изображения – 14 МПикселей.

В качестве значащего фактора определялась разница высот минимально различимых символов между двумя миррами.

Наблюдается тенденция на увеличение разности высот различимых символов при отдалении камеры от центральной мирры. Следовательно, по мере отдаления камеры изображение становится все более размытым на краях по сравнению с центром.

Таблица1. *Результаты эксперимента*

Расстояние до плоскости в метрах	Кегель различимого шрифта мирры 1	Высота различимого шрифта в мм	Кегель различимого шрифта мирры 2	Высота различимого шрифта в мм	Разница высот шрифтов в мм
1	8	1,9	10	2,4	0,5
2	18	4,2	22	5,2	1,0
3	30	7,1	40	9,4	2,3
4	40	9,4	55	12,9	3,5
5	60	14,1	78	18,3	4,2
6	70	16,5	90	21,2	4,7
7	85	20	105	24,7	4,7
8	90	21,2	110	25,9	4,7
9	120	28,2	140	33	4,8
10	140	33	переполн	-	-

Рис.2. Результаты эксперимента по выявлению глубины резкости.

Таким образом, можно сделать вывод, что для оценки вибрации объектов, находящихся на отдалении от оптической оси и в целом от камеры, нужна отдельная дополнительная фокусировка на них.

Эксперимент по выявлению дисторсии объектива

Поверочная сетка была отображена на экране проектора «Leater», находящегося на расстоянии 2,75 метра от проекционной доски.

Корпус проектора позиционирован так, что геометрические размеры отображаемой сетки были одинаковы в верхнем и нижнем положении.

Изображение проецировалось без геометрических искажений.

Фотоаппарат Nikon Coolpix L310 располагался на штативе на расстоянии 3 метра от доски, плоскость которой перпендикулярна оптической оси.

При частичном зуммировании наблюдалась слабо выраженная подушкообразная дисторсия.

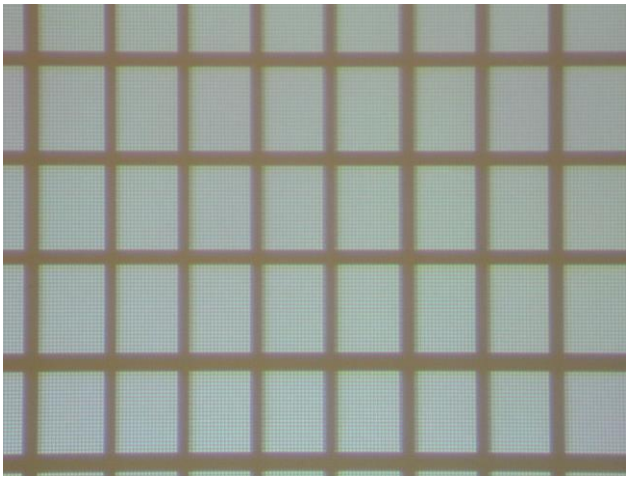

Рис. 3. Подушкообразная дисторсия при максимальном (21-Х) оптическом приближении.

Без зуммирования дисторсия практически не наблюдается и нарастает совместно с увеличением оптического приближения. Дисторсия наблюдается лишь по краям изображения при отдалении от оптической оси. Влияние данного типа искажений может проявляться при вычислении размаха колебаний или виброскорости.

Обобщая проведенные эксперименты становится очевидным, что в идеальном случае видеорегистратор должен быть сфокусирован на конкретный объект, находящийся на оптической оси.

Однако при незначительном отклонении от поверхности изображения и оси визирования, объекты находящиеся в кадре так же могут быть подвергнуты промерам с определенной степенью точности параметров.

Погрешности ПЗС матрицы и ошибки в канале чтения информации с ПЗС

При получении изображения с помощью видеосистемы, возможно наложение шумов, вызванных различными причинами [5]:

1) Шум видеодатчика;
2) Шум, вызванный плохой освещенностью
3) Ошибки в канале чтения информации с ПЗС;
4) Шум, вызванный зернистостью фотоматериалов (для аналоговых камер).

Шум проявляется на полученном изображении в виде отдельных пикселей с аномальной яркостью. Такие пиксели хаотично разрознены по площади кадра и не обладают пространственной корреляцией.

Шумы на изображении могут быть подавлены при использовании различных алгоритмов:

1) Низкочастотная пространственная фильтрация, например [6];
2) Сглаживание по гауссианам [7];
3) Медианный фильтр.

Погрешности кодировки изображения

Разрешение по интенсивности для каждого пикселя определяется разрядностью аналого-цифрового преобразования. Современные цифровые камеры имеют 16-ти разрядные АЦП и позволяют получать изображения в стандартных форматах BMP, JPEG и других [8], например RAW-формате, в котором каждой цветовой составляющей пикселя соответствует 16-битное число. Наиболее удобными для обработки растровых изображений является формат BMP, который содержит 8-битную информацию об RGB–компонентах каждого пикселя. Диапазон значений интенсивности цветовых компонент составляет 256 значений.

Подобная дискретизация вносит погрешности при измерении интенсивности отражаемого света. Оценить их можно следующим образом. Для стандартной матрицы ПЗС существует такая освещенность, при которой изображение получается полностью засвеченным, при этом все цветовые компоненты имеют максимальные значения. И такая освещенность, при которой изображение будет полностью черным, при этом цветовые компоненты обладают минимальными значениями, такими, что интегральная яркость всего изображения соответствует уровню шумов матрицы.

Необходимо разделить разницу данных освещенностей на количество градаций $N = 2^{24} = 16777216$. И тем самым получим абсолютное значение погрешности, вносимой форматом изображения, в разрешающей способности по изменению освещенности.

Если же рассмотреть монохромную, допустим, красную поверхность, то она отражает лишь одну цветовую компоненту, а это сокращает число возможных цветовых градаций в получаемом изображении с 2^{24} до 2^8=256. Что ведет к резкому росту погрешности.

Произведем расчет для идеальных условий.

Допустим, имеем некую камеру, с матрицей ПЗС, содержащей N=1280*720=9,216*10^5 пикселей, каждый пиксель имеет n=2^8 градаций, шумов матрицы нет, камера снимает белую матовую поверхность при гомогенном сверхярком освещении. Посчитаем относительную погрешность, вносимую форматом изображения, в разрешающей способности по измерению освещенности. Относительную погрешность вычислим как отношение абсолютной погрешности к среднему значению измеряемой величины

$$\delta_E = \frac{\Delta E}{E_{СРЕД}}$$ [9].

За максимальную освещенность возьмем наибольшую стандартную освещенность при киносъемке в студии E_{MAX} = 10^4 лк [10], в этом случае, при съемке белой матовой поверхности, изображение будет максимально засвеченным. Минимальную освещенность приравняем к нулю.

$$\Delta E = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{2^{24}} = \frac{10^4}{2^{24}} = 5{,}96 \cdot 10^{-4} \text{ лк.}$$

Данный расчет производится для целой матрицы, состоящей из N пикселей.

$$\Delta E_{общ} = \Delta E \cdot N = 549{,}3 \text{ лк}$$

Таким образом, получили максимально возможную абсолютную погрешность измерения для некоего идеализированного случая. Чем больше пикселей в матрице, тем больше суммарная погрешность. К примеру, если бы изображение было формата VGA 640*480, то $\Delta E_{общ} = 183$ лк, соответственно.

За среднюю освещенность возьмем обычную освещенность зимой в средних широтах $E_{СРЕД}$ = $5 \cdot 10^3$ лк, тогда относительная погрешность для разрешения HD 720 составит:

$$\delta_E = \frac{\Delta E}{E_{СРЕД}} = \frac{549{,}3}{5000} \cdot 100\,\% = 10{,}99\,\%$$

Относительная погрешность оцифровки может быть уменьшена за счет уменьшения разрешения видео, либо с увеличением освещенности. Однако погрешность все равно остается гораздо выше, чем у специализированных люксметров (порядка 1%).

Следовательно, изменение яркости, вызванное перемещением отражающего объекта, не может служить в качестве рассматриваемого фактора для косвенных измерений и по чувствительности уступает регистрации смещения изображения на ПЗС матрице видеорегистратора.

Заключение

Проведенные изыскания позволяют сделать вывод об ограничениях применимости метода в плане пространственного расположения объектов визирования оптической системы, необходимости применения постобработки видеоинформации для уменьшения влияния шумов.

Так же подтверждается преимущество, в плане разрешающей способности метода, фиксации перемещения изображения на матрице ПЗС по сравнению с регистрацией изменения освещенности.

Следующим этапом научной работы является изучение влияния упомянутых, но нерассмотренных в данной статье погрешностей канала измерения.

Список литературы

1. Быковский Ю. М. Обработка видеосигнала для измерения параметров вибрации объектов, расположенных на разных расстояниях от наблюдателя [Текст] / Ю. М. Быковский, В. А. Нурзай // Сб. науч. трудов НУК им. Макарова. – Николаев, 2015. – Вып. 1. – С. 58–62.
2. Быковский Ю. М. Механический источник вибрации инфранизких частот с открытой для света поверхностью [Текст] / Ю. М. Быковский, В. А. Нурзай // Энергетические установки и технологии: науч. журнал. – Севастополь: ФГАОУ ВО СевГУ, 2015. – Т. 1. - № 1. С. 5–10.
3. Петров Н.В. Восстановление волновых полей и анализ изображений при спектрально-широкополосной регистрации цифровых спекл-картин: Дисс. канд. физ-мат. наук. – С-Пб., 2011. – 108 с.
4. Ландсберг Г.С. «Оптика», издание 3, изд-во. Технико-теоретической литературы. М. -1952. сс.: 222-225.
5. Shapiro L., Stockman G. Computer vision. Prentice Hall, 2001.
6. Прэтт У. Цифровая обработка изображений. – М.: Мир, 1982.
7. Nixon M.S., Aguardo A.S. Feature extraction and image processing. Academic Press, 2007.
8. Szelisky R. Computer vision: algorithms and applications, draft, 2008 [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://research.microsoft.com/en-us/um/people/szeliski/Book/drafts/Szeliski_20081223_draft.pdf

9. Погрешность измерения [Электронный ресурс] / материал из Википедии. Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Погрешность_измерения
10. Освещенность [Электронный ресурс] / материал из Википедии. Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Освещенность

References

1. Bykovskij Yu. M., Nurzai V. A. *Obrabotka-videosignala dlya izmereniya parametrov vibracii obektov raspolozhennyh na raznyh rasstoyaniyah ot nablyudatelya* [Video signal processing for measuring vibration parameters of objects located at different distances from the observer] Nikolaev, Sbornik nauch. Trudov NUK im. Makarova., 2015. – Iss. 1., pp. 58–62.
2. Bykovskij Yu. M., Nurzai V. A. *Mekhanicheskij istochnik vibracii infranizkih chastot s otkrytoj dlya sveta poverhnostyu* [Mechanical source vibration of infra-low frequency having open surface for light] Ehnergeticheskie ustanovki i tekhnologii: Science Magazine. – Sevastopol': SevSU Publ., 2015., Iss. 1., № 1., pp. 5–10.
3. Petrov N. V. *Vosstanovlenie volnovyh polej i analiz izobrazhenij pri spektralno-shirokopolosnoj regis-tracii cifrovyh spekl-kartin* [Restoration of wave fields and image analysis with spectral-wideband registration of digital speckle patterns]: Ph.D. Dissertation. S-Pb., 2011., 108 p.
4. Landsberg G.S. *Optika* [Optic], Tekhniko-teoreticheskoj literatury Publ. M. -1952., Iss. 3, pp. 222-225.
5. Shapiro L., Stockman G. Computer vision. Prentice Hall, 2001.
6. Pratt U. *Cifrovaya obrabotka izobrazhenij* [Digital Image Processing]. – M.: Mir Publ., 1982.
7. Nixon M.S., Aguardo A.S. Feature extraction and image processing. Academic Press, 2007.
8. Szelisky R. Computer vision: algorithms and applications, draft, 2008 Available at: http://research.microsoft.com/en-us/um/people/szeliski/Book/drafts/Szeliski_20081223_draft.pdf
9. Pogreshnost izmereniya [Online resource] / Material iz Vikipedii [Observational error / Wikipedia] Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Observational_error
10. Illuminance [Online resource] / Material iz Vikipedii [Illuminance / Wikipedia] Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Illuminance

УДК 621.3990.009.06

Обзор электронной базы для реализации вероятностно-цифрового контроллера

[1]Е.В. Скрябина, [2]Д.В .Моисеев, [3]О.С. Михайлова
[1,2,3]ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия.
[1]skryabina_ev@mail.ru, [2]dmitriymoiseev@mail.ru, [3]r_o_c_86@mail.ru

Статья поступила 18.02.2019 г.; после доработки 21.02.2019 г.

Аннотация

Рассмотрена задача подбора элементной базы на основе программируемых логических интегральных схим для реализации вероятностно-цифрового измерительного контроллера, используемого в зоне повышенного уровня радиации. Выполнен анализ продукции наиболее популярных фирм: Altera, Actel Corporation, Xilinx.

Ключевые слова: вероятностно-цифровой контроллер, радиационно-стойкие ПЛИС.

Overview of the electronic base for the implementation of the probabilistic digital controller

[1]E.V. Skryabina, [2]D.V. Moiseev, [3]O.S. Mikhaylova
Sevastopol State University, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia.
[1]skryabina_ev@mail.ru, [2]dmitriymoiseev@mail.ru, [3]r_o_c_86@mail.ru

Received 18.02.2019 y.; received in final form 21.02.2019 y.

Abstract

The problem of selection of element base on the basis of programmable logic integrated circuits for realization of probabilistic-digital measuring controller used in the zone of high radiation level is considered. The analysis of the products of the most popular companies: Altera, Actel Corporation, Xilinx

Keywords: probabilistic digital controller, radiation-resistant PLD

Введение

На сегодняшний день ядерные измерительно-информационные технологии дали возможность решать измерительные и функциональные задачи получения количественной и качественной информации о состоянии контролируемых объектов. Выполнение этих задач может способствовать вероятностно-цифровой измерительный контроллер, который реализуется на основе программируемых логических интегральных схим (ПЛИС) [1].

Постановка задачи

Провести обзор и анализ программируемых логических интегральных схим на основе которых возможна реализация вероятностно-цифрового измерительного контроллера, используемого в зоне повышенного уровня радиации.

Решение задачи

В отличие от обычных цифровых микросхем, логика работы ПЛИС не определяется при изготовлении, а задаётся посредством программирования.

Это позволяет создавать и конструировать контроллеры с алгоритмом работы на основе вероятностного отображения сигнала [2].

Современные представители ПЛИС: семейства MAX5000 и MAX7000 фирмы Altera, схе-

мы XC7000 и XC9500 фирмы Xilinx, а также большое число микросхем других производителей (Atmel, Vantis, Lucent и др.)

Известно, что применение базовых матричных кристаллов (БМК) и заказных интегральных схем (ИС) становится выгодным при больших объемах производства. Для того, чтобы снизить затраты на "обкатку" разрабатываемого алгоритма, представляется целесообразным произвести его отработку на ПЛИС, а затем приступать к проектированию БМК.

Рассмотрим основные подходы при выборе ПЛИС для реализации проектов. Как известно, при выборе элементной базы руководствуются следующими критериями отбора:

- быстродействие;
- логическая емкость, достаточная для реализации алгоритма;
- схемотехнические и конструктивные параметры ПЛИС, надежность, рабочий диапазон температур, стойкость к ионизирующим излучениям и т.п.;
- стоимость владения средствами разработки, включающая как стоимость программного обеспечения, так наличие и стоимость аппаратных средств отладки;
- стоимость оборудования для программирования ПЛИС или конфигурационных постоянных запоминающих устройств (ПЗУ);
- наличие методической и технической поддержки;
- стоимость микросхем.

Рассмотрим с этих позиций продукцию ведущих мировых производителей ПЛИС.

Фирма Altera Corporation была основана в июне 1983г.

В настоящее время последним продуктом этой фирмы является семейство APEX20K с характеристиками, показанными в таблице 1.

Таблица 1 *- Основные характеристики ПЛИС семейства APEX20K*

EP20	K200	K300	0K600	K1000
Число эквивалентных вентилей	526 000	728 000	1 537 000	2 670 000
Число логических элементов	8 320	11 520	24 320	42 240
Встроенные блоки памяти	52	72	152	264
Максимальный объем памяти, бит	106 496	147 456	311 296	540 672

Altera выпускает CPLD семейств MAX3000A, MAX7000B, MAX9000, FPGA семейств FLEXI OK, FLEX8000, FLEX6000.

Кроме того, ПЛИС фирмы Altera выпускаются с возможностью программирования в системе непосредственно на плате. Для программирования и загрузки конфигурации устройств опубликована схема загрузочного кабеля ByteBlaster и ByteBlasteMV. Следует отметить, что новые конфигурационные ПЗУ EPC2 допускают программирование с помощью этого устройства, тем самым отпадает нужда в программаторе, что, естественно, снижает стоимость владения технологией. ПЛИС фирмы Altera выпускаются в коммерческом и индустриальном диапазоне температур.

Компания Actel Corporation была основана в 1985 г. Особенностью ПЛИС Actel является применение так называемой Antifuse технологии, представляющей собой создание металлизированной перемычки при программировании.

Данная технология обеспечивает высокую надежность и гибкие ресурсы трассировки, при этом не требуется конфигурационное ПЗУ. По данной технологии выпускаются семейства ACT1, ACT2, 1200XL, а также новые семейства 54SX, A40MX и A42MX со встроенными модулями памяти, имеющих хорошие показатели логической емкости и радиационно-стойкие семейства RT1020/1280 [3].

Данные ПЛИС являются хорошей альтернативой БМК при среднесерийном производстве.

ПЛИС нового семейства ProASIC3/3E фирмы Actel имеют емкость до миллиона эквивалентных логических вентилей. Их отличительной особенностью является энергонезависимость, обусловленная применением Flash-технологии, а также наличие интегрированного на кристалле запоминающего устройства.

Для проектирования устройств на ПЛИС фирмой Actel распространяется бесплатный пакет Actel DeskTOP, содержащий средства описания проекта, моделирования, генерации тестов разработки VeriBest и средства синтеза разработки Synplicity. Пожалуй, система проектирования Actel DeskTOP является наиболее мощным из всех бесплатных пакетов систем автоматического проектирования (САПР) ПЛИС.

К сожалению, микросхемы Actel, выпускаемые по Antifuse технологии, требуют применения специального программатора, стоимость которого пока еще весьма высока. Однако их отличает высокая надежность, поэтому они яв-

ляются весьма перспективной базой для специальных применений. Так, ПЛИС серии RH1280, имеют следующие характеристики:

- допустимая доза облучения 300000 РАД [4];
- логическая емкость 16000 эквивалентных вентилей;
- быстродействие до 135 МГц.

ПЛИС данного типа были применены в системе управления и обработки изображения цифровой видеокамеры робота марсохода Pathinder и в формирователе кадра для передачи информации на Землю.

ПЛИС всех семейств Actel выпускаются в коммерческом и индустриальном диапазоне температур, с военной и космической приемкой.

Компания Xilinx, была основана в феврале 1984г., её последний продуктом являются ПЛИС семейства Virtex.

Архитектура семейства Virtex характеризуется широким разнообразием высокоскоростных трассировочных ресурсов, наличием выделенного блочного оперативного запоминающего устройства (ОЗУ), развитой логикой ускоренного переноса.

ПЛИС данной серии обеспечивают высокие скорости межкристального обмена до 200 МГц (стандарт HSTLIV).

Кристаллы серии Virtex, за счет развитой технологии производства и усовершенствованного процесса верификации, имеют достаточно низкую стоимость (до 40% от эквивалентной стоимости серии XC4000XL).

Помимо семейства Virtex, Xilinx выпускает FPGA семейств XC3000A, XC4000E, Spartan, XC5200, а также CPLD XC9500 и малопотребляющую серию CoolPLD.

Существует бесплатная версия САПР - WebPACK, поддерживающая CPLD XC9500 и CoolPLD, ввод описания алгоритма с помощью универсального языка описания аппаратуры VHDL.

Следует заметить, что Xilinx существенно обновил модельный ряд как своих ПЛИС, так и программного обеспечения, которое теперь разрабатывается с участием фирмы Synopsys.

Для ВУЗов предусмотрены значительные скидки на программное обеспечение, позволяющее осуществлять алгоритмы работы устройств.

ПЛИС Xilinx выпускаются не только в коммерческом и индустриальном диапазоне температур, но и с военной (Military) и космической (Space) приемкой.

На сегодняшний день наиболее перспективными являются следующие ПЛИС фирмы Xilinx:

• FPGA серии Virtex;
• FPGA серии Spartan;
• CPLD серии XC9500;
• CPLD серии CoolRunner-ll.

Фирма Xilinx, чьи устройства применяются, например, в системах управления исследовательской миссии NASA/JPL на Марсе, поставляет радиационно стойкие ПЛИС сложностью до 1 млн. вентилей, выдерживающие общую дозу ионизации 200 крад (таблица 2). Функции TMR в них реализованы именно на таких радиационно стойких программируемых элементах [2].

***Таблица 2**. Радиационно-стойкие ПЛИС фирмы Xilinx*

Серия	**Модель ПЛИС**	**V ядра, В**	**Емкость основной памяти**	**Общая доза ионизации, крад**
QPro-R Virtex-II	XQR2V2000	1,5	720K	200
	XQR2V3000	1,5	1728	200
	XQR2V6000	1,5	2592	200
Qpro-R Virtex	XQVR300	2,5	64K	100
	XQVR600	2,5	96K	100
	XQVR1000	2,5	128K	100

Заключение

В результате проведенного обзора и анализа программируемых логических интегральных схим на основе которых возможна реализация вероятностно-цифрового измерительного контроллера, используемого в зоне повышенного уровня радиации, можно сделать выводы, что современные ПЛИС фирмы Actel серии RH1280 и фирмы Xilinx серии QPro-R Virtex-II позволяют выполнить построение контроллеров заданных параметров.

Список литературы

1. Е. Скрябина. Средства обработки информации с первичных преобразователей и методы диагностики технического оборудования ЯЭУ. Доклад// Сборник «Десятая Международная научно-практическая конференция по атомной энергетике «Безопасность, эффективность, ресурс ЯЭУ», октябрь 2012 г Севастополь
2. Е. Скрябина. Измерительный контроллер для обработки первичной информации. Сборник научных трудов АМВС имени П.С. Нахимова, № 4 (12), 2012 г., г. Севастополь
3. В. Юдинцев. Радиационно стойкие интегральные схемы Надежность в космосе и на земле.

Электроника: Наука, Технология, Бизнес журнал. — 2007. — № 5. — С. 72-77
4. П. Чуприна. Программируемая логика Actel и Atmel не уступают своих позиций// ЭЛЕКТРОНИКА: Наука / технология / бизнес №2 (00124) 2013.

References

1. E. Skryabina. Means of information processing from primary converters and methods of diagnostics of technical equipment of nuclear power plants. Report / / Collection "the Tenth international scientific and practical conference on nuclear energy "Safety, efficiency, resource of nuclear power plant", October 2012 Sevastopol
2. E. Skryabina. A measurement controller for processing the primary information. Collection of scientific works of imvs named After p. S. Nakhimov, № 4 (12), 2012, Sevastopol
3. V. Yudintsev. Radiation-resistant integrated circuits Reliability in space and on earth. Electronics: Science, Technology, Business magazine. - 2007. - № 5. - P. 72-77
4. P. Chuprina. Programmable logic of Actel and Atmel are not inferior to their positions/ / ELECTRONICS: science / technology / business №2 (00124) 2013.

НЕТРАДИЦИОННЫЕ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

УДК 620.92

Увеличение мощностных характеристик фотоэлектрического модуля при использовании плоского концентратора на основе боковых отражающих поверхностей

В.В. Кувшинов[1], Е.Г. Какушина[2], К.В. Зубков[3],
Э.Ю. Ислямова[4], А.А. Ненько[5]

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия, [1]kuvshinov.vladimir@gmail.com, [2]littie@mail.ru, [3]ZubkovKV@krgo.energy.crimea.ru, [4]evelina.islyamova21@gmail.com, [5]neie@mail.ru,

Статья поступила 11.02.2019 г.; после доработки 14.02.2019 г.

Аннотация

Приводятся исследования солнечной установки с боковыми отражающими панелями, проводимые в СевГУ. Предложенная установка позволяет увеличивать мощностные характеристики фотоэлектрических модулей, при сохранении оптимальных режимов работы. Приведены расчёты параметров слабоконцентрирующей системы для фотоэлектрического модуля и экспериментальные исследования. Определены оптимальные материалы для отражающих покрытий концентратора.

Ключевые слова: солнечный концентратор, фотоэлектрический модуль, солнечная установка с низкопотенциальным концентратором, слабоконценрирующие системы, кремниевые фотоэлектрические преобразователи.

Increasing the power characteristics of the photovoltaic module using a flat concentrator based on the side reflective surfaces

V.V. Kuvshjnov[1], E.G. Kakyshina[2], K.V. Zubkov[3],
E.Y. Islyamova[4], A.A. Nenko[5]

Sevastopol state university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia.
[1]kuvshinov.vladimir@gmail.com, [2]littie@mail.ru,
[3]ZubkovKV@krgo.energy.crimea.ru, [4]evelina.islyamova21@gmail.com, [5]neie@mail.ru,

Received 11.02.2019 y.; received in final form 14.02.2019 y.

Abstract

The paper presents the study of the solar installation with the side reflective panels, held in the Sevgi. The proposed installation allows to increase the power characteristics of the photovoltaic modules, with the storage of optimal modes of operation. Calculations of the parameters of the weakly centering system for the photovoltaic module and experimental studies are presented. The optimal materials for the reflecting coatings of the concentrator are determined.

Keywords: solar concentrator, photovoltaic module, solar installation with low-potential concentrate, low-concentration systems, silicon photovoltaic converters.

Введение

В различных работах [1, 2, 3] были представлены описания концентраторов для фотоэлектрических установок. При установке концентратора, на уже действующую установку, можно значительно поднять эффективность ра-

боты установки и существенно увеличить её энерговыработку [4, 5].

При правильных расчетах и соблюдении режимов эксплуатации практически все концентраторы будут увеличивать энерговыработку солнечных установок, однако это увеличение может не компенсировать затратную часть, в этом случае необходимо снизить себестоимость концентраторов.

Это возможно, если упростить их конструкцию и использовать для их производства недорогие материалы [6]. При некоторых режимах работы солнечных установок, некоторые типы концентраторов могут только ухудшать характеристики фотоэлектрических установок [4, 5]. Поэтому необходимо провести анализ, и выяснить какие типы концентраторов лучше использовать и когда они будут улучшать эффективность работы установок.

Самым простым типом концентраторов солнечного излучения для любых солнечных установок, и, в частности, для фотоэлектрических модулей являются фоконы (концентрирующий конус) и фоклины (концентрирующий клин). В названиях этих концентраторов раскрывается их внешний вид [4].

Фоклин состоит из плоских отражающих поверхностей, он может состоять из простых плоских зеркал, установленных под определенным углом к приемной поверхности [4]. Существенными отличиями фоконов и фоклинов от других отражающих и линзовых концентраторов является длительная работа в пределах параметрического угла концентратора без слежения за положением Солнца. Большинство из рассматриваемых типов концентраторов имеют геометрически сложные поверхности. Производство таких концентраторов является дорогостоящим, поэтому их эффективность не всегда оправдана [4].

Самым простым типом концентраторов солнечного излучения является фоклин. Этот концентратор хорошо описан в различных источниках [1, 4, 6]. Он может состоять из простых плоских зеркал, установленных под определенным углом к приемной поверхности. Преимущества такого концентратора в простоте изготовления. Простотой изготовления отличаются только фоклины с простыми плоскими поверхностями [4].

После проведения анализа основных типов концентраторов, используемых для фотоэлектрических установок видно, что для оснащения выпускаемых на сегодня промышленных серийных фотоэлектрических модулей, наиболее приемлемыми являются фоклины, у них низкий коэффициент концентрации, т.е. они являются низкопотенциальным концентраторами, подходящими для использования в серийных фотоэлектрических установках.

Постановка задачи исследования

В задачу авторов входило разработать и исследовать концентратор, который подходит для большинства фотоэлектрических модулей, производимых на сегодняшнее время мировой промышленностью.

Для производства фоклинов. можно использовать односекционные плоские системы (рис. 1) позволяющие получать двухдесятикратную концентрацию солнечного излучения при приемлемых массогабаритных показателях и обеспечивать достаточно равномерное распределение плотности лучистого потока на приемнике при неточной ориентации концентратора на Солнце и деформации его отражающих поверхностей [9].

Слабоконцентрирущие системы применяются, главным образом, для повышения освещенности модулей (панелей солнечных элементов), в связи с чем, важным требованием к их выходным энергетическим характеристикам является обеспечение равномерного распределения плотности лучистого потока на приемной поверхности.

В группе систем с расположением приемника в проходящем потоке и прямолинейными образующими к концентраторам с плоскими отражающими поверхностями относятся двухгранные концентраторы, получившие название плоских фоклинов [7].

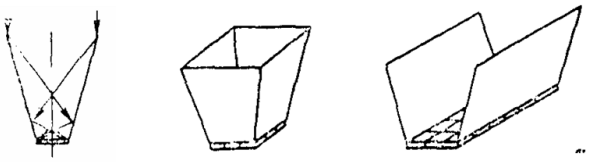

Рис. 1. Фоклинные зеркальные концентрирующие системы: а – ход лучей в плоском концентраторе; б – четырехгранный концентратор; в – двухгранный концентратор.

При использовании стандартных промышленных серийных солнечных элементов наиболее приемлемая конструкция концентратора, состоящего из двух плоских отражающих, для серийных модулей энергоэффективность увеличивается значительнее, чем при одной отража-

ющей поверхности, при этом, согласно экспериментальным данным, не наступает перегрев поверхности, который может быть при использовании концентратора с более высоким геометрическим коэффициентом [4].

Результаты исследования

Для расчета угла установки модели низкопотенциального концентратора [4] воспользуемся формулой (1):

$$a = a_o \left[\sum_{n=1}^{n_к} (-1)^n \cos 2n\theta_k \right] / \cos \theta_k \quad (1)$$

где a_o – ширина преемника излучения,

n – n – количество отражений от стенки концентратора;

a_n – ширина концентратора.

При многократном отражении лучей от стенок концентратора возникают значительные потери энергии, что сказывается на интенсивности отраженного излучения.

Поэтому для предложенной установки использовался фоклин с однократным переотражением.

При однократном отражении формула (1) приобретает вид:

$$a = a_o \left(- \frac{\cos 2\theta_k}{\cos \theta_k} \right) \quad (2)$$

В общем случае, используя приемную панель и отражающую грань не совпадающих фиксированных размеров, для нахождения оптимального угла необходимо решить уравнение (3), где угол установки зависит от отношения ширины отражателя и приёмника.

$$2\cos\theta - \frac{1}{\cos\theta} = \frac{l_{отраж}}{l_{приём}} \quad (3)$$

Например, при значении отражателя 55 см и приемника 45 см угол будет соответствовать 62°. Часть данных были получены при такой конструкции и размерах концентратора [8]. При равной площади отражающих панелей, и приемной поверхности, наиболее оптимальный угол установки отвечает значению 60° (рис.2).

Мощность фотоэлектрического модуля рассчитывается по формуле (4):

$$P_{бат.} = \eta_{эл.} S_{эл.} E_{эл.} \quad (4)$$

где $\eta_{эл.}$ – КПД фотоэлектрических преобразователей;

$S_{эл.}$ – суммарная площадь солнечных элементов батареи;

$E_{эл.}$ – интенсивность солнечного излучения на рабочей поверхности элементов фотоэлектрической батареи (освещённость).

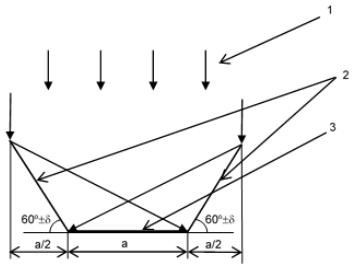

Рис. 2. Плоский концентратор для фотоэлектрического модуля: 1 – падающее солнечное излучение; 2 – отражающие поверхности концентратора; 3 – фотоэлектрический модуль (батарея).

Для проведения исследований на кафедре ВИЭЭСС в лаборатории «Возобновляемые источники энергии» кафедры «Возобновляемые источники энергии и электрические системы и сети» Севастопольского государственного университета Института ядерной энергии и промышленности был выбран монокремниевый фотоэлектрический модуль ISM-50, мощностью 50 В (рис. 3).

Рис. 3. Экспериментальная солнечная установка на основе фотоэлектрического модуля ISM-50 с боковыми отражающими поверхностями.

Исследования проводились в январе, марте, апреле и мае, 2018 года, при максимальном значении прямой солнечной радиации (около 1000 Вт\м2) [9, 12]. Время суток для проведения эксперимента выбиралось около полудня. В облачные и мало облачные дни в целях чистоты эксперимента исследования не проводились. Фотографии модуля ISM-50 с концентратором изображены на рис.2. При проведении исследований из графиков, приведенных на рисунке 4 видно, что при применении концентраторов светового потока мощность, вырабатываемая фотоэлектрическим модулем, увеличивалась до 40 % (по

теоретическим данным (при коэффициенте Кг=2), мощность может увеличиваться до 100%).

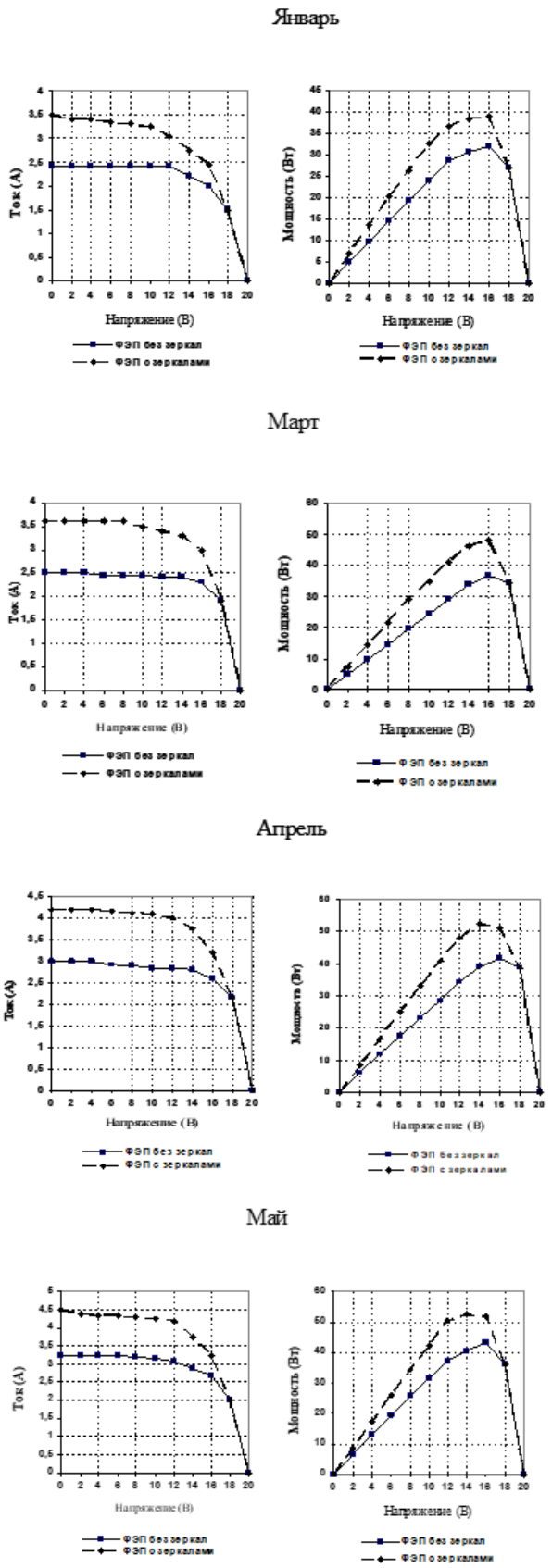

Рис. 4. Увеличение мощности модуля при использовании концентратора.

Освещенность солнечной батареи, при использовании концентратора, естественно также возрастала. Напряжение и ток в рабочей точке (точке максимальной мощности) менялись, причем напряжение при увеличении освещенности немного падало, что свидетельствует о смещении в рабочей точке, а ток и мощность в целом возрастали [10, 11].

Угол установки граней концентратора обозначим α, при этом:

$$\alpha = (60° \pm \delta) \qquad (5)$$

Так как мощностные характеристики модуля, согласно (4) напрямую определяются освещенностью его приёмной поверхности, то отклонения отражающих поверхностей (рис. 1) от оптимального угла α дают уменьшение выходной мощности фотоэлектрической батареи. Задачей поставленного эксперимента было определение опытным путем значений α, для каждой отражающей грани концентратора.

Значения изменения угла установки для каждой боковой отражающей поверхности концентратора, приблизительно соответствуют 1° изменения угла α, на 1% изменения мощности модуля. Это теоретические расчеты, соответствующие формулам (4) и (5). Экспериментальные расчеты отличаются от теоретических, особенно при значениях углов установки боковых отражающих поверхностей далёких от оптимального угла, соответствующего 60° (табл.1).

Таблица 1.*Углы установки боковых отражающих поверхностей*

1-я панель α(град)	60	60	60	60	60	60	61	62	63	63
2-я панель α(град)	60	61	62	63	64	65	60	60	60	63
Измеряемая мощность (Вт)	63	62,37	61,74	61	60,48	59,85	62,37	61,74	61	52
1-я панель α(град)	64	65	61	61	61	61	62	63	63	64
2-я панель α(град)	60	60	61	62	63	64	62	61	62	63
Измеряемая мощность (Вт)	60,48	59,85	61,74	61	60,5	59,8	60,4	60	5,8	50
Освещенность 900 Вт/м^2, атм. температура 20°С										

Как видно из таблицы допуски при установке углов не должны превышать 5-10°, так как при больших углах значение мощности начинает сильно падать.

В целях уменьшения стоимости солнечных установок были проведены исследования равных по площади покрытий с различным коэффициентом отражения.

В качестве материалов для отражающих поверхностей концентратора использовались три вида покрытий: обычные зеркала, покрытые серебряной амальгамой, светоотражающая пленка ORACAL, листы оцинкованного железа. В таблице 2 приведены данные исследований.

Таблица 2. *Вольт-амперные характеристики ISM-50*

Характеристики фотоэлектрического модуля ISM-50 без концентратора (экспериментальные значения)									
I (A)	3	3	3	2,9	2,8	2,6	2,35	2,1	0
U (B)	0	4	7	10	12	13	14,5	15	19
P (Вт)	0	12	21	29	33	35	34	31	0
Характеристики фотоэлектрического модуля ISM-50 с плоским концентратором (отражающие поверхности из зеркал), (экспериментальные значения)									
I (A)	4,5	4,5	4,4	4	3,5	3	2,6	2,2	0
U (B)	0	6	10	13	14	15	16	17	19
P (Вт)	0	27	44	52	48	46	42	37	0
Характеристики фотоэлектрического модуля ISM-50 с плоским концентратором (отражающие поверхности из фольги), (экспериментальные значения)									
I(A)	4,7	4,7	4,6	4,1	3,5	3	2,6	2,3	2,1	0
U(B)	0	6	10	13	14	16	16,5	17	17,5	19
P (Вт)	0	28	46	53	51	48	43	39	36	0
Характеристики фотоэлектрического модуля ISM-50 с концентратором (отражающие поверхности из оцинковки), (экспериментальные значения)									
I (A)	4	4,3	4	4	3	2,9	2,5	2,2	0
U (B)	0	5,5	9,5	12	14	15	16	17	19
P (Вт)	0	24	40	49	47	43	40	37	0
Характеристики модуля получены при 700 Вт/м², T=20°C									

При проведении экспериментов, было установлено, что увеличение мощностных характеристик модуля ISM-50 при использовании концентратора с отражающей пленкой составляло более 50%.

При использовании в плоском концентраторе листов оцинкованного железа увеличение мощности составляло до 35% [11, 12]. Увеличение мощности у фотоэлектрического модуля ISM-50 при установке в концентраторе обычных зеркал составляло до 48 %.

Из результатов исследования видно, что светоотражающая пленка более эффективна, чем зеркало, при этом цена на неё в несколько раз ниже.

Выводы

В результате проведенных экспериментов разработана и исследована экспериментальная фотоэлектрическая установка с плоским концентратором.

Модель низкопотенциального солнечного концентратора использовалась для увеличения мощностных характеристик серийного фотоэлектрического модуля ISM-50, при этом определены оптимальные значения допусков углов установки боковых отражающих граней к плоскости модуля. Используя эти данные, экспериментально были установлены наиболее оптимальные углы положения модуля.

При проведенных исследованиях были использованы различные материалы для производства отражающих покрытий концентратора. Наиболее оптимальный материал светоотражающая пленка, которая имеет низкую стоимость при высоких отражающих характеристиках. При этом хорошим материалом является оцинковка, которая используется в различных строительных конструкциях, обладает высоким коэффициентом отражения и может использоваться в установках, расположенных на крышах зданий и сооружений.

Список литературы

1. Стребков Д. С. Концентраторы солнечного излучения / Д. С. Стребков, Э. В. Тверьянович; под ред. академика РАСХН Д. С. Стребкова. – М.: ГНУ ВИЭСХ, 2007. – 316 с.
2. Захидов Р. А. Теория и расчёт гелиотехнических концентрирующих систем / Захидов Р. А., Умаров Г. Я., Вайнер А. А. – Ташкент: ФАН, 1977. – 300 с.
3. Солнечные печи / [под ред. В. А. Баума]. – М.: «Иностранная литература», 1960. – 230 с.
4. Андреев В. М. Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения / Андреев В. М., Грилихес В. А., Румянцев В. Д. – Л: Наука, 1989. – 405 с.
5. Андреев В. М. Фотоэлектрическое преобразование солнечной энергии / Андреев В. М., Грилихес В. А., Румянцев В. Д. – Л: Наука, 1989. – 310 с.
6. Баранов В. К. Новые концентраторы излучения и

перспективы их применения в оптике и гелиотехнике / В. К. Баранов // Труды Государственного оптического института. – С.-Петербург, 1979. – Т. 45, вып. 179. – С. 57 - 70.
7. Грилихес В. А. Плоские фоклины с многократным отражением, как концентраторы солнечного излучения / В. А. Грилихес, О. Ф. Зайцев // Гелиотехника, 1999. – № 3. – С. 22 - 30.
8. Пат. 49033 Украина; МПК H 01 L 31/00. Солнечный концентратор для фотоэлектрических модулей / Кувшинов В. В., Сафонов В. А., Башта А. И.; патент собственник Кувшинов В. В. – № u 2009 11839; заявл. 19.11.09; опубл. 12.04.10, Бюл. № 7.
9. Кувшинов В.В. Возможности повышения мощностных характеристик солнечных установок при выработке тепловой и электрической энергии с одной приемной поверхности / Е.Г. Какушина // Энергетические установки и технологии – 2016. Т. 2. № 3. С. 45-50.
10. Кувшинов В.В. Использование термофотоэлектрических установок для обеспечения тепловой и электрической энергией Севастополя / Е.Г. Какушина, А.Д. Васильев, А.А. Горецкий // Энергетические установки и технологии – 2016. Т. 2. № 3. С. 51-57.
11. Кувшинов В.В. Исследование сезонной работы промышленного фотоэлектрического модуля PS 250 / Е.Г. Какушина, Д.Д. Смирнова // Энергетические установки и технологии – 2017. Т. 3. № 1. С. 47-50.
12. Кувшинов В.В. Прозрачные защитные покрытия для комбинированных солнечных установок/ Е.Г. Какушина, Косий А.Г.// Энергетические установки и технологии – 2017. Т. 3. № 3. С. 73-78.

References

1. Strebkov D. S. The Concentrators of solar radiation / D. S. Strebkov, E. Tver'yanovich// under the editorship of academician RAAS D. S. Strebkova. M. GNU RECA. - 2007. p. 316.
2. Zakhidov R. A. Theory and calculation of thermal solar systems concentrating systems / R.A. Zakhidov, G. Ya. Umarov, A.A. Vayner // Tashkent. -- 1977. p. 300.
3. Solar oven / under the editorship of V. A. Baum// M. "Foreign literature". - 1960. p. 230.
4. Andreev V. M. Photoelectric conversion of concentrated solar radiation / V.M. Andreev, V.A. Griliches, V.D. Rumyantsev// L. Science. - 1989. p. 405.
5. Andreev V. M., Photovoltaic conversion of solar energy / V.M. Andreev, V.A. Griliches, V.D. Rumyantsev // M. Science. - 1989. p. 310.
6. Baranov V. K. New radiation concentrators and prospects of their application in optics and heliotech-Nike / V. K. Baranov // Proceedings of the State optical Institute. St. Petersburg, - 1979. Vol. 45, No. 179. pp. 57 - 70.
7. Griliches V. A. Flat folini with multiple reflection, as the hub of the solar-radiation / V. A. Griliches, O. F. Zaitsev // Helio-tech. - 1999. No 3. pp. 22 - 30.
8. Patent 49033 Ukraine; IPC N 01 L 31/00. Solar concentrator for photovoltaic modules / V.V. Kuvshinov, V.A. Safonov, A.I. Bashta // the owner of the patent Kuvshinov V. V. № u 2009 11839; Appl. 19.11.09; publ. 12.04.10, bul. No. 7.
9. Kuvshinov V.V. Opportunities to improve the energy characteristics of solar plants in the production of thermal and electrical energy from one receiving surface / E. Kakushina // Journal of Sevastopol national University. - 2016. Vol. 2. No. 3. pp. 45-50.
10. Kuvshinov V.V. The use of thermo-photovoltaic plants to provide thermal and electrical energy of Sevastopol / E. Kakushina, A. Vasiliev. A. Goreckii // Journal of Sevastopol national University. - 2016. Vol. 2. No. 3. pp. 51-57.
11. Kuvshinov V.V. Investigation of seasonal operation of industrial photovoltaic module PS 250/ E. Kakushina, D. Smirnova // Journal of Sevastopol national University. - 2017. Vol. 3. No. 1. pp. 47-50.
12. Kuvshinov V.V. Transparent protective coating for a combined solar installations / E. Kakushina, A. Kocii // Journal of Sevastopol national University. - 2017. Vol. 3. No. 3. pp. 73-78.

УДК 620.92

Сравнение теоретических и экспериментальных результатов исследования характеристик фотоэлектрических батарей при изменении освещенности их рабочей поверхности

В.В. Кувшинов[1], Е.Г. Какушина[2], М.А. Васильченко[3],
В.В. Киндлер[4], В.В. Кувшинова[5].
ФАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, [1]kuvshinov.vladimir@gmail.com, [2]littie@mail.ru, [3]myrzyanka@gmail.com,
[4] kindler.valera@gmail.com, [5]kuvshinov.vladimir@gmail.com

Статья поступила 06.02.2019 г.; после доработки 08.02.2019 г.

Аннотация

В статье рассмотрены теоретические расчеты и экспериментальные исследования характеристик кремниевых фотоэлектрических батарей при изменении освещенности их рабочей поверхности. Показано несоответствие между теоретическими исследованиями и результатами экспериментов. Реальное уменьшение мощностных характеристик связано с показателями преломления защитных покрытий фотобатарей

Ключевые слова: кремниевые фотоэлектрические преобразователи, возобновляемые источники энергии, фотоэлектрический модуль, солнечная установка, мощностные характеристики фотоэлектрических батарей.

Comparison of theoretical and experimental results of the study of the characteristics of photovoltaic cells when changing the illumination of their working surface

V.V. Kuvshjnov[1], E.G. Kakyshina[2], M.A.Vasilchenko[3],
V.V. Kindler[4], V.V. Kuvshjnova[5]
Sevastopol state university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia.
[1]kuvshinov.vladimir@gmail.com, [2]littie@mail.ru, [3]myrzyanka@gmail.com,
[4] kindler.valera@gmail.com, [5]kuvshinov.vladimir@gmail.com

Received 06.02.2019 y.; received in final form 08.02.2019 y.

Abstract

The article deals with theoretical calculations and experimental studies of the characteristics of silicon photovoltaic cells when changing the illumination of their working surface. The discrepancy between theoretical studies and experimental results is shown. A real decrease in the power charac-teristics related to the refractive indices of protective coatings of photovoltaic cells.

Keywords: silicon photovoltaic converters, renewable energy sources, photovoltaic module, solar installation, power characteristics of photovoltaic cells.

Введение

Современные серийные фотоэлектрические установки представляют собой плоские панели солнечных модулей (батарей), ориентированные перпендикулярно направлению распространения солнечных лучей.

Основой для фотоэлектрических модулей являются солнечные элементы (СЭ), сделанные из монокристаллического, поликристаллическо-

го или аморфного кремния [1]. Существуют также промышленные арсенид-галлиевые солнечные батареи с концентраторами на основе линз Френеля [2]. В настоящее время, для наземного использования, на промышленный поток поставлены, в основном, кремниевые солнечные батареи [1].

Сегодня в мире выпускается уже значительное количество фотоэлектрических модулей [1], и практически все они производятся из кремниевых элементов, имеющих планарную конструкцию, т.е. плоскую приемную поверхность на которую падает солнечная радиация. Естественно и все фотоэлектрические модули, сделанные из этих элементов, и также имеют плоскую конструкцию.

В России освоено производство солнечных элементов. Они выращиваются на базе монокристаллического и поликристаллического кремния различных размеров и характеристик. В основном это квадратные и псевдоквадратные пластины размером около 20х20 см. В зависимости от класса, средний КПД серийных элементов составляет: 17-20 %, при мощности более 6 Вт, при токе до 11 А и напряжении около 0,55 В, ток короткого замыкания до 12 А, напряжение холостого хода до 0,64 В [1]. Основные типы фотоэлектрических модулей различных производителей и различных конструкций, могут иметь мощность 12, 50, 100, 200 Вт и др.

В работе, описываются возможные виды потерь в мощности солнечных элементов и модулей, которыми являются оптические потери, потери на затенение контактной сеткой, и др. потери. При различных углах падения солнечного излучения на рабочую поверхность основными являются оптические потери [3, 4]. Для гладкой поверхности солнечного элемента, коэффициент отражения при увеличении угла падения световых лучей до 30-40° почти не меняется, однако затем быстро увеличивается, стремясь к единице при углах падения, около 90° [4].

Постановка задачи исследования

В натурных условиях изменения угла падения лучей на приемную поверхность фотоэлектрического модуля на определенный градус приводят к изменению освещенности рабочей поверхности модуля $E_{бат.}$ на определенную величину, что, в свою очередь, влияет на работу фотоэлектрического модуля [5]. Смоделировать ситуацию, изменения освещенности рабочей поверхности при движении Солнца по горизонту можно, изменяя в течение короткого времени положение угла установки фотоэлектрического модуля к горизонту, проводя при этом прямые измерения тока и напряжения модуля при изменении нагрузочного сопротивления [10]. При увеличении освещенности солнечной батареи, вырабатываемый ток увеличивается в прямой зависимости и легко рассчитывается.

Для расчетов вырабатываемой мощности солнечной фотоэлектрической батареи используется известная формула [6]:

$$P_{бат.} = E_o \eta_{эл.} S_{бат.} F \cos \alpha_o \qquad (1)$$

где $\eta_{эл.}$ – КПД элементов;

E_o – солнечная освещенность;

$S_{бат.}$– суммарная площадь солнечной элементов фотоэлектрической батареи;

F – фактор, учитывающий особенности солнечной батареи (заполнении элементами и возможную деградацию её параметров);

α_o – суммарный угол между нормалью к плоскости модуля и солнечными лучами.

Следовательно, по формуле (1) можно рассчитывать теоретические мощностные характеристики фотоэлектрического модуля.

По полученным экспериментальным данным, угол наклона модуля по отношению к падающим солнечным лучам сильно влияет на показатели солнечных батарей, в результате изменяются энергетические и мощностные характеристики модуля. В таблице 1 показаны усреднённые результаты исследования, проводимого в течение 2017-2018 годов на кафедре «Возобновляемые источники энергии и электрические системы и сети» Севастопольского государственного университета Института ядерной энергии и промышленности на полигоне лаборатории «Возобновляемые источники энергии».

Для исследований использовался монокремниевый модуль ISM-50. Мощность модуля при стандартных условиях 50 Вт, ток в рабочей точке 3 А при напряжении 17 В, ток короткого замыкания ($I_{к.з.}$) 3,5 А, напряжение холостого хода ($U_{х.х.}$) 22 В.

Теоретические значения тока к.з. и мощности модуля рассчитывались в зависимости от солнечной освещенности по формуле (1).

Экспериментальные характеристики тока, напряжения и мощности выполнялись методом прямых измерений тока и напряжения, при заданном нагрузочном сопротивлении.

Как видно из таблицы 1 экспериментальные значения мощности фотоэлектрического модуля сильно отличаются от теоретически значений при углах падения лучей уже около 60-70° по отношению к рабочей поверхности модуля.

Таблица 1. *Различие теоретических и экспериментальных данных для ISM-50*

Параметры	Характеристики фотоэлектрического модуля ISM-50										
Угол установки модуля	-5°	5°	15°	25°	35°	45°	55°	65°	75°	85°	95
$I_{к.з}$(А) – теор. знач.	2,1	2,5	2,8	3,1	3,2	3,3	3,2	3,1	2,8	2,5	2,1
$I_{к.з}$(А) – экс. знач.	1,6	2,1	2,6	2,9	3,2	3,3	3,2	2,9	2,6	2,1	1,6
I_{max}(А) – экс. знач.	1,3	1,9	2,4	2,7	2,8	2,7	2,8	2,7	2,4	1,9	1,3
U_{max}(В) – экс. знач.	10	12	14	14	15	16	15	14	13	12	10
P_{max}(Вт) – экс. знач.	13	23	33	38	42	43	42	38	33	23	13
P_{max}(Вт) – теор. знач.	28	33	38	41	43	44	43	41	38	33	28
Данные получены при освещенности 870 Вт/м^2											

При измерениях рабочая поверхность модуля изначально была сориентирована перпендикулярно Солнцу, что соответствовало углу установки 45° [8].

Затем измерения проводились при изменениях угла подъема фотоэлектрической панели относительно поверхности земли. Измерения проводились в ясный солнечный день, показания освещенности соответствовало постоянному значению 870 Вт/м2, измерялись ток и напряжение в рабочей точке, а также ток $I_{к.з.}$. Данные в таблице 1 получены для конца марта (дни весеннего равноденствия) на широте Севастополя (44,6° с.ш.). Максимальное значение солнечной освещенности и энергетических показателей модуля для этого времени года соответствует приблизительно углу установки в 45-50° от горизонтальной поверхности [7].

На рис. 1 и 2 приведены теоретические и экспериментальные значения различных параметров фотоэлектрических модулей в зависимости от угла установки.

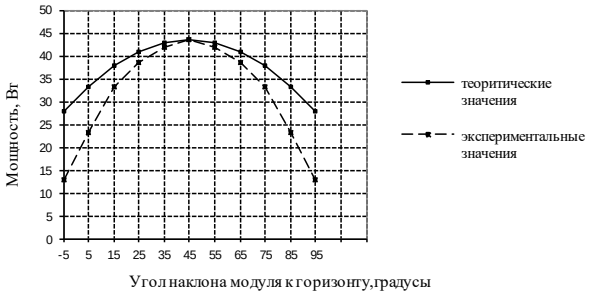

Рис. 1. Зависимость изменения выходной мощности фотоэлектрического модуля ISM-50 при изменении угла наклона модуля к горизонту.

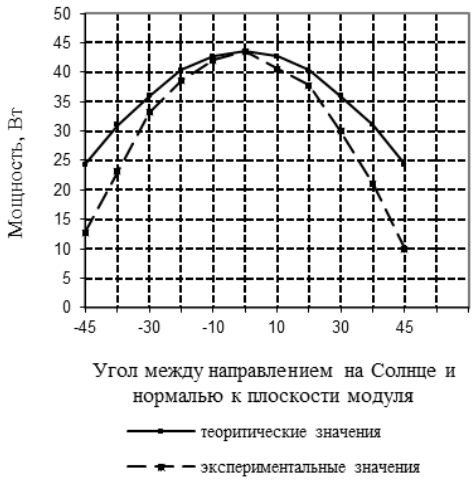

Рис. 2. Зависимость изменения и падения выходной мощности фотоэлектрического модуля ISM-50 при изменении угла наклона

Экспериментальные данные, полученные для модуля ISM-50, показали различие с теоретическими данными при изменении угла установки плоскости модуля относительно горизонта.

Рассматривая причины несоответствия между теоретическими и экспериментальными данными, предположим, что это несоответствие заключается в конструкциях солнечных модулей, причем эти конструкции могут отличаться для различных выпускаемых серий.

Значение освещенности активной поверхности солнечной батареи вычисляется из формулы (1) и напрямую зависит от косинуса угла падения лучей на рабочую поверхность модуля и плотности потока падающей солнечной радиации [6].

Формула (1) подходит только для расчетов солнечных элементов без просветляющих защитных покрытий при прямом солнечном излучении. Для фотоэлектрического модуля, имеющего поверх элементов несколько видов защитных покрытий, эти формулы необходимо дополнить поправочным коэффициентом. Т.к. каждый тип прозрачного защитного покрытия имеет определенный оптический коэффициент преломления, непосредственно для расчетов фотоэлектрических модулей, вместо формулы (1.1) целесообразно использовать формулу:

$$P_{бат.} = E_o \eta_{эл.} S_{бат.} F \cos\left(\mathrm{K} \cdot \alpha_o\right) \qquad (1.1)$$

где K – суммарный коэффициент ослабления светового потока, зависящий от конкретной конструкции и количества защитных покрытий модуля;

α_o – начальный гол падения лучей на рабочую поверхность фотоэлектрического модуля (угол между нормалью к плоскости модуля и направлением падения лучей).

Коэффициент отвечает за ослабление солнечной интенсивности, при прохождении солнечных лучей через защитные покрытия модуля.

Отсюда можно сделать вывод, что в отличие от теоретических расчетов, при некоторых значениях K интенсивность солнечного потока в самом модуле ослабевает настолько, что солнечные элементы практически не работают, чем больше защитных покрытий, тем большее влияние на работу модуля оказывает угол установки. При этом защитные покрытия кроме защиты модуля от внешних механических, климатических и др. факторов ограничивают перегрев солнечных элементов.

Коэффициент K зависит от конкретной конструкции модуля, а также от количества и формы защитных покрытий модуля [9].

При использовании фотоэлектрических модулей оптические потери могут резко возрастать, что приводит к падению мощности, это связано с конструкцией защитных покрытий модуля.

В справочниках по проектированию батарей [6] и в самой конструкции модуля ISM-50 защитные покрытия герметически приклеены к солнечным элементам, соответственно при прохождении лучей света через них необходимо учитывать коэффициенты преломления каждого покрытия, коэффициенты формы текстурированных покрытий, микронеровности и деформации поверхностей.

Теоретические значения $I_{к.з.}$ должны прямо пропорционально зависеть от освещенности модуля, но это происходит только при перпендикулярном падении лучей на рабочую поверхность, если же лучи падают под углом [11], то, как показали исследования при некоторых значениях угла установки энергетические характеристики солнечной батареи в несколько раз меньше теоретических значений (табл.1).

В результате изменяются и мощностные характеристики модуля, а соответственно и выработка электроэнергии (табл.2).

Для определения углового коэффициента К воспользуемся графиками зависимости падения мощности от угла наклона (рис. 1 и 2).

Определим теоретическую мощность, используя формулу (2):

$$P_{бат.} = E_o \eta_{эл.} S_{эл.} \cos\left(\mathrm{K} \cdot \alpha\right) \qquad (2)$$

$\text{при}(\alpha = 0) \Rightarrow \cos\left(\mathrm{K} \cdot \alpha\right) = 1$ формула принимает вид:

$$P_{бат.\max} = E_o \eta_{эл.} S_{эл.} \qquad (2.1)$$

Сравним её с экспериментальными значениями, приведенными в таблице 2.

Из расчетов получаем, что коэффициент К составляет приблизительно от 1 до 1,5, в зависимости от материала защитного покрытия модуля.

Зная основные усреднённые данные для модуля ISM-50 за разные месяцы года, можно судить о работе солнечной батареи при различном угле наклона.

Эти зависимости могут быть широко использованы для практических целей при проектировании стационарных систем солнечного электроснабжения [6].

Таблица 2 *Зависимость изменения характеристик модуля от углов установки*

Параметры	Характеристики фотоэлектрического модуля ISM-50										
Угол установки модуля	-5°	5°	15°	25°	35°	45°	55°	65°	75°	85°	95°
Угол α	50°	40°	30°	20°	10°	0°	10°	20°	30°	40°	50°
$I_{к.з}$(А) – теор. знач.	2,09	2,49	2,815	3,055	3,2	3,25	3,2	3,055	2,815	2,49	2,09
cosα	0,634	0,766	0,866	0,94	0,985	1	0,985	0,94	0,866	0,766	0,634
cosKα	0,294	0,531	0,689	0,885	0,965	1					
α°	50	40	30	20	10	0					
K·α°	73-75	57-60	45-47	30-32	15	0					
P_{max}(Вт) – экс. знач.	12,8	23,1	33,15	38,5	42	43,5	42	38,5	33,15	23,1	12,8
P_{max}(Вт) – теор. знач.	27,97	33,32	37,67	40,89	42,85	43,5	42,85	40,89	37,67	33,32	27,97
Данные получены при освещенности 870 Вт/м^2											

Установка системы ориентации, исходя из данных приведенных в таблице 2, способна повысить выработку электроэнергии фотоэлектрической батареей в 1,5-2 раза, в отличие от теоретических данных, в которых говорится о том, что система ориентации способна поднять производительность солнечной батареи на 30 % [6],

Выводы

В результате проведенных исследований экспериментальным путем был определен коэффициент К, влияющий на падение мощности солнечной радиации на рабочую поверхность кремниевых фотоэлементов при прохождении через просветляющие защитные покрытия фотоэлектрического модуля. Этот коэффициент, согласно формуле (2) отвечает за падение мощностных характеристик солнечных батарей.

При прохождении потока солнечной радиации через защитные покрытия серийного фотоэлектрического модуля ISM-50, при некоторых углах падения лучей было заметно существенное уменьшение вырабатываемой мощности. При проектировании солнечных электростанций необходимо учитывать показанные факторы, влияющие на выработку электрической энергии.

Анализируя полученные данные по известной формуле (1) видно, что они значительно отличаются от теоретических расчетов, полученных с учетов фактора ослабления светового потока. Поэтому при использовании для расчетов формулы (2) и значений коэффициентов коэффициент К для конкретного типа фотоэлектрических модулей, можно значительно повысить точность вычислений выработки электроэнергии солнечными станциями.

Список литературы

1. Кривцов А. М. Неисчерпаемая энергетика. Ч. 3. Солнечная электроэнергетика / [А. М. Кривцов и др.]. – Киев, 2007. – 385 с.
2. Стребков Д. С. Концентраторы солнечного излучения / Д. С. Стребков, Э. В. Тверьянович; под ред. академика РАСХН Д. С. Стребкова. – М.: ГНУ ВИЭСХ, 2007. – 316 с.
3. Вольф М. Кремниевые солнечные элементы / М. Вольф. – Солнечная энергетика; пер. с англ. – М.: Мир, 1999. – С. 195 - 231.
4. Андреев В. М. Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения / Андреев В. М., Грилихес В. А., Румянцев В. Д. – Л: Наука, 1989. – 405 с.
5. Фотоэлектрические приборы. Часть 1. Измерение фотоэлектрических вольтамперных характеристик (МЭК 904-1-87): ГОСТ 28977-91. [Введ. 19.04.91]. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2004. – 56 с. – (Национальный стандарт России).
6. Раушенбах Г. Справочник по проектированию солнечных батарей / Г. Раушенбах. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 397 с.
7. Кувшинов В.В. Использование фотоэлектрической установки для обеспечения бесперебойной работы автономных потребителей /Е.Г. Какушина, Д.А. Чванова// Энергетические установки и технологии – 2016. Т. 2. № 1. С. 62-67.
8. Кувшинов В.В. Возможности повышения мощностных характеристик солнечных установок при выработке тепловой и электрической энергии с одной приемной поверхности / Е.Г. Какушина // Энергетические установки и технологии – 2016. Т. 2. № 3. С. 45-50.
9. Кувшинов В.В. Использование термофотоэлектрических установок для обеспечения тепловой и электрической энергией Севастополя / Е.Г. Какушина, А.Д. Васильев, А.А. Горецкий // Энергетические установки и технологии – 2016. Т. 2. № 3. С. 51-57.
10. Кувшинов В.В. Исследование сезонной работы промышленного фотоэлектрического модуля PS 250 / Е.Г. Какушина, Д.Д. Смирнова // Энергетические установки и технологии – 2017. Т. 3. № 1. С. 47-50.
11. Кувшинов В.В. Прозрачные защитные покрытия

для комбинированных солнечных установок/ Е.Г. Какушина, Косий А.Г.// Энергетические установки и технологии – 2017. Т. 3. № 3. С. 73-78.

References

1. Krivtsov A.M. Inexhaustible energy. Part 3. Solar power engineering /A. M. Krivtsov, etc. // Kiev - 2007. p. 385.
2. Strebkov D. S. The Concentrators of solar radiation / D. S. Strebkov, E. Tver'yanovich// under the editorship of academician RAAS D. S. Strebkova. M. GNU RECA. - 2007. p. 316.
3. Wolf M. Silicon solar cells / M. Wolf// Solar energy; per.from English. M. World. - 1999. pp. 195 - 231.
4. Andreev V. M. Photoelectric conversion of concentrated solar radiation / V. M Andreev., V. A Griliches, V. D. Rumyantsev// L. Science. - 1989. p. 405.
5. Photovoltaic devices. Part 1. Measurement of photovoltaic current-voltage characteristics (IEC 904-1-87): GOST 28977-91. [Introduction 19.04.91]. – M. IPK Publishing house of standards. - 2004. p. 56.
6. Rauschenbach G. Guide for the design of solar panels / G. Rauschenbach.// M. Energoatomizdat. - 1983. p. 397.
7. Kuvshinov V.V. Use of photovoltaic plant to ensure the smooth operation of Autonomous consumers / E. Kakushina, D. Chvanova // Journal of Sevastopol national University. - 2016. Vol. 2. No. 1. pp. 62-67.
8. Kuvshinov V.V. Opportunities to improve the energy characteristics of solar plants in the production of thermal and electrical energy from one receiving surface / E. Kakushina // Journal of Sevastopol national University. - 2016. Vol. 2. No. 3. pp. 45-50.
9. Kuvshinov V.V. The use of thermo-photovoltaic plants to provide thermal and electrical energy of Sevastopol / E. Kakushina, A. Vasiliev. A. Goreckii // Journal of Sevastopol national University. - 2016. Vol. 2. No. 3. pp. 51-57.
10. Kuvshinov V.V. Investigation of seasonal operation of industrial photovoltaic module PS 250/ E. Kakushina, D. Smirnova // Journal of Sevastopol national University. - 2017. Vol. 3. No. 1. pp. 47-50.
11. Kuvshinov V.V. Transparent protective coating for a combined solar installations / E. Kakushina, A. Kocii // Journal of Sevastopol national University. - 2017. Vol. 3. No. 3. pp. 73-78.

УДК 621.315.6.001.42

Диагностика технического состояния высоковольтного оборудования путем измерения характеристик частичных разрядов

Е.Г. Малюк[1], О.Н. Титаренко[2]
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,
ул. Курчатова, 7, г. Севастополь, 299015, Россия, [1]evmalyuk@mail.ru, [2]plotnykova198608@mail.ru ,

Статья поступила 28.01.2019 г.; после доработки 31.01.2019 г.

Аннотация

В статье дан краткий обзор основных положений и современных способов измерения сигналов частичных разрядов в кабельных линиях. Рассмотрены основные проблемы, возникающие при эксплуатации кабелей 6-10 кВ распространенных конструкций и особенности диагностики их технического состояния при вводе в эксплуатацию и в процессе эксплуатации в пределах назначенного ресурса и при превышении календарного срока эксплуатации.

Ключевые слова: электроэнергетика, энергоэффективность, электрическая сеть, кабельные линии, диагностика технического состояния кабелей, измерение частичных разрядов.

The diagnosis of technical condition of high voltage equipment by measuring partial discharges

E.G Malyuk[1]., O.N Titarenko[2].
Federal state autonomous establishment of higher education «Sevastopol State University» Kurchatova Street, 7, Sevastopol, 299015, Russia, , [1]evmalyuk@mail.ru [2]plotnykova198608@mail.ru ,

The article was received on 28.01.2019 y.; after improvement 31.01.2019y.

Abstract

The article provides a brief overview of major provisions and modern ways of measuring partial discharge signals in the cable lines. Examined the main problems arising from the operation of cables 6-10 kV common constructs and features of their technical condition Diagnostics during commissioning and during operation within the assigned resource, and if it exceeds calendar life.

Keywords: electricity, energy efficiency, electric network, cable lines, diagnosis of technical condition of cables, measurement of partial discharges.

Введение

Современная энергетика в развитых странах создавалась в основном во второй трети 20 века. При нынешнем состоянии энергетики в развитых странах в том числе и в России, когда от 40 до 50 % основного силового оборудования в электроэнергетике выработало свой ресурс [3], основной задачей диагностики, исключая аварийные ситуации, становится продления срока службы силового оборудования включая кабельные линии электропередачи, вплоть до полной выработки его реального ресурса (физического износа исключающего его дальнейшую использование по прямому назначению). При этом на первый план выходят методы диагностики, кото-

рые обеспечивают контроль технического состояния оборудования и кабельных сетей на месте их установки, под рабочим напряжением и желательно, в процессе нормальной эксплуатации.

Основным вопросом, на который должна ответить диагностическая система является возможность или невозможность дальнейшей безопасной эксплуатации силового оборудования и кабельных сетей и обеспечения заданного качества электроснабжения потребителей.

Одним из перспективных и развивающихся методов диагностики технического состояния силового электрооборудования и кабельных сетей является метод контроля состояния высоковольтной изоляции по характеристикам частичных разрядов (ЧР), возникающих задолго до полного пробоя изоляции.

Этот метод позволяет выявлять дефекты изоляции на самых ранних стадиях их возникновения, отслеживать динамику их развития, оценивать техническое состояние изоляции и возможность дальнейшей эксплуатации электрооборудования и отдельных кабелей

Постановка цели научной работы

Данное исследование представляет собой обзор основных положений и современных способов измерения сигналов ЧР, их перспективы в части продления ресурса кабельных сетей.

В статье рассмотрены основные проблемы, возникающие при измерениях ЧР и требования к аппаратуре способной эффективно функционировать при выполнении диагностики изоляции.

Механизм возникновения и определение частичных разрядов

Электрические разряды в твердой и жидкой изоляции, не приводящие к перекрытию или пробою межэлектродных промежутков, классифицируются как частичные разряды.

Определение частичных разрядов даны в Международном Стандарте IEC 6027 [2] и ГОСТ 20074 [2] : **Частичным разрядом (ЧР) называется локальный электрический разряд, который шунтирует только часть изоляции в электроизоляционной системе.**

ЧР является результатом возникновения локальных концентраций электрической напряженности поля в изоляции, превышающей электрическую прочность изоляции в отдельных местах, вызванную неоднородностью структуры диэлектрика, то есть наличием в диэлектрике включений с диэлектрической проницаемостью меньшей, чем у основной изоляции.

Механизм образования и развития ЧР рассмотрим, пользуясь схемой замещения изоляционного промежутка с включением рис.1 и диаграммой воздействия на изоляционный промежуток с включением переменного напряжения рис.2.

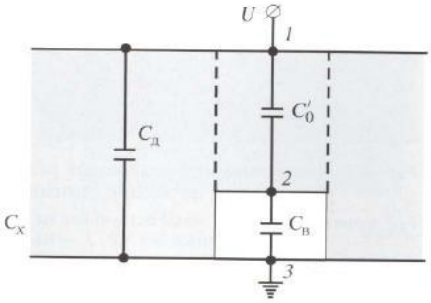

Рис.1. Схема замещения изоляционного промежутка с включением.
U - воздействующее переменное напряжение; $C_в$ - емкость включения; C_0 - емкость столба изоляции между поверхностью включения и электродом; $C_Д$ - емкость оставшейся части изоляционного промежутка; C_x - емкость всего изоляционного промежутка.

Согласно схемы имеем:

$$C_x = \frac{C_Д + C_0 C_в}{(C_0 + C_в)}.$$

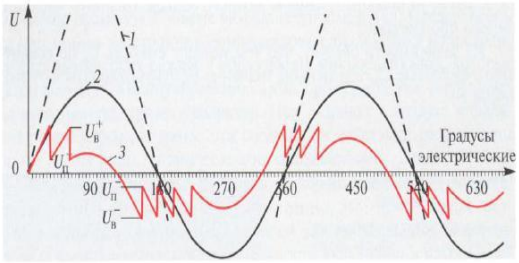

Рис.2. Диаграмма, иллюстрирующая возникновения ЧР при различных режимах воздействующего переменного напряжения на изоляционный промежуток с включением.
1 – напряжение, воздействующее на изоляционный промежуток;
2 – напряжение, воздействующее на включение без образования ЧР;
3 – напряжение, воздействующее на включение при образовании ЧР.
$U_в^+, U_п^+$ - соответственно напряжения возникновения и погасания разряда на положительной полуволне;
$U_в^-, U_п^-$ - то же на отрицательной полуволне.

Под действием переменного напряжения, приложенного к диэлектрику, происходит его поляризация и на поверхности включения фор-

мируется слой связанных с молекулами диэлектрика зарядов, плотность зарядов изменяется по тому же закону, что и приложенное к диэлектрику напряжение и соответственно изменяется напряженность электрического поля во включении.

При определенном напряжении во включении, когда напряженность поля во включении $E_{\text{в}}$ достигает уровня электрической прочности $E_{\text{пр}}$ диэлектрика включения, в нем произойдет электрический разряд, т.е. выполнится условие:

$$E_{\text{в}} \geq E_{\text{пр}}$$

Процесс разрядов во включении при воздействии переменного напряжения можно представить, используя диаграмму (см. рис.2).

Рассматривается случай, когда напряжение на изоляционный промежуток подается с нуля, начиная с положительной полуволны. При достижении на включении напряжения $U_{\text{в}}^{+}$ и соответственно напряженности поля $E_{\text{в}}$, равной или превышающей электрическую прочность диэлектрика включения $E_{\text{пр}}$, происходит разряд во включении. Процесс разряда достаточно быстрый: от 10^{-9} до 10^{-10} с.

После окончания первого акта процесса разряда напряжение на включении $U_{\text{п}}^{+}$ не будет равно 0 (или потенциалу «земли», кривая 3 на рис.2), так как канал разряда имеет некоторое сопротивление, зависящее от многих факторов, и осевший заряд будет снижать результирующее напряжение на включении. Напряжение на включении после завершения первого акта процесса разряда увеличится до $U_{\text{в}}^{+}$ и процесс разряда повторится. При этом процесс разряда, как правило, происходит в другом месте во включении, где напряжение достигает значения $U_{\text{в}}^{+}$. Дальнейший рост напряжения на включении не достигает значения $U_{\text{в}}^{+}$ и не способствует образованию очередного разряда, и оно будет изменяться согласно воздействию напряжения на изоляционный промежуток (см. рис.2, кривая1), переходя на отрицательную полуволну.

Напряжения $U_{\text{в}}^{+}$ и $U_{\text{п}}^{+}$ при каждом разряде могут иметь различные значения. В рассматриваемых случаях мы их считаем неизменными. Как следует из диаграммы, напряжение на включении при разрядах (см.рис.2, кривая 3) имеет меньшее значение, чем если бы оно было при их отсутствии (см. рис.2, кривая 2).

После достижения на включении напряжения $U_{\text{в}}^{-}$, произойдет разряд, процесс ЧР будет повторяться до тех пор, пока напряжение на включении не станет меньше $U_{\text{в}}^{-}$. Затем напряжение будет изменяться согласно воздействующему на включение напряжению (см. рис.2, кривая 2) с переходом на положительную полуволну. В дальнейшем процесс ЧР будет продолжаться по той же схеме, если не изменяться воздействующие условия.

Минимальное число разрядов, возникающих на амплитуде напряжения во включении, в одном периоде в идеальном случае сохранения условий образования ЧР составляет 4.

В реальных конструкциях силового высоковольтного оборудования, периодически повторяющиеся частичные разряды вне зависимости от причины возникновения локального дефекта методично разрушают высоковольтную изоляцию, приводя к науглероживанию зоны вокруг дефекта.

Это «скрытый» период развития дефекта. Развитие зоны дефекта рано или поздно приводит к дуговому пробою всего изоляционного промежутка.

Обычно разрушение изоляции под действием частичных разрядов происходит достаточно долго: в течение многих месяцев и даже лет [1].

По этой причине регистрация частичных разрядов, оценка их амплитуды и повторяемости, что эквивалентно определению мощности частичных разрядов, является эффективным способом выявления дефектов в высоковольтной изоляции на ранних стадиях развития.

По своей чувствительности этот метод диагностики не имеет себе равных, естественно, что при этом должна быть обеспечена надежная отстройка от внешних электромагнитных помех.

Основные параметры частичных разрядов

Все стандарты по частичным разрядам базируются на методическом понятии — «кажущийся частичный разряд».

Под «кажущимся частичным разрядом» понимают такой заряд, который необходимо мгновенно подать извне в изоляцию исследуемого оборудования, чтобы восстановить внутреннее электромагнитное равновесие в изоляции, нарушенное возникновением внутреннего частичного разряда в зоне дефекта.

Регистрируемый импульс, который коррелируется с импульсом «частичного разряда», имеет связь с параметрами произошедшего внутри реального разряда, практически полностью сформирован внутренними электромагнитными параметрами контролируемого объекта, особенно в зоне дефекта.

На параметры регистрируемого прибором импульса оказывают влияние не только сам разряд в изоляции, но и многие другие факторы: геометрические размеры объекта, его внутренние электромагнитные связи, индуктивности, емкости, место возникновения дефекта, удаление первичного датчика от зоны дефекта и т.д. [2].

Таким образом, корректным параметром, достаточно достоверно описывающим частичный разряд («кажущийся частичный разряд»), является пикокулон (рК — единица заряда). Этот параметр соответствует амплитуде импульса частичного разряда Q_i [4].

Следующим важным понятием является частота импульса частичного разряда.

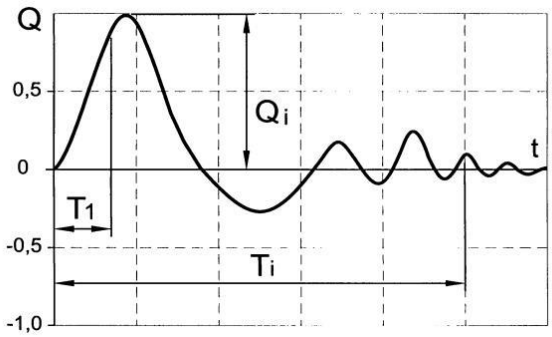

Рис. 3. Основные параметры единичного частичного разряда.

Принято считать, что истинная частота импульса частичного разряда максимально достоверно определяется только параметрами переднего фронта импульса (см. рис. 3), что полностью соответствует математическому выражению:

$$F = \frac{1}{4T_1}$$

Согласно этому выражению, величину «длительности одного периода импульса частичного разряда» можно определить как длительность переднего фронта импульса, умноженная на четыре [4].

Кроме того важным параметром характеризующим ЧР является общая «длительность импульса частичного разряда T_i». Принято считать, что импульс частичного разряда можно считать завершившимся в тот момент времени, когда его амплитуда станет меньше значения в 10% от максимальной амплитуды данного сигнала. Ограничение это вызвано возможностью достоверного определения сигнала на фоне помех.

Таким образом, можно сказать, что каждый импульс частичного разряда характеризуется тремя параметрами [2].

Это:

– «*Q*» — величина кажущегося заряда, количественно пропорциональная максимальной амплитуде импульса;
– - «*F*» — частота импульса частичного разряда, количественно обратно пропорциональная длительности первого фронта импульса, умноженной на четыре;
– - «*T*» — длительность импульса частичного разряда, определенная по уровню 10% от максимального значения импульса.

В качестве энергетического параметра частичных разрядов принят параметр, который чаще всего называют «Partial Discharge Intensity» - «PDI» - интенсивность частичных разрядов. В этом параметре вместо мгновенного напряжения в момент прохождения импульса частичного разряда берется его действующее значение, т.е. принимается одинаковое напряжение для всех импульсов, а не персональное для каждого. Параметр «PDI» является одним из основных, используемых для оценки интенсивности частичных разрядов в контролируемом объекте.

Измерения частичных разрядов в кабельных линиях 6-10 кВ

В изоляции кабельных линий с номинальным напряжением 110 кВ и более, целесообразно применять мониторинг частичных разрядов в режиме «on-line», поскольку результаты мониторинга частичных разрядов могут непосредственно использоваться в информационных системах управления сетями с целью предупреждения аварийных ситуаций и оценке технического состояния изоляции высоковольтных кабельных линий и повышения эффективности использования систем электроснабжения.

Применение непрерывного мониторинга этих сетей экономически оправдано, несмотря на относительно высокую стоимость диагностического оборудования.

Непрерывный мониторинг частичных разрядов в кабельных сетях 6-10 кВ нецелесообразен по экономическим причинам, однако основные потери в электрических сетях связаны с потерями в кабельных сетях напряжением 6-10 кВ и в большинстве случаев они вызваны старением изоляции.

Применение оценки технического состояния кабельных линий напряжением 6-10 кВ путем измерения частичных разрядов в режиме «off-line» позволяет прогнозировать и оценивать динамику процессов деградации изоляции конкретных кабелей и своевременно принимать меры по восстановлению изоляции кабельных линий или замену кабелей в случае нецелесообразности их ремонта.

Измерения частичных разрядов в изоляции, в режиме «off-line», проводятся в основном с использованием высоковольтного источника испытательного напряжения промышленной частоты. Стандартная и часто применяемая на практике схема измерения частичных разрядов в кабельной линии, выведенной из работы, показана на рисунке 4. Эта схема позволяет получать приемлемые по точности результаты практически для любых кабельных линий. Поскольку контролируемый кабель выведен из работы, на него, чтобы выявить в нем наличие частичных разрядов, необходимо подавать испытательное напряжение не меньшее, чем напряжение зажигания частичных разрядов. Для этих целей используется дополнительный высоковольтный источник.

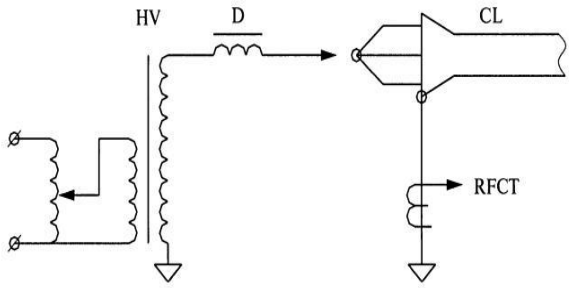

Рис. 4. Схема измерения частичных разрядов в кабельной линии в режиме «off-line».

В измерительной схеме основным датчиком регистрации частичных разрядов является датчик, представляющий собой высокочастотный измерительный трансформатор типа «RFCT», временно монтируемый в цепи заземления экрана кабельной линии.

Если частичные разряды в контролируемой линии будут обнаружены при номинальном напряжении, то следующие измерения производят, постепенно уменьшая напряжение до значения, когда частичные разряды перестанут возникать. Обычно такие дополнительные измерения позволяют более точно локализовать место возникшего в изоляции дефекта.

Данный метод достаточно широко применяется для целей мониторинга технического состояния кабелей, однако он имеет существенные недостатки:

1. Недостаточная точность локации обнаруженных в изоляции кабеля дефектов.
2. Источник высоковольтного напряжения промышленной частоты имеет значительные габариты и вес, что затрудняет использование аппаратуры в полевых условиях.

Метод OWTS (Oscillating Wave Test System) или метод затухающего осциллирующего напряжения предназначен для регистрации частичных разрядов в изоляции и локации места возникновения дефекта в изоляции кабельной линии. Этот метод находит в последнее время все более широкое применение, и не только для диагностики изоляции кабельных линий.

Отличие этого способа регистрации частичных разрядов в изоляции кабельных линий от предыдущего заключается в использовании способа создания переменного испытательного напряжения, прилагаемого к контролируемому кабелю.

Схема установки типа OWTS приведена на рисунке 5. На этой схеме основными элементами являются высоковольтный источник постоянного тока HV, катушка индуктивности L, высоковольтный контактор К и испытываемая кабельная линия CL.

В качестве средства для регистрации частичных разрядов в контролируемом кабеле на схеме показан первичный датчик высокочастотный измерительный трансформатор «RFCT», включенный в цепь заземления экрана.

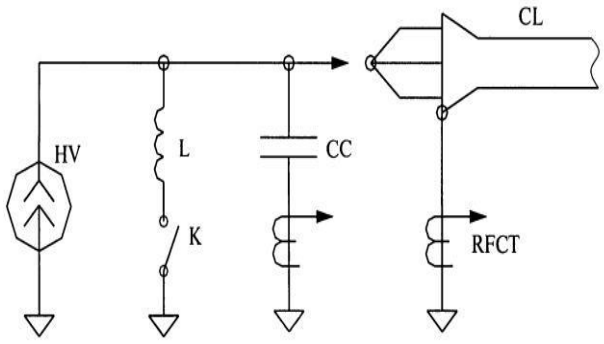

Рис. 5. Схема испытательной установки, работающей по принципу OWTS.

На схеме также показан измерительный конденсатор связи СС, при помощи которого

также можно регистрировать частичные разряды.

Определение технического состояния изоляции может проводиться сразу для изоляции всех трех фаз, как это показано на рисунке, когда все три фазы кабельной линии объединены между собой или поочередно, для каждой фазы отдельно.

Работает представленная на рисунке установка OWTS следующим образом. Емкость кабельной линии заряжается от высоковольтного источника постоянным током небольшой величины порядка нескольких миллиампер. Величина зарядного тока ограничена малой мощностью источника, допускающего даже наличие коротких замыканий в контролируемой кабельной линии. Зарядка кабельной линии CL продолжается до тех пор, пока постоянное напряжение на контролируемой кабельной линии достигнет величины амплитуды испытательного напряжения, которое определяется целью данного опыта. Это время составляет несколько секунд.

Процессы абсорбции зарядов в изоляции, как и другие процессы, приводящие к перераспределению зарядов в изоляции, не успевают стать значимыми, влияющими и искажающими процесс измерения частичных разрядов.

После окончания зарядки емкости кабельной линии и выдержки ее в этом режиме в течение некоторого, тоже короткого интервала времени, производится замыкание высоковольтного контактора К.

При этом накопленный заряд кабельной линии разряжается на землю через индуктивность L, величина которой очень велика, в большинстве используемых в практике приборов она обычно равняется 0,7 генри.

После замыкания контактора измерительная схема включения кабельной линии изменяется. Емкость кабельной линии CL и добавочная внешняя индуктивность L оказываются включенными параллельно, образуя парой классический параллельный колебательный контур.

В колебательном контуре возникают колебания, скорость затухания которых, определяется потерями энергии в индуктивности и в изоляции кабельной линии.

Частота колебаний этого контура определяется соотношением параметров емкости кабельной линии и индуктивности катушки, обычно она составляет от 50 до 1000 герц.

Для «больших» кабелей эта частота обычно ниже. Для небольших кабельных линий, т.е. для сравнительно коротких, эта частот выше, так как емкость таких кабелей меньше. Характер изменения напряжения на контролируемой кабельной линии показан на рисунке 6.

На этом рисунке видно, что частичные разряды, возникающие в изоляции кабельной линии, по мере уменьшения напряжения уменьшаются и исчезают полностью.

Таким образом, при помощи установки типа OWTS определяется наличие частичных разрядов, их интенсивность, фазовое распределение импульсов, напряжение «погасания» частичных разрядов в изоляции кабельных линий [3].

Очень важной диагностической информацией является локация места возникновения разрядов «вдоль кабельной линии». Импульс, возникший в месте дефекта изоляции, движется по кабельной линии в разные стороны. Один импульс движется к тому концу кабеля, к которому подключен датчик и испытательная установка. Второй импульс движется в противоположном направлении, отражается от конца кабельной линии и возвращается обратно. Разность времени прихода импульсов определяется временем движения импульса к противоположному концу кабеля, плюс время движения отраженного импульса до места дефекта [5].

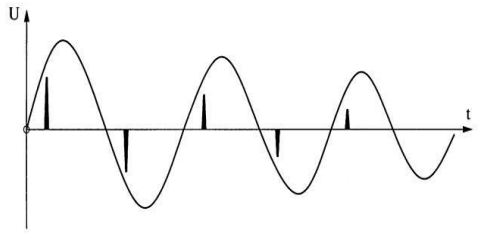

Рис. 6. Затухающие синусоидальные колебания напряжения на испытываемом кабеле и частичные разряды от дефекта в изоляции.

Такая локация места возникновения дефекта в изоляции линии возможна потому, что сразу же регистрируется «первичный» импульс частичного разряда и отраженный, «вторичный» импульс, вернувшийся от противоположного конца кабельной линии.

Достоинством использования установки типа OWTS является сравнительно небольшие габариты, малая потребляемая мощность, относительно высокая точность локации дефектов изоляции и большая практическая эффективность. К недостаткам следует отнести достаточно высокую трудоемкость выполнения работ и необходимость высокой квалификации и большого практического опыта у эксперта, выполняющего оценку результатов измерений.

Заключение

За рубежом и в России активно проводятся поиски методов повышения эффективности электроснабжения потребителей, поскольку наряду с ростом энергопотребления во всем мире наблюдается ужесточение требований к качеству энергоснабжения и в частности к качеству собственно электроэнергии, что вызвано активным внедрением информационных технологий и цифровизацией всех сфер деятельности общества.

Совершенствование эксплуатации сетевыми предприятиями и компаниями силового энергетического оборудования и собственно кабельных сетей, обоснованный переход на эксплуатацию его по техническому состоянию предполагает внедрение более совершенных неразрушающих методов мониторинга состояния высоковольтной изоляции силового оборудования и кабельных сетей.

Метод мониторинга технического состояния кабельных сетей по характеристикам частичных разрядов позволяет оценивать техническое состояние изоляции в момент измерения, а измерение характеристик частичных разрядов с периодичностью, устанавливаемой по результатам предыдущих испытаний, позволяет оценивать динамику развития дефектов в изоляции, вызванных как ее старением, так и другими факторами, влияющими на состояние изоляции.

К проблемам внедрения методов мониторинга частичных разрядов, особенно это касается метода OWTS, относятся трудности нормирования характеристик частичных разрядов, определения их предельных значений для разных типов кабелей, технологические аспекты применения метода (изменение периодичности измерения характеристик частичных разрядов в зависимости от их интенсивности, контроль напряжения возникновения и погасания частичных разрядов и нормирование уровней этих напряжений для разных типов кабелей и т. д.). Исследования направленные на совершенствования метода мониторинга частичных разрядов ведутся во многих развитых странах, что доказывает их перспективность. В России наибольших успехов во внедрении этих методов добились специалисты компании «DIMRUS».

Список литературы

1. Русов В.А. Диагностический мониторинг высоковольтных силовых трансформаторов/ В.А. Русов – Екатеринбург: Издательство УрГУПС, 2015г.- 159с.
2. Русов В.А. Измерение частичных разрядов в изоляции высоковольтного оборудвания/ В.А. Русов – Екатеринбург: Издательство УрГУПС, 2011г. – 367с.
3. Вдовико В.П. Частичные разряды в диагностике высоковольтного оборудования/ В.П. Вдовико – Новосибирск: Наука, 2007. – 155с.
4. Ковригин Л.А., Сидельников Л.Г. Нормирование параметров диагностики силовых кабельных линий. «Кабель-news» октябрь 2016г.
5. Ковригин Л.А., Сидельников Л.Г., Мелехин Д.В. Напряжение возникновения и гашения частотных разрядов в кабелях на среднее напряжение. «Кабель-news» февраль 2010г.

References

1. Russes V.A. Diagnostic monitoring of high voltage power transformers/V.A. Rusov-Ekaterinburg: UrGUPS publishing company, 2015-with 159.
2. Rusov V.A. Measurement of partial discharges in HV equipment isolation/V.A. Rusov-Ekaterinburg: UrGUPS publishing company, 2011. -with 367.
3. Vdoviko V.P. Partial discharges in the diagnosis of high-voltage equipment/V.P. Vdoviko-Novosibirsk: Science, 2007. – with 155.
4. Kovrigin L.A., Sidelnikov L.G. Rationing diagnostic settings power cable lines. “Cable-news” October 2016.
5. Kovrigin L.A., Sidelnikov L.G., Melekhin D.V. Voltage occurrence and clearing frequency discharges in cables for medium voltage. “Cable-news” February 2010

УДК 621.548

Применение концентраторов ветровых потоков в ветроэнергетческих установках

Ю.И. Рясков[1], Н.М. Шайтор[2], А.В. Горпинченко[3]

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская,33, г. Севастополь, 299053, Россия, [1]rjaskoff@mail.ru, [2]shaytor1950@mail.ru, [3]AVGorpinchenko@sevsu.ru

Статья поступила 01.02.2019 г.; после доработки 05.02.2019 г.

Аннотация

Рассматривается применение концентраторов потоков в ветроэнергетике. Приводятся результаты натурных модельных экспериментов по увеличению мощности ветровых двигателей без изменения размеров при использовании конфузоров и диффузоров. Даются практические рекомендации по конструированию (проектированию) конфузоров и диффузоров.

Ключевые слова: ветроэнергетика, ветровой двигатель, энергия ветрового потока, конфузор, диффузор, угол раскрытия конфузора и диффузора, коэффициент использования энергии ветрового потока, коэффициент сужения конфузора, коэффициент расширения диффузора.

The use of hubs of wind flows in wind energy

J.I. Rjaskov[1], N.M. Shaytor[2], A.V. Gorpinchenko[3]

Sevastopol State University,33 Universitetskaya str., Sevastopol, 299053, Russia.
[1]rjaskoff@mail.ru, [2]shaytor1950@ mail.ru, [3]AVGorpinchenko@sevsu.ru

Received 01.02.2019 y.; received in final form 05.02.2019 y._____

Abstract

Explains how to use the hub threads in the wind industry. The results of full-scale model experiments to increase the power of wind engines without resizing when using konfuzorov and diffusers. Provides practical tips for designing konfuzorov and diffusers.

Keywords: wind power, wind energy, wind flow engine, konfuzor, diffuser, diffuser and konfuzora angle, energy utilization factor of wind flow

Введение

В настоящее время для удовлетворения своих энергетических потребностей большинство стран мира активно потребляют органические виды топлива, такие, как уголь, нефть и природный газ, которые являются ограниченным ресурсом, и кроме того, их потребление приводит к загрязнению окружающей среды. Ввиду этого человечество стало больше внимания уделять альтернативным источникам энергии, в частности, возобновляемым источникам энергии (ВИЭ), запасы, которых неисчерпаемы. Они классифицируются по следующему принципу: солнечная энергия, энергия воды (энергия приливов и отливов, энергия рек), энергия ветра, энергия биомассы, биогаза, геотермальная энергия.

Запасы ископаемого топлива в мире распределены крайне неравномерно, что приводит к напряженности между странами. Напротив, в любом регионе мира есть возможность использования различных видов ВИЭ, потенциал которых, в принципе, вполне достаточен для удовлетворения нужд региона.

При использовании энергии от ВИЭ, в подавляющем большинстве случаев, не оказывается вредного влияния на окружающую среду, чего нельзя сказать о традиционных источниках энергии. Например, при использования установленной мощности 500 кВт, в течении 2000 часов в год, будь то ветроэнергетическая установка (ВЭУ), солнечная фотоэлектрическая установка (ФЭУ), малая ГЭС, вырабатывается 1 млн. кВт·ч электроэнергии и тем самым предотвращается по сравнению с угольной электростанцией той же мощности выброс в атмосферу около 1000 т CO_2. [1].

Одним из наиболее развивающихся направлений ВИЭ является ветроэнергетика. В мире в среднем 1,5 % потребляемой электрической энергии вырабатывается с использованием ветроэнергетических установок. Лидирующими государствами в мировой ветроэнергетике являются Китай (98 588 МВт), США (61 108 МВт), Германия (36 488 МВт), Испания (22 970 МВт), Индия (21 262 МВт), Великобритания (11 180 МВт) [2].

Ведущие позиции в Европе по производству электроэнергии с использованием ветроэнергетики принадлежат Германии (32%), Испании (16%), Великобритании (9,6%), Франции (7,3%), Италии (6,3%) и Польше (3,6%). Другие государства ЕС, такие как, Швеция, Португалия, Дания, Нидерланды, Румыния, Ирландия, Австрия, Бельгия, Греция и Финляндия, имеют больше 1-го ГВт установленной мощности.

ВЭУ, в основном, используются для автономного и резервного электроснабжения.

Особенности конструкции современных ветроэлектростанций

Ветроэлектростанции, которым отводится серьезное место в энергетике XXI века, по внешнему виду существенно отличаются от своих древних прародителей - паруса и ветряной мельницы. Однако принцип работы ветроагрегатов практически не изменился: под напором ветра вращается колесо с лопастями, передавая крутящий момент другим механизмам, причем, чем больше диаметр колеса, тем больший воздушный поток оно захватывает и быстрее вращается.

В настоящее время в мире широко распространены ветродвигатели, в основном, двух типов - крыльчатые и карусельные или иначе называемые горизонтально-осевыми и вертикально-осевыми.

Для анализа величины мощности ветродвигателя необходимо обратится к теории идеального ветроколеса [3].

Теория идеального ветроколеса

На рисунке 1 приведена схема прохождения воздушного потока через ветровое колесо. В сечении A — A', бесконечно далеко перед ветроколесом, поток имеет скорость V и поверхность F. В сечении B — B', в плоскости ветроколеса, осевая скорость потока равна $V - v_1$, где v_1 — скорость за ветроколесом; V — скорость перед ветроколесом; ометаемая поверхность — F_1.

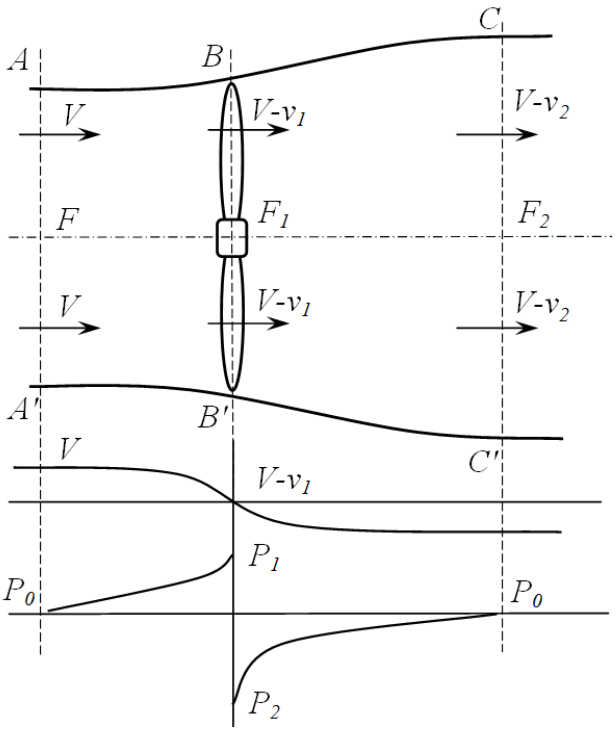

Рис. 1. Схема прохождения ветрового потока через ветроколесо.

В сечении C — C', бесконечно далеко за ветроколесом, скорость составляет $V - v_2$, где v_2 — скорость на достаточном удалении от ветроколеса.

Мощность на валу ветроколеса равна:

$$N = P(V - v_1),$$

где P — лобовое давление, определяемое как:

$$P = \rho \frac{V^2}{2} F_1 B',$$

где ρ — плотность воздуха;

B' — нагрузка на площадь ометаемой поверхности, равная $B' = 2\frac{v_2}{V}$.

Тогда $N = \rho \cdot F_1 \cdot V \cdot v_2 \cdot (V - v_1)$.

Таким образом, мощность идеального ветроколеса прямо пропорциональна площади ометаемой поверхности и квадрату скорости ветрового потока перед колесом.

Применение концентраторов потоков позволяет увеличить мощность ветрового колеса без изменения его размеров.

Концентраторы воздушных потоков

Принято подразделять концентраторы воздушных потоков на следующие типы:

- конфузоры;
- диффузоры;
- комбинированные с применением конфузора и диффузора.

Конфузоры устанавливают перед ветровым колесом. При круглых воздуховодах конфузор имеет вид усечённого конуса, при квадратных — усечённой пирамиды. Движение воздуха в конфузоре характеризуется тем, что динамическое давление в нём в направлении движения потока увеличивается, а статическое — уменьшается. В результате установки конфузора скорость течения воздуха увеличивается.

Переход от большего сечения к меньшему, через плавно сужающийся участок - конфузор - также сопровождается сравнительно большими невосполнимыми потерями полного давления.

Коэффициент сопротивления конфузора с прямолинейными образующими также зависит от угла раскрытия, степени сужения и относительной длины конфузора.

Диффузор устанавливают позади ветрового колеса. Он имеет такую же конструкцию, как конфузор, но в нём происходит расширение потока. При этом перепад статических давлений на диффузоре может быть меньше, чем на участке прямой трубы исходного сечения. Его коэффициент местного сопротивления может быть отрицательным, однако, увеличение длины при постоянном угле раскрытия и при увеличении угла раскрытия диффузора может вызвать отрыв потока от стенок (вблизи них образуются вихри), при этом коэффициент сопротивления диффузора очень сильно возрастает.

Диффузоры используют для изменения структуры потока с целью увеличения располагаемой энергии, скорости и уменьшения давления потока, проходящего через ветроколесо. В связи с этим увеличивается кинетическая энергия потока, которая может быть использована ветродвигателем.

В качестве одной из прогрессивных идей, направленных на повышение экономичности преобразования энергии ветра, рассматривается использование ветродвигателей с диффузорами [4]. Цель — повысить выработку, снизить стоимость и технический риск, связанный в применением ветроустановок. Представляется, что конфузоры наиболее подходят для промышленного получения энергии с помощью больших ВЭУ. Они позволяют существенно повысить выработку энергии установкой без увеличения размеров ветроколеса и других вращающихся механизмов в диапазоне, где из-за динамических нагрузок ветроколеса его стоимость чрезмерно велика.

При преобразовании кинетической энергии установленный диффузор позволяет снизить давления за ветроколесом, больше чем в свободном потоке. Вследствие чего, по мере падения давления за ветроколесом увеличивается масса протекающего через него воздуха. Так как развиваемая мощность пропорциональна расходу воздуха и перепаду давлений, то с применением диффузора, при одинаковой скорости ветра, может быть получена мощность, большая, чем у аналогичной ВЭУ без диффузора.

Углы раскрытия диффузоров обычного типа ограничиваются очень небольшими значениями, вследствие отрыва пограничного слоя на их внутренних стенках, во время быстрого торможении потока. Так как для получения значительного изменения площади обычный диффузор должен иметь большую длину, стоимость его сооружения становится недопустимо велика.

Результаты натурных модельных испытаний концентраторов воздушных потоков

Целью исследований являлось определение рациональных углов раскрытия конфузоров и диффузоров для получения максимальной прибавки мощности ветродвигателя. Кроме этого выяснялось рациональное соотношение входной и выходной площадей при рациональных углах раскрытия конфузора.

Эксперименты производились на одном и том же ветровом колесе при одинаковой скорости ветрового потока и одинаковом расстоянии источника потока до колеса.

В результате натурных модельных испытаний получены зависимости коэффициента усиления мощности ветродвигателя K_N и отношения длины конфузора L к диаметру ветрового

колеса D, от угла раскрытия конфузора φ (табл. 1).

Таблица 1 *Результаты натурных модельных испытаний*

φ^o	20	30	40	50	60	70	80	90
K_N	1,52	1,76	1,71	1,69	1,54	1,39	1,23	1,08
L/D	1,58	1,05	0,79	0,61	0,49	0,41	0,34	0,28

Полученные зависимости в графическом виде представлены на рисунке 2.

Коэффициент усиления K_N - отношение мощности, развиваемой ветродвигателем с конфузором $N_к$, к мощности ветроколеса N того же диаметра и свободном потоке при той же скорости ветра:

$$K_N = \frac{N_к}{N}.$$

Испытания проводились с конфузором, имеющим коэффициент сужения $K_F = 2{,}46$

Коэффициент сужения - отношение входной площади S_1 к выходной площади S_2 конфузора:

$$K_F = \frac{S_1}{S_2}.$$

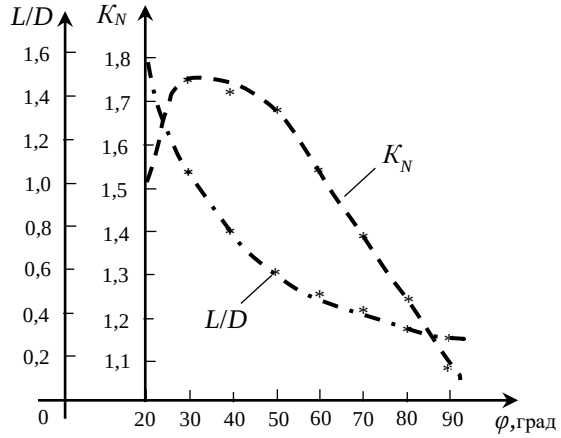

Рис. 2. Графики зависимостей коэффициента усиления мощности ветродвигателя и отношения длины конфузора к диаметру ветрового колеса, от угла раскрытия конфузора.

Анализ внешнего вида полученной кривой коэффициента усиления показывает, что при угле раскрытия равном 90° K_N равен всего лишь 1,08. Это объясняется тем, что коэффициент использования энергии ветрового потока зависит от степени турбулентности пограничного слоя на внутренних стенках конфузора. Чем больше угол падения ветрового потока (т.е. больше угол раскрытия конфузора) к образующей конуса конфузора, тем больше образуется вихрей в пограничном слое, больше степень турбулентности и тем меньше коэффициент использования энергии ветрового потока и, соответственно меньше мощность ветродвигателя.

По мере уменьшения угла раскрытия конфузора от 90°до 50°, K_N линейно увеличивался до 1,69, в связи с уменьшением степени турбулентности пограничного слоя воздуха в конфузоре. Потери напора в конфузорах состоят из потерь на трение и сужение потока.

Коэффициент сопротивления конфузора зависит от угла раскрытия, площади внутренней поверхности конфузора, т.е. длины конфузора. С уменьшением угла раскрытия конфузора от 50° до 30°, рост K_N замедляется и достигает максимального значения 1,76. При уменьшении угла раскрытия конфузора от 30° до 20°, резко увеличивается коэффициент сопротивления конфузора из-за увеличения его длины.

Так как стоимость конструкции быстро растет с увеличением длины конфузора, то наиболее эффективный по стоимости ветродвигатель будет работать при умеренных длинах конфузоров (т.е. умеренных углах раскрытия) и, соответственно, меньших коэффициентах усиления.

В соответствии с [4] оптимальные сотношения L/D с точки зрения экономичности лежат в пределах 0,5 ÷ 1,0. Поэтому рациональными углами раскрытия конфузора следует считать углы, в пределах от 30° до 60°.

На рисунке 3 представлены графики зависимостей коэффициента усиления мощности ветродвигателя K_N и отношения длина конфузора L к диаметру ветрового колеса D, от коэффициента сужения конфузора K_F с углом раскрытия, равным 30° (по данным, приведенным в табл. 2).

Таблица 2 *Результаты натурных модельных испытаний*

K_F	1,5	2	3	4	5	6	7	8
K_N	1,39	1,58	1,97	2,33	2,73	2,54	2,33	2,12
L/D	0,42	0,77	1,36	1,85	2,28	2,69	3,17	3,38

Кривая коэффициента усиления мощности ветродвигателя K_N имеет максимум, равный 2,73, что соответствует коэффициенту сужения $K_F = 5$.

При дальнейшем увеличении коэффициента сужения коэффициент усиления снижается из-за чрезмерной длины конфузора.

Рациональным коэффициентом сужения с точки зрения экономичности следует считать величину, равную 2,5, при которой отношение длины конфузора к диаметру ветрового колеса не более единицы.

Было испытано большое число моделей диффузорных устройств в виде усечённого конуса. В диффузоре по пути движения потока происходит увеличение площадей сечений и, следовательно, уменьшение средних скоростей.

Именно одним из назначений диффузоров является уменьшение скоростей потоков.

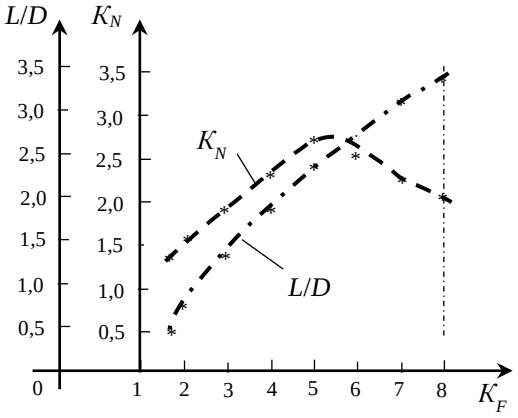

Рис. 3. Графики зависимостей коэффициента усиления мощности ветродвигателя и отношения длина конфузора к диаметру ветрового колеса, от коэффициента сужения конфузора.

Эпюры местных скоростей в поперечных сечениях видоизменяются на протяжении всей длины диффузора. Так как скорости уменьшаются, то в соответствии с уравнением Бернулли, давление по пути движения потока увеличивается, т. е. движение воздуха происходит из области меньших в область больших давлений.

Таким образом, в диффузоре происходит преобразование части кинетической энергии потока в потенциальную энергию давления.

Имеющееся в диффузоре противодавление тормозит движение воздуха, особенно у стенок, где могут возникать вихреобразования с противотоками, а также усиливается турбулентность.

Потери энергии в диффузоре состоят из потерь на трение и на расширение потока. Сюда входят потери на вихреобразование и отрывы потока от стенок.

Диффузор характеризуется углом раскрытия φ и коэффициентом расширения $K_Д$. Чем больше угол раскрытия, тем больше деформации эпюр местных скоростей в сечениях, больше энергии расходуется на расширение потока, больше отрывы потока от стенок, и, соответственно, больше суммарные потери.

Установлено, что в диффузоре по сравнению с конфузором расширение потока в большей мере вызывает турбулентность и вихреобразование, больше отрывы потока от стенок, больше деформации эпюр местных скоростей.

Потери напора в диффузоре больше, чем в конфузоре при одинаковых их геометрических размерах, соотношениях площадей сечений и скоростях.

Эксперименты показали, что при одинаковых геометрических параметрах диффузора и конфузора коэффициент усиления мощности у диффузора примерно в два раза меньше.

Применение диффузоров с так называемым управлением пограничным слоем [4] даёт эффект увеличения коэффициента усиления мощности примерно в два раза по сравнению с диффузором одинаковых геометрических параметров.

Эти диффузоры отличаются наиболее полным подводом воздуха с большим запасом энергии непосредственно у внешних стенок диффузора (см. рис. 4). Отрыв пограничного слоя уменьшается за счёт использования наружного воздуха, обладающего большой энергией для создания струи, направленной вдоль потока и внутренней стенки. Сильное струйное течение возникает в силу того, что в стенках диффузора выполнены две наружные щели, благодаря которым диффузор обеспечивает получение ветродвигателем почти вдвое большей мощности, чем в свободном потоке.

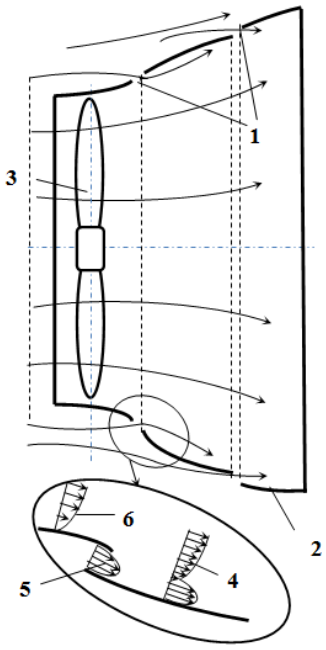

Рис. 4. Структура потока и профили скорости для диффузора с управлением пограничным слоем: 1 – щели; 2 – диффузор; 3 – ветроколесо; 4 – пограничный слой с повышенным запасом энергии; 5 – поток через щель; 6 – количество движения, потерянное пограничным слоем.

Выводы

На основании анализа результатов натурно-модельных испытаний ветродвигателей с концентраторами воздушных потоков установлено следующее:

1. Увеличение мощности ветродвигателя возможно в 2,54 раза, однако при этом необходимо использовать конфузоры (диффузоры) с коэффициентами сужения (расширения) равными 5 ÷ 6.
2. Прибавка мощности ветродвигателей малой и средней мощности без увеличения размеров ветроколеса возможна за счёт установки конфузора или диффузора не более чем в 1,8 раза из-за ограничений экономической целесообразности.
3. Рациональные углы раскрытия конфузоров и диффузоров примерно одинаковы и находятся в пределах 300 ÷ 500, вследствие ограничений по стоимости их изготовления.
4. При одинаковых геометрических параметрах конического диффузора и конфузора, коэффициент усиления мощности ветровой установки с диффузором примерно в 2 раза меньше, чем с конфузором, что требует использования диффузоров с управлением пограничным слоем.

Список литературы

1. Э.Э. Шпильрайн. Институт высоких температур РАН. Проблемы и перспективы возобновляемой энергии в России // Материалы Пятого Международного Форума "Высокие технологии 21 века".
2. Рогозина Д.А., Хворова Т.С., Жиленко Д.М., Макаренко В.А., Грабовецкая К.А., Артамонова Е.Ю. Проблемы и перспективы развития ветроэнергетических установок в России // Молодой ученый. — 2016. — №22.3. — С. 40-43.
3. Е.М. Фатеев. Ветродвигатели и ветроустановки. Второе пераб. издание. Государственное издательство с/х литературы, Москва 1957 г.
4. Д. Рензо. Ветроэнергетика. - М.: Атомэнергоиздат, 1982, с. 143.

References

1. E. E. Shpil'rain. Institute for high temperatures, Russian Academy of Sciences. Problems and prospects of renewable energy in Russia // Proceedings of the Fifth International Forum "High technologies 21".
2. Rogozin, D. A., Khvorov, T. S., Zhilenko, D. M., Makarenko, V. A., Grabovetskaya, K. A., Artamonova, E. Y., Problems and prospects of development of power plants in Russia. Young scientist. - 2016. - №22.3. - P. 40-43.
3. E. M. Fateev. Wind turbines and wind turbines. Second edition. State publishing house of agricultural literature, Moscow 1957
4. D. Renzo. Wind energy. - Moscow: Atomenergoizdat, 1982, p. 143.

УДК 621.3.05

Использование высокотемпературных сверхпроводников как перспективное направление в электроэнергетике

О.Н. Титаренко[1], Е.Г. Малюк[2]
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,
ул. Курчатова, 7, г. Севастополь, 299015, Россия, [1]plotnykova198608@mail.ru , [2]evmalyuk@mail.ru

Статья поступила 15.01.2019 г.; после доработки 17.01.2019 г.

Аннотация

В статье рассмотрены возможности и перспективы широкого использования в электроэнергетике высокотемпературных сверхпроводящих кабельных линий. Указаны преимущества применения и проанализирован опыт использования сверхпроводящих кабелей. Рассмотрена возможность соединения двух подстанций мегаполиса с помощью сверхпроводящей вставки постоянного тока.

Ключевые слова: электроэнергетика, энергоэффективность, электрическая сеть, сверхпроводящие кабельные линии.

The use of high-temperature superconductors as a promising direction in the power industry

O.N. Titarenko[1], E.G. Malyuk[2]
Federal state autonomous establishment of higher education «Sevastopol State University» Kurchatova Street, 7, Sevastopol, 299015, Russia, [1]plotnykova198608@mail.ru , [2]evmalyuk@mail.ru

The article was received on 15.01.2019 y.; after improvement 17.01.2019 y.

Abstract

The article considers the possibilities and prospects of wide use of high-temperature superconducting cable lines in the power industry. Outlines the advantages of application and analyzed the experience of using superconducting cables. The possibility of connecting two substations metropolis using superconducting direct current.

Keywords: electroenergy, energy efficiency, electric network, superconducting cable lines.

Введение

Одним из инновационных решений в области энергетики является использование сверхпроводящих кабельных линий.

Сверхпроводимость – это способность некоторых электропроводящих материалов при низкой температуре обладать нулевым электрическим сопротивлением.

Отсутствие потерь на нагревание при прохождении постоянного тока через сверхпроводник предполагает широкое применение сверхпроводящих кабелей для передачи электроэнергии, так как один подземный кабель небольшого сечения способен передавать мощность, которая традиционным методом требует создания линии электропередач с несколькими кабелями намного большего сечения.

Перспективы развития электроэнергетики предполагают использование кабельных линий, обеспечивающих высокую эффективность передачи электроэнергии, возможность передачи больших мощностей при сравнительно низком напряжении с минимальными потерями.

Применение высокотемпературных сверхпроводящих кабельных линий способствует управляемости энергосистемы, а также дости-

жению экологического и ресурсосберегающего эффекта при передаче и распределении электроэнергии. Исследования электротехнических устройств на основе сверхпроводников, проводимые во многих странах мира показывают, что такие устройства способны работать при охлаждении жидким азотом, который является дешевым и легкодоступным.

Постановка цели научной работы

Задачей исследования является использование высокотемпературных сверхпроводящих кабельных линий постоянного тока, как одного из перспективных направлений развития электрических сетей и энергосистемы в целом.

Преимущества использования сверхпроводящих кабелей в энергетике

Использование сверхпроводимости в электроэнергетике в настоящее время реализуется применением сверхпроводящих кабельных линий [2]. По сравнению с традиционно используемыми, сверхпроводящие кабели имеют ряд преимуществ, основные из которых следующие:

- высокая эффективность в связи со снижением потерь в сверхпроводнике;
- увеличение передаваемая мощность сверхпроводящего кабеля при тех же габаритах;
- увеличение жизненного цикла кабеля в результате замедления процессов старения изоляции;
- отсутствие электромагнитных и тепловых полей рассеяния;
- исключение промежуточных подстанций;
- экологическая чистота и пожаробезопасность;
- возможность передачи больших мощностей при сравнительно низком напряжении.

Более широкое использование высокотемпературных сверхпроводящих кабельных линий (ВТСП КЛ) постоянного и переменного тока позволило бы решить значительную часть проблем электрических сетей.

В электрических сетях возможно создание схемы с применением как ВТСП КЛ переменного, так и линий постоянного тока. Обе системы имеют свои предпочтительные области применения, и в конечном итоге выбор определяется как техническими, так и экономическими соображениями.

ВТСП КЛ переменного тока целесообразны в тех случаях, когда необходима передача больших потоков электроэнергии на распределительном напряжении, а также при замене воздушных линий на кабельные без изменения класса напряжения. При использовании ВТСП КЛ постоянного тока линия становится управляемым элементом сети, способным регулировать потоки передаваемой энергии вплоть до реверса передачи. ВТСП КЛ постоянного тока, выполняя те же функции, что и ВТСП КЛ переменного тока, способны также ограничивать токи короткого замыкания и осуществлять управление потоками мощности, что необходимо для мегаполисов.

Протяженные кабельные передачи возможны только при использовании линий постоянного тока, так как сверхпроводящие кабельные линии переменного тока имеют ограничение по длине вследствие возникновения зарядных токов, которые приводят к снижению мощности на дальнем конце линии.

$$I_з = U\omega C_0 L \qquad (1)$$

где U - фазное напряжение, ω - круговая частота, C_0 - емкость на единицу длины, L - длина линии.

В результате этого длина кабельных линий переменного тока не превышает нескольких десятков километров.

В настоящее время кабельные линии переменного тока широко применяются для построения городских электрических сетей.

В перспективе ВТСП линии переменного тока, которые обеспечивает передачу необходимой мощности на более низком напряжении, а следовательно с меньшим C_0 и с меньшей генерацией реактивной мощности, могут применяться в энергосистемах мегаполисов, при создании непротяженных межсистемных связей, для передачи энергии через водные преграды и др.

ВТСП КЛ постоянного тока имеют ряд дополнительных преимуществ по сравнению с линиями переменного тока:

- ограничение токов короткого замыкания, что позволяет соединить по низкой стороне отдельные секторы энергосистемы без увеличения токов короткого замыкания;
- повышение устойчивости сети и предотвращение каскадных отключений потребителей за счет взаимного резервирования энергорайонов;
- регулирование распределения потоков мощности в параллельных линиях;
- передача мощности с минимальными потерями в кабеле и, как следствие, снижение требований к криогенной системе;

- возможность связи несинхронизированных энергосистем.

Сверхпроводящие вставки между подстанциями в мегаполисах

Анализируя проблемы организации и надежности комплексов электрических сетей и систем электроснабжения мегаполисов, можно выделить следующие особенности энергетических сетей мегаполисов:

- быстрый рост потребления энергии, обычно превышающий средний темп роста потребления по стране;
- высокая плотность энергопотребления;
- наличие энергодефицитных районов;
- разветвленность распределительных электрических сетей;
- секционирование электрической сети с целью уменьшения токов короткого замыкания.

Эти особенности определяют основные проблемы в городских электрических сетях:

- значительные потери электроэнергии в распределительных сетях;
- высокий уровень токов короткого замыкания;
- низкий уровень управляемости электрическими сетями.

В связи с тем, что загрузка подстанций в городе очень неравномерна, так как трансформаторы подстанций в большинстве случаев загружены только на 30–60%, соединение подстанций на стороне среднего напряжения может обеспечить взаимное резервирование энергорайонов и высвободить резервные трансформаторные мощности, что в конечном итоге позволит снизить потери электроэнергии.

Такой тип подключения позволяет использовать свободные мощности для подключения дополнительной нагрузки без необходимости ввода в эксплуатацию новых трансформаторов или строительства новых подстанций и линий электропередачи [3,4].

При наличии вставки между подстанциями (рис. 1) три трансформатора полностью обеспечат электроэнергией присоединенных потребителей при загрузке не более 80 %.

Четвертый трансформатор и питающая его линия могут быть выведены в оперативный резерв, что позволит осуществить подключение дополнительных потребителей и уменьшить потери электроэнергии.

Вставка между подстанциями может быть выполнена как по традиционным технологиям, так и с использованием сверхпроводящих кабельных линий.

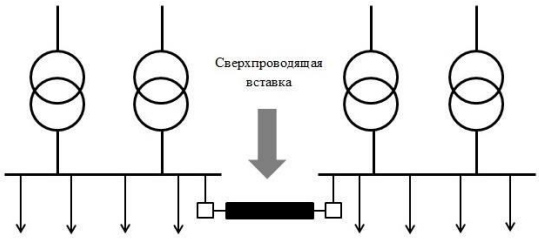

Рис. 1. Возможный вариант схемы соединения двух подстанций.

Так как прямое соединение подстанций может привести к значительному увеличению токов короткого замыкания, приведенную схему станет целесообразно использовать в случае, если вставка будет выполнять две функции: передачу мощности и ограничение токов короткого замыкания.

Поэтому при передаче больших потоков энергии на распределительном напряжении сверхпроводящие линии безусловно имеют преимущества.

Решение задачи создания вставки предполагает большие перспективы по совершенствованию систем электроснабжения мегаполисов.

В настоящее время в мире насчитывается несколько десятков экспериментальных кабельных линий, созданных с целью изучения возможности передачи электроэнергии с использованием эффекта сверхпроводимости протяжённостью не более 1 км.

Разработки ВТСП кабельных линий протяженностью в несколько километров ведутся в Японии, Республике Корея, ЕС и США.

Что касается проектов, обеспечивающих передачу значительной мощности на среднем напряжении между двумя подстанциями при одновременном ограничении токов короткого замыкания, то основными из них являются проект HYDRA, Нью-Йорк, США; проект AmpaCity, Эссен, Германия; проект «Санкт-Петербург», Россия [3].

Зарубежный опыт использования сверхпроводящих кабелей

Использование сверхпроводящих кабелей получило распространение во многих странах мира.

В Китае кабель соединяет подстанцию, оборудованную выпрямителем, с заводом по

производству алюминия. Ток в кабеле достигает 10 кА, напряжение 1,3 кВ, мощность 13 кВт, длина 360 м. Это мировой рекорд по величине тока в действующем длинномерном кабеле.

В США начаты работы по созданию тройной межсистемной связи, объединяющей Восточную, Западную и Техасскую энергосистемы. Связь будет осуществляться ВТСП-кабелями постоянного тока. Общая мощность межсистемной связи равна 5000 МВт.

С точки зрения использования сверхпроводящей кабельной линии между подстанциями также следует выделить несколько проектов. Одним из таких проектов является проект HYDRA, реализованный в Нью-Йорке (США). Его целью является разработка и установка сверхпроводящей кабельной линии переменного тока между двумя городскими подстанциями в Нью-Йорке.

Линия должна обеспечивать связь с высокой пропускной способностью (96 МВА) между подстанциями на стороне вторичной обмотки трансформаторов (13,8 кВ). Кабельная система будет иметь способность ограничивать ток короткого замыкания за счет быстрого перехода в нормально проводящее состояние ВТСП лент второго поколения.

За счет этого обеспечивается низкое значение сопротивления линии в номинальном режиме (сверхпроводящее состояние линии) и переход в состояние с высоким сопротивлением при перегрузке по току.

В этом проекте сочетаются функции передачи большой мощности и ограничения тока в одном устройстве – сверхпроводящем кабеле специальной конструкции. Крупный проект реализуется в западной Европе

Это проект AmpaCity, в г.Эссен (Германия) [1]. Целью проекта является разработка и установка сверхпроводящей передачи переменного тока мощностью 40 МВА между двумя городскими подстанциями.

Передача состоит из сверхпроводящего кабеля длиной 1000 м и токоограничителя на напряжение 10 кВ, включенных последовательно. Эта передача соединяет две подстанции 110/10 кВ внутри городской застройки. Реализация проекта позволит вывести из эксплуатации один трансформатор мощностью 40 МВА и линию 110 кВ.

Использование сверхпроводящего кабеля в таком проекте может стать прототипом для остальных проектов, запланированных в Германии по замене кабелей напряжением 110 кВ на сверхпроводящие кабели напряжением 10 кВ.

Российские проекты использования высокотемпературных сверхпроводящих кабельных линий постоянного тока

Согласно утвержденному в 2016 году Министром энергетики Российской Федерации А. Новаком прогнозу научно-технологического развития отраслей топливно-энергетического комплекса России на период до 2035 года создание электросетевого оборудования на базе недорогих высокотемпературных сверхпроводниковых материалов является одним из приоритетных направлений развития электроэнергетики.

В 2007–2009 годах был разработан и изготовлен первый в России силовой трехфазный ВТСП-кабель длиной 30м, на напряжение 20 кВ и передаваемую мощность 50 МВА. Кабель 3×30 м успешно прошел полный цикл испытаний на полигоне в ОАО «НТЦ Электроэнергетики», обладающем уникальными возможностями для испытания ВТСП-кабелей и другого оборудования под полной нагрузкой. Всесторонние испытания, включающие долговременную работу в режиме перегрузки и испытания на короткое замыкание, проходили с июня 2008 г. по июнь 2009 г. Эти работы создали необходимую базу для успешного выполнения проекта по созданию кабельной линии длиной 200 м, напряжением 20 кВ и передаваемой мощностью 50 МВА. В 2014–2015 гг. установлена ВТСП кабельная линия на подстанции «Белорусская» в Москве для опытной эксплуатации [1].

Федеральная сетевая компания Единой энергетической системы (ФСК ЕЭС), входящая в группу «Россети», на собственном полигоне в Москве завершила ресурсные испытания высокотемпературной сверхпроводящей кабельной линии постоянного тока, являющейся первой в России и крупнейшей в мире. Минэнерго России включило разработки компании в области сверхпроводимости в состав национального проекта.

В России проведены испытания самой длинной в мире сверхпроводниковой линии длиной 2,5 километра. Испытанный с проведением полной имитации рабочего режима опытный образец ВТСП кабельной линии постоянного тока в 2020 году будет введен в эксплуатацию в энергосистеме Санкт-Петербурга и соединит две подстанции – 330 кВ, что повысит надежность электроснабжения города. Проектная документация по внедрению линии получила положительное заключение Главгосэкспертизы РФ.

Проект, реализуемый ФСК ЕЭС, является межотраслевым. Помимо применения в электрических сетях, результаты проекта могут быть внедрены во все энергоемкие отрасли промышленности, транспортные предприятия с большой долей энергопотребления, в нефтехимическом и горнодобывающем секторе. Масштабирование технологий на основе высокотемпературной сверхпроводимости будет способствовать росту энергоэффективности экономики страны.

В мегаполисах использование кабеля позволит осуществлять более гибкую планировку застройки и расположения центров потребления за счет наращивания мощности по мере развития районов без необходимости прокладывания дополнительных кабельных линий, а также значительно понизить класс напряжения при передачи большой мощности.

Россия достигла лидирующих позиций в мире по производству низкотемпературных сверхпроводников и устройств на их основе. В рамках проекта «Сверхпроводниковая индустрия», являющийся частью проекта «Инновационная энергетика» по направлению «Энергоэффективность» созданы основы отечественного производства высокотемпературных проводников. В настоящее время в России налажено опытное производство ВТСП на предприятиях ВНИИНМ (Москва); НИИТФА (Москва); НИИЭФА (С.Петербург) др.

Оценка потерь энергии в сверхпроводящих линиях

В линиях переменного тока среднего напряжения потери электрической энергии возникают в самом кабеле, электрической изоляции и токовых вводах. В линии постоянного тока потери энергии в кабеле и изоляции отсутствуют, но есть потери в преобразовательных устройствах и токовых вводах.

Если проанализировать работу трехфазной линии переменного тока среднего напряжения на передаваемую мощность 100 МВА, то потери энергии на фазу будут состоять из следующих величин:

- электромагнитные потери в жиле кабеля – 1,0–1,5 Вт/м;
- теплопритоки через криостат – 1,5 Вт/м;
- теплопритоки через токовые воды – (200–300 Вт) х 2;
- потери энергии в изоляции – около 0,1 Вт/м.

Общие теплопритоки в холодную зону при длине трехфазной линии 10 км составят 78,5–93,5 кВт. Умножая эту величину на значение коэффициента рефрижерации, равное 20, получим 1,57–1,87 МВА, или менее 2% от передаваемой мощности.

Для аналогичной линии постоянного тока теплоприток в холодную зону ограничивается только теплопритоками через криостат и токовые вводы. В этом случае общие потери энергии в кабеле длиной 10 км с учетом криогенной системы составят 0,31 МВА, или 0,31 % от передаваемой мощности.

Чтобы объективно оценить общие потери в линии постоянного тока необходимо учесть потери в преобразователях, которые составляют 2% от передаваемой мощности. В результате получим потери в ВТСП КЛ постоянного тока длиной 10 км на передаваемую мощность 100 МВт, которые составят не более 2,5 % от передаваемой мощности.

Анализ вышеуказанных значений позволяет сделать вывод о том, что потери энергии в сверхпроводящих кабельных линиях существенно меньше, чем в традиционных кабельных линиях. При увеличении передаваемой мощности процент потерь энергии снижается. При сегодняшнем уровне характеристик материалов возможна передача энергии 150–300 МВт при напряжении 20 кВ и до 1 000 МВт при 110 кВ.

Заключение

В России и промышленно развитых странах мира ведутся интенсивные исследования и разработка новых видов электротехнических устройств на основе сверхпроводников. В связи с открытием высокотемпературных сверхпроводников, не требующих сложных и дорогих охлаждающих устройств, такие разработки стали более интенсивными.

Успешные испытания ВТСП кабельных линий постоянного и переменного тока продемонстрировали высокую эффективность сверхпроводящих линий. Использование ВТСП линий позволит существенно повысить энергоэффективность сетей, уменьшить количество базовых подстанций, обеспечить высокую управляемость энергопотоками и в конечном счете увеличить надежность энергоснабжения потребителей.

В сетевом комплексе внедрение ВТСП кабельных линий позволяет передавать большую мощность на низком напряжении, значительно

уменьшить потери, до 20% снизить затраты на сооружение линий. Использование ВТСП кабельных линий демонстрирует свою эффективность при строительстве кольцевых схем и энергомостов.

Фактически сверхпроводящие линии наилучшим образом подходят для выполнения всех задач, связанных с передачей экологически чистой энергии к удаленным центрам потребления, и являются новой, оптимальной технологией передачи электроэнергии на значительные расстояния.

Внедрение сверхпроводящих линий электропередачи также позволяет передавать электроэнергию от морских и наземных ветропарков и районов, богатых энергией солнца.

Как один из способов повышения общей экономической эффективности проекта создания длинных ВТСП-линий может служить проект создания линии между энергосистемами разных стран, включая возможность использования разницы часовых поясов для передачи дешевой «ночной» электроэнергии из одной энергосистемы в другую.

При современном уровне развития сверхпроводниковой и криогенной техники возможно создание длинных сверхпроводящих кабельных линий постоянного тока для передачи энергии на расстояния в десятки и сотни километров.

Использование сверхпроводниковых технологий позволяет перейти на качественно новый интеллектуальный уровень функционирования электроэнергетической отрасли. Такие сети могут стать реальным прообразом умной сети будущего.

Список литературы

1. Сытников В.Е. Состояние работ по созданию сверхпроводящих кабельных линий в России и в мире. Краткий обзор Энергия единой сети, 2017, № 1(30).
2. Сытников В. Е. Сверхпроводящие кабели и перспективы их использования в энергетических системах XXI века. Сверхпроводимость: исследования и разработки. 2011. № 15.
3. EPRI. Superconducting Power Equipment Technology Watch 2012. Palo Alto, CA, USA, 2012.
4. Сытников В. Е., Копылов С. И., Шакарян Ю. Г., Кривецкий И. В. ВТСП передача постоянного тока как элемент «интеллектуальной сети» крупных городов. Материалы 1-й Национальной конференции по прикладной сверхпроводимости. М: НИЦ «Курчатовский институт», 2013.
5. Волков Э. П., Высоцкий В. С., Карпышев А. В., Костюк В. В., Сытников В. Е., Фирсов В. П. Создание первого в России сверхпроводящего кабеля с использованием явления высокотемпературной сверхпроводимости. Сборник статей РАН «Инновационные технологии в энергетике» под ред. Э. П. Волкова и В. В. Костюка. М.: Наука, 2010.

References

1. Sitnikov B. E. state of the art of cable lines creation in Russia and the world. A brief overview of the unified network Energy, 2017, № 1 (30).
2. Sytnikov V. E. Superconducting cables and prospects of their use in power systems of the XXI century. Superconductivity: research and development. 2011. No. 15.
3. EPRI. Superconducting Power Equipment Technology Watch 2012. Palo Alto, CA, USA, 2012.
4. Sitnikov, V. E., Kopylov S. I., Shakaryan Yu. G., Krivitsky V. I. transmission HTS DC as part of a "smart grid" of large cities. Proceedings of the 1st National conference on applied superconductivity. M: RC "Kurchatov Institute", 2013.
5. Volkov E. P., Vysotsky B. C., Karpyshev A. B., Kostyuk V. V., Sitnikov V. E., Firsov V. P. Creation of the first superconducting cable in Russia with the use of the phenomenon of high-temperature superconductivity. A collection of articles RAS "Innovative energy technologies" ed. by E. P. Volkov and V. V. Kostyuk. M.: Science, 2010.

УДК 621.311.1

Рациональные варианты применения реклоузеров при последовательном секционировании в электрических сетях 6-10 кВ

Н.М. Шайтор[1], Е.Ю. Чернова[2]
ФГАУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33, г. Севастополь, 299053, Россия,
[1]shaytor1950@mail.ru, [2]nikolenko_katyusha@inbox.ru

Статья поступила 13.02.2019г.; после доработки 15.02.2019 г.

Аннотация

В высокотехнологичных интеллектуальных электрических сетях широко применяются реклоузеры, участвующие в принятии решений по коммутации сетей. Рассматриваются рациональные способы расположения реклоузеров при последовательном секционировании, в случаях кратковременных коротких замыканий, автоматических повторных включений и резервирования электроснабжения.

Ключевые слова: система, реклоузер, переходный процесс, электрическая интеллектуальная сеть .

Rational options for the use of reclosers for sequential sectioning in electrical networks 6-10 kV

N.M. Shaytor[1], K.Yu. Chernova[2]
FAEI HE «Sevastopol State University», 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia.
[1]shaytor1950@mail.ru, [2]nikolenko_katyusha@inbox.ru

Received 13.02.2019 y. ; received in final form 15.02.2019 y.

Abstract

In high-tech intelligent electrical networks are widely used reclosers involved in decision-making on switching networks. Discusses rational methods of the location of reclosers with serial partitioning, in cases of transient short circuits, automatic reclosing and redundancy of power supply.

Keywords: systems, recloser, transient, power supply, electrical, intellectual network.

Введение

Самым слабым звеном всей энергоснабжающей системы, на которое приходится около 70% повреждений, является линия 6-10 кВ.

Автоматизация сетей на базе реклоузеров хорошо себя зарекомендовала как за рубежом, так и в отечественной электроэнергетике. Реклоузер – это компактное устройство, устанавливаемое на опорах электропередач и объединившее в себе интеллектуальные технологии (ИТ), релейную защиту и автоматику (РЗА) и коммутационный аппарат (КА). Они имеют измерительную систему для реализации необходимых функций защиты и автоматики, многофункциональную микропроцессорную РЗА, систему самодиагностики и ведения журнала оперативных и аварийных событий сети.

Постановка цели и задач научного исследования

Наиболее проблемными являются системы, предназначенными для работы в аварийных ре-

жимах в воздушных линиях электропередач трехфазного переменного тока частотой 50 Гц, номинальным напряжением 6-10 кВ, с любым режимом работы нейтрали. В таких системах реклоузеры могут использоваться в линии с одним или несколькими источниками питания, в качестве пунктов последовательного секционирования магистрали.

Целью статьи является рассмотрение, анализ и выработка рекомендаций наиболее рациональных способов расположения реклоузеров для надёжного электроснабжения потребителей, при последовательном секционировании в электрических сетях 6-10 кВ, в случаях кратковременных коротких замыканий и необходимости повторных включений, а так же для резервирования при электроснабжении потребителей.

Последовательное секционирование в сети с одним центром питания

Последовательное секционирование предполагает установку одного или двух реклоузеров на магистрали. При коротком замыкании (КЗ) на линии отключается ближайший реклоузер R2, и питание теряют только те потребители, которые подключены к линии ниже отключившегося реклоузера R2, рис. 1.

Такой вариант применения реклоузера позволяет разделить длинную магистраль на участки и уменьшить время поиска и устранения повреждения, а так же повысить надежность электроснабжения потребителей, подключенных к начальному участку линии.

При подключении R1 сокращается зона работы основной защиты, и коэффициент чувствительности должен быть обеспечен только при КЗ в месте установки реклоузера R1, рис. 2. В схеме с одним центром питания для выполнения своих функций реклоузером достаточно иметь максимально-токовую защиту.

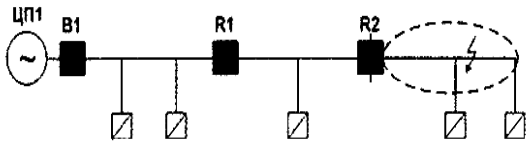

Рис. 1. Последовательное секционирование в сети с одним центром питания.

Если возникает повреждение, ближайший к месту повреждения реклоузер отключается токовой защитой. После чего за определенное время происходит автоматическое повторное включение (АПВ) этого реклоузера. Если за время паузы АПВ повреждение самоустранилось, электропередача линии нормализовалась, и отключенные потребители снова получают питание. В противном случае реклоузер снова отключается токовой защитой. При применении 2-х кратного АПВ происходит второй цикл АПВ с восстановлением электроснабжения, либо отключения реклоузера от защит.

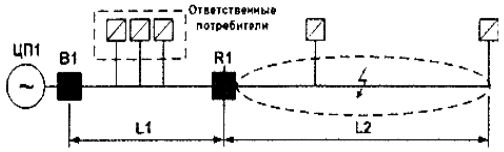

Рис. 2. Повышение надежности потребителя на главном участке линии.

Последовательное секционирование в сети с двумя центрами питания.

Линия 6-10 кВ с двумя центрами питания позволяет обеспечить требуемую надежность электроснабжения потребителей вне зависимости от того, к какому участку линии подключены потребители, за счет автоматического включения резерва (АВР). Для надежного и качественного электроснабжения потребителей разомкнутые электрические сети с двумя центрами питания должны отвечать трем основным требованиям:

– иметь достаточную пропускную способность в аварийные режимы;
– обеспечивать автоматический переход с основного источника питания на резервный;
– центр питания должен быть независимый.

Для этого сеть предусматривает наличие одного АВР - реклоузера R2, который при нормальном режиме отключен, а также несколько реклоузеров для последовательного секционирования магистрали, рис. 3. Реклоузеры R1 и R3 являются пунктами последовательного секционирования магистрали, а реклоузер R2 – пунктом АВР. В случае аварии, например, на точке К1 (рис. 4), происходит отключение выключателя В1 с АПВ для выявления устойчивости этого повреждения.

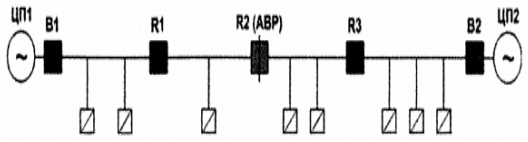

Рис. 3. Последовательное секционирование в сети с двумя центрами питания.

Для контроля наличия напряжения с каждой стороны пункта АВР должны быть предусмотрены трансформаторы или датчики напряжения. При отсутствии напряжения с одной стороны пункта АВР и наличия напряжения с другой, за время выдержки выключается реклоузер.

Особенностью реклоузеров на магистрали с двумя центрами питания является необходимость наличия на них токовых направленных защит с различными уставками. Это объясняется тем, что, например, после срабатывания R2 (АВР) и включения реклоузера R3 (рис. 4), ток К3 может проходить через реклоузер R1.

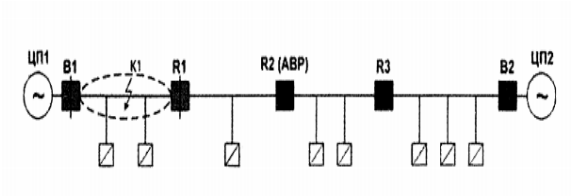

Рис. 4. Автоматическое выделение аварийного участка.

В заключение следует отметить, что это далеко не все возможные варианты применения реклоузеров в воздушных распределительных сетях среднего напряжения.

Реклоузер может также использоваться в качестве головного выключателя на открытых распределительных устройствах и распределительных пунктах. С его помощью можно подключать новые потребители и решать проблемы с субабонентами.

Заключение

Исключительная функциональность РЗА, широкие возможности по диагностике параметров режимов работы сети, способность интегрироваться в любые системы телемеханики позволяют применять реклоузер для решения самых различных задач автоматизации аварийных режимов и управления распределительными сетями.

Рациональными способами расположения реклоузеров в электрических сетях 6-10 кВ, в случаях частых кратковременных коротких замыканий и необходимости повторных автоматических включений, а так же для резервирования электроснабжения потребителей, являются две схемы.

К первой схеме относится последовательное секционирование в сети с одним центром питания при установке одного и более реклоузеров в линии, с повышенной надёжностью электроснабжения потребителей на головном участке линии.

Ко второй схеме относится последовательное секционирование в сети с двумя центрами питания, при установке трех и более реклоузеров в линии, один из которых отключен в исходном состоянии и выполняет функцию автоматического включения резерва, а все другие осуществляют автоматическое выделение аварийного участка.

Список литературы

1. Проблемы и перспективы развития электроэнергетики Крымского полуострова / Н.М. Шайтор // Инновации и наука: проблемы и перспективы: сборник статей Международной научно-практической конференции (21.07.2017г., г.Москва). - М.: Импульс, 2017. С.315-322 [Электронный ресурс] URI: http://impulse-science.ru; https://elibrary.ru/item.asp?id=29787975 (дата обращения 08.09.2017).
2. Руководящие материалы по проектированию электрических сетей (РУМ). Информационно - методическое и нормативно-техническое издание. № 1(555) -2014. ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС». С.9-53.
3. Реклоузеры в системах гибкого электроснабжения города Севастополя. / Е.Ю. Николенко, Н. М. Шайтор // Сборник студенческой научно-технической конференции «Современные проблемы электроэнергетики». [Электронный ресурс] – 2017. URI: http://lib.sevsu.ru:8080 / xmlui/bitstream/handle... Сборник... »

References

1. Problems and prospects of development of the electric power industry of the Crimean Peninsula / N.M. Shaitor // Innovations and Science: Problems and Prospects: a collection of articles of the International Scientific and Practical Conference (July 21, 2017, Moscow). - M .: Impulse, 2017. C.315-322 [Electronic resource] URI: http://impulse-science.ru; https://elibrary.ru/item.asp?id=29787975 (the date of circulation 08.09.2017).
2. Guidance on the design of electrical networks (RUM). Information-methodical and regulatory technical edition. № 1 (555) -2014. OJSC NTC FGC UES. C.9-53.
3. Reclosers in the systems of flexible power supply of the city of Sevastopol. / E.Yu. Nikolenko, N. M. Shaitor // Collection of student scientific and technical conference "Modern problems of electric power industry." [Electronic resource] - 2017. URI: http://lib.sevsu.ru:8080/xmlui / bitstream / handle . Collection ... "

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИТЕМЫ

УДК 37.013.77:621.311.25:331.108.422

Разработка модели формирования самоконтроля в процессе преподавания дисциплины «Электротехника» для будущих специалистов энергетических комплексов

С.В. Гайдук

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299015, Россия. yursvetden@mail.ru.

Статья поступила 22.02.2019 г.; после доработки 26.02.2019 г.

Аннотация

В статье рассматриваются особенности процесса обучения операторов и разработка модели учёта самоконтроля в процессе обучения специалистов для энергетических комплексов.

Ключевые слова: *атомная электростанция (АЭС); система человек-техника (СЧТ); человеческий фактор; умственная модель (УМ); энергетическая система (ЭС); самоконтроль; типовой блок операций (ТБО); обучающая программа.*

The elaboration of model for self-monitoring formation in the electrical engineering training process for energy complexes future operators

S.V. Gaiduk

Sevastopol State University, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia. yursvetden@mail.ru

Received 22.02.2019 y.; received in final form 26.02.2019 y.

Annotation

The article presents the peculiarity of operators training and the elaboration of self-control model in the training process of engineers for energy-producing complexes.

Key words: *nuclear power plant (NPP); system human-tech(SHT); human factor; mind model; energetic system (ES); self control; typical operating block (TOB); teaching program.*

Введение

Современное развитие науки и производства, повышение уровня автоматизации управления, внедрение компьютерных технологий, выдвигает на передний план проблему развития теории обучения операторов систем «человек-техника» **(**СЧТ).

Актуальность этой проблемы все очевиднее подтверждается известными катастрофами и авариями, большая доля причин которых приходится на «человеческий фактор».

По разным оценкам по вине персонала произошло от 15 до 40% всех аварий и от 20 до 80% всех нарушений в работе АЭС [1. с.258].

Такой широкий диапазон обусловлен сложностью унификации и систематизации данных об ошибках и их причинах.

Анализ событий на АЭС

В настоящий момент статистический материал о событиях на АЭС можно получить из Актов расследования событий на АЭС, информационных бюллетеней о «событиях» Inside WANO – это журнал всемирной ассоциации организаций эксплуатирующих АЭС.
Анализ информационных бюллетеней о «событиях» на АЭС показывает, что, например, за март 2007 года из 33-х событий 10 включали в качестве причины человеческий фактор, 5 – нарушение работниками техники безопасности [6, с.1-18].

Анализ процесса обучения операторов системы человек-техника (СЧТ)

В общем плане, обучение профессиональной деятельности операторов систем человек-техника – специфичный *процесс труда*, в котором *субъект труда* (обучающие) взаимодействуют с *объектом труда* (обучаемыми) с использованием *орудий* (средств) *труда*: технических средств обучения, дидактических материалов, программных продуктов, компьютерных обучающих систем и т.д. [5, с.123].

Предмет труда в этом процессе – профессиональная деятельность операторов.

Продукт труда – новое состояние обучаемых, в котором они способны эффективно выполнять свои действия.

Таким образом, обучение операторов – процесс формирования у них знаний, умений и навыков эффективных действий, по выполнению возлагаемых на них функций в системе человек – техника для достижения поставленной перед ней цели в реальных условиях.

Особенностями процесса обучения операторов является:

- в отличие от большинства производственных систем продуктом труда в нем является новое состояние обучаемых;
- цель обучения определяется в зависимости от цели назначения системы человек-техника, следовательно, эффективность обучения оператора связана с эффективностью их действий в реальной среде;
- субъект и объект труда активно взаимодействуют, объединённые общей целью и содержанием обучения;
- орудия труда обучающих и обучаемых тесно перекрываются с фактической системой в части образцов техники, тренажеров, программно-информационных средств.

Моделирование процесса обучения операторов АЭС

Эти особенности необходимо учитывать при моделировании обучения операторов. Основной задачей является моделирование обучения операторов с формированием самоконтроля в процессе обучения специалистов для энергетического комплекса. Самоконтроль – один из важнейших факторов, обеспечивающих самостоятельную деятельность обучаемых. Его назначение заключается в своевременном обнаружении и исправлении ошибок, их предотвращении [2, с.278].

Для адекватного описания и последующей оценки обучения взаимодействие субъекта, объекта и орудий педагогического труда моделируется с учетом характеристик и особенностей его предмета.

Деятельность операторов и функционирование технической составляющей СЧТ взаимно проникают друг в друга, образуя целенаправленную логико-временную взаимосвязь операций при функционировании системы в целом. Эффективность функционирования СЧТ зависит от множества ее свойств, основными из которых являются: безошибочность, быстродействие и точность. К обучению операторов предъявляется ряд требований, одно из которых – непрерывность обучения.

Профессиональная деятельность оператора может быть представлена конечным числом алгоритмов деятельности по решаемым задачам, а каждый алгоритм может быть структурирован на близкие по сложности блоки операций. Освоенному по безошибочности выполнения блоку операций соотносится наличие у оператора умственной модели (УМ) быстрых действий, по точности выполнения – УМ точных действий. Освоенному полностью блоку операций соотносится наличие у оператора УМ безошибочных, быстрых и точных действий. В результате становления навыка профессиональные действия выполняются оператором правильно, быстро и точно. Принято допущение, что эффективность энергетической системы (ЭС) зависит от двух основных свойств: безошибочность и быстродействие. Естественная цель обучения операторов – выработка у них умений и навыков правильного и быстрого выполнения предписанных им функций. При моделировании процесса обучения учитывается следующее:

1. Контроль безошибочности действий оператора с решениями «верно – неверно» может

быть правильным или ошибочным, а контроль времени их выполнения с решениями «быстро – медленно» – только правильным.

2. УМ безошибочных действий может приобретаться, закрепляться или утрачиваться, а УМ времени их выполнения – приобретаться и закрепляться, но не утрачиваться.

Подход к разработке модели обучения специалистов ЭС базировался на методологии аппарата функциональных эргономических сетей [5, с.67], одним из принципов которой является типизация функциональных структур в виде их библиотеки, охарактеризованной в [5, с.127] как *классификация элементов деятельности на уровне функций*.

Пример такой структуры с самоконтролем действий оператора – типовой блок операций (ТБО), приведённый на рис.1.

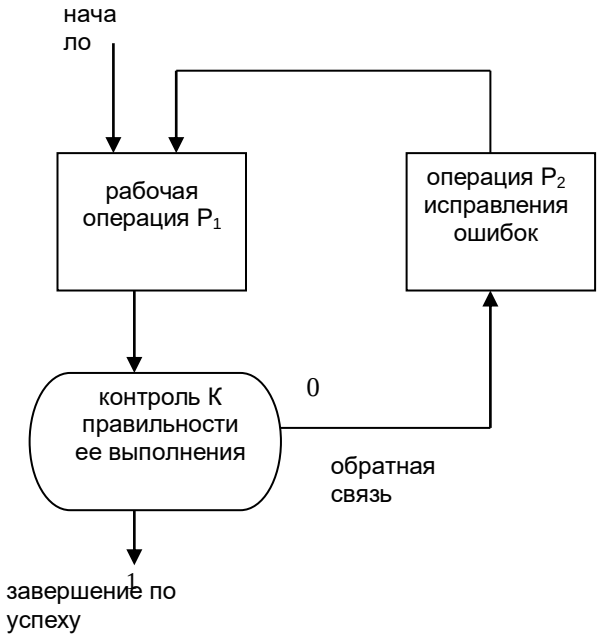

Рис.1. Типовой блок операций.

Для этого ТБО получены формулы расчёта показателей безошибочности и быстродействия [5, с.132].

Анализ показал, что такая модель учёта самоконтроля в операторской деятельности не годится для моделирования процесса обучения операторов по следующим причинам:

- она отображает процесс до первого успеха (при решении «результат рабочей операции правильный» процесс завершается), а обучение предусматривает продолжение процесса до достижения требуемого уровня подготовленности оператора или до израсходования выделенного ресурса времени;
- аналитические зависимости для расчёта показателей качества такой взаимосвязи операций получены для установившегося режима – предельные (при $t \to \infty$), а обучение – это по сути своей переходный, нестационарный процесс;
- при выводе оценочных формул были приняты допущения о неизменности состояния системы и независимости исходных характеристик модели от шага процесса, что неадекватно самому понятию «обучение».

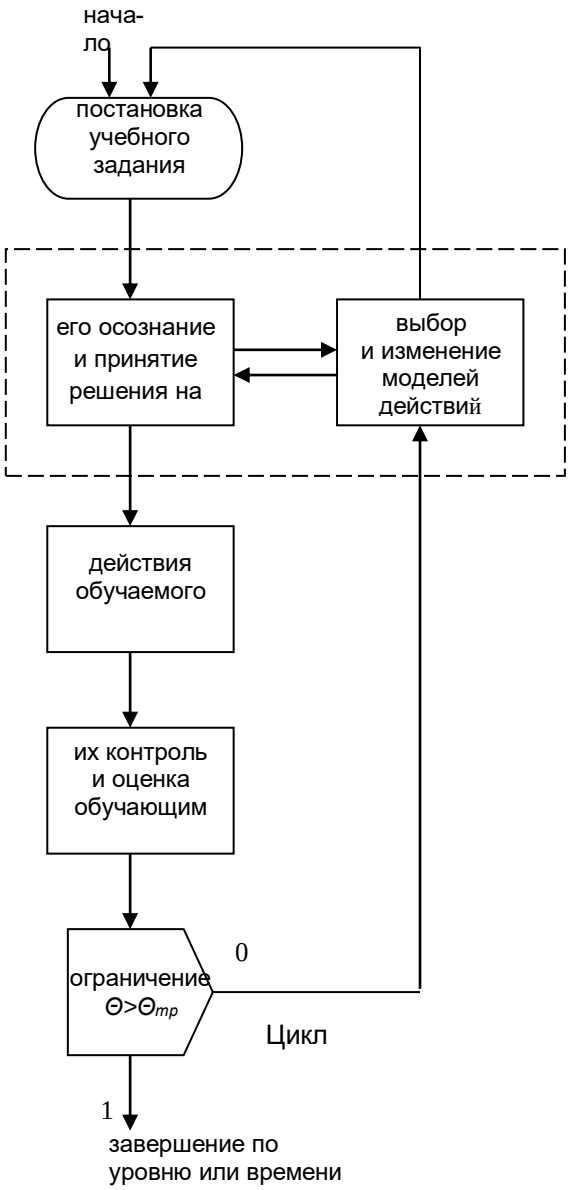

Рис.2. Граф-модель обучения.

Следовательно, при моделировании обучения нужно перейти от его рассмотрения в статике к учёту динамики в виде целенаправленного процесса перевода, обучаемого из начального состояния в состояние подготовленности к решению свойственных ему задач. Аналитическое

представление модели обучения – инструмент для построения траектории формирования навыков безошибочного выполнения действий оператором или её блоков, при по блочном расчленении его деятельности. Применительно к такому по блочному варианту граф-модель обучения можно представить в виде рис.2.

Смысл и очерёдность выполнения функциональных элементов схемы ясны из их наименований и направленности дуг. Особенность заключается в следующем:

- цикличность процесса продолжается не до первого успеха, а до достижения требуемого уровня подготовленности или израсходования выделенного ресурса учебного времени ($\Theta > \Theta_{тр}$, где Θ – показатель подготовленности или временной ресурс);
- учитывается не только внешний контур в процессе обучения, но и внутренний контур, реализуемый в естественной нейросети обучаемого (охвачена пунктиром).

Во внутреннем контуре, по результатам восприятия и оценки задания, осуществляется выбор и принятие к исполнению нужной, по мнению обучаемого, схемы действий для его выполнения. Принятая схема УМ выражается в осуществляемых действиях.

При этом возможны ошибки двух типов:

- ошибки из-за несовершенства самой УМ и, следовательно, необученности оператора;
- ошибка из-за влияния случайных помех, отвлекающих внимание, ухудшающих восприятие информации или затрудняющих управление исполнительными органами человека (вибрация, ударные нагрузки), а также факторов, вызывающих повышенную напряженность и /или утомление.

Учёт отмеченных особенностей и типов ошибок обучаемого необходим при выводе аналитической модели обучения на основе граф-модели рис.2. Применяя метод [5, с.123], при определённых допущениях, удаётся показать, что аналитическим выражением процесса обучения рассматриваемого типа является система рекуррентных уравнений

$$\left.\begin{aligned} \bar{x}_{i+1} &= a_x \bar{x}_i + a_y \bar{y}_i + a \\ \bar{y}_{i+1} &= b_x \bar{x}_i + b_y \bar{y}_i + b \end{aligned}\right\} \quad (1)$$

где $\bar{x}$ ($\bar{y}$) – математическое ожидание числа сформированных УМ правильных действий без самоконтроля (с самоконтролем) по N осваиваемых заданий;

$x = 0,1,...,N$; $y = 0,1,...,N - x$; z – число УМ неверных действий,

a_x, a_y, b_x, b_y - коэффициенты, a, b – свободные члены, $i = 0,1,....,n$ – число шагов обучения.

Система уравнений (1) связывает состояние обучаемого, характеризуемого парой ($\bar{x}$, $\bar{y}$) имеемых у него УМ двух типов, на очередном шаге обучения от состояния на предыдущем шаге. Она преобразуется в систему уравнений в так называемой стандартной форме:

$$\left.\begin{aligned} \bar{x}_{i+3} &= (K_1+1)\bar{x}_{i+2} + (K_2 - K_1)\bar{x}_{i+1} - K_2 \bar{x}_i \\ \bar{y}_{i+3} &= (K_1+1)\bar{y}_{i+2} + (K_2 - K_1)\bar{y}_{i+1} - K_2 \bar{y}_i \end{aligned}\right\} \quad (2)$$

где $K_1 = a_x + b_y$ – след матрицы коэффициентов системы (1),

$K_2 = a_y b_x - a_x b_y$ – определитель матрицы с обратным знаком.

Характеристическое уравнение системы (2) имеет вид:

$$q^3 = (K_1+1)q^2 + (K_2 - K_1)q - K_2,$$

откуда первый корень $\alpha = 1$, а два вторых находятся из характеристического уравнения второго порядка как $\beta = a_x - a_y$, $\gamma = a_x + b_x$.

Поэтому решение системы уравнений (1) следующее:

$$\left.\begin{aligned} \bar{x}_i &= A_x + B_x \beta^{i-1} + C_x \gamma^{i-1} \\ \bar{y}_i &= A_y + B_y \beta^{i-1} + C_y \gamma^{i-1} \end{aligned}\right\} \quad (3)$$

В отличие от (1), по (3) можно оценивать состояние (x,y) обучаемого на любом интересующем нас шаге i процесса без пересчёта по всем предыдущим шагам, но для этого необходимо найти коэффициенты A_x, A_y, B_x, B_y, C_x , C_y.

Рассматриваемая методология разработки моделей обучения операторов базируется на моделировании процесса обучения с привлечением методов теории вероятностей и графов, аппарата эргосетей. На основании изложенной концепции была разработана обучающая и контролирующая программа по курсу «Электротехника».

Целью данной статьи является представление модели обучения операторов АЭС и её компьютерной реализации, используемой на кафедре ЭСАС в Севастопольском государственном университете, институте ядерной энергии и промышленности в течение нескольких лет.

Модель обучения операторов

Многолетний опыт преподавания «Электротехники», показывает, что основной

сложностью при изучении дисциплины является большое количество величин, описываемых процессы в электрических цепях постоянного, переменного, несинусоидального токов и т.д. Так, например, при изучении электрических цепей переменного тока вводятся мгновенные (i), действующие (I), максимальные (I_m), средние ($I_{ср}$), комплексные ($\underline{I}$) значения силы тока. Аналогично для напряжения и ЭДС. Для одной величины существует пять значений. При решении задач расчёта электрических цепей переменного тока используются основные законы электротехники, а именно закон Ома и законы Кирхгофа, которые имеют место для одних значений и не применимы к другим.

Например: для действующих значений переменного тока I закон Кирхгофа не применим, а закон Ома имеет место. Добиться более глубокого понимания отображаемого ими физического смысла величин и процессов можно формированием самоконтроля у обучаемых.

Предлагаемая программа предназначена для проверки уровня знаний базовых понятий в курсах «Электротехника», «Теоретические основы электротехники» и направлена на формирование самоконтроля у студентов при изучении инженерной дисциплины.

С ее помощью можно производить контроль знаний студентов основных понятий, величин, законов электротехники по основным разделам курса. Рассматриваемая компьютерная программа может быть использована для защиты теоретического материала в расчетных работах, при допуске к лабораторным занятиям, а также в самостоятельной работе студентов очной и заочной формы обучения. Программа написана на языке Delphi. Студент, включая программу, знакомится с порядком работы, вводит свои данные и выбирает режим обучения или контроля.

Режим обучения и режим контроля содержат вопросы по следующим разделам курса электротехники:

- электрические цепи постоянного тока,
- электрические цепи однофазного переменного тока,
- трехфазные электрические цепи,
- переходные процессы в электрических цепях,
- магнитные цепи и электрические цепи с взаимной индукцией,
- электрические машины и трансформаторы,
- электрические цепи с распределёнными параметрами (длинные линии).

В режиме контроля высвечиваются задания, в которых необходимо определить выражения для электрических величин, а именно: для заданной величины необходимо указать ее буквенное обозначение согласно государственному стандарту по электротехнике [3, с.12], единицы измерения и формулы для вычисления рис.3. Задача студента заключается в определении из предложенных вариантов правильных, следует отметить, что правильных ответов может быть один или несколько. Наличие в контрольных заданиях неверных вариантов ответов является провокацией, если студент уверен в своих знаниях и у него достаточно развито умение самостоятельно контролировать результаты своей учебной деятельности, то он ответит правильно. Каждый вопрос оценивается положительно (5), только если из предложенных вариантов выбраны все верные ответы. В противном случае оценка отрицательная (2). Таким образом, в режиме контроля студент реализует внешний контур граф - модели обучения рис.2. Обучающая программа позволяет студенту, работая в *режиме обучения*, перейти к справочнику, в котором изложены основные теоретические положения и формулы [4, с.24,57,108] по разделам курса. Процесс обучения в таком режиме соответствует внутреннему контуру граф – модели обучения рис.2. Здесь, имея справочную информацию, студент может изменить модель действий, тем самым сформировав УМ безошибочных действий. Работа в программе может быть окончена либо по времени, либо по безошибочному освоению всех вопросов раздела.

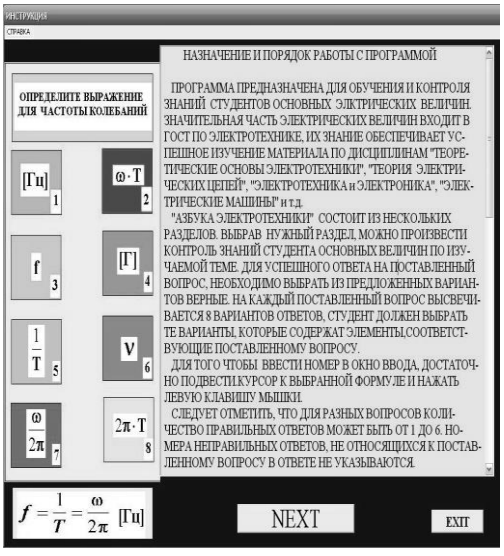

Рис.3. Назначение и порядок работы программы с примером.

Контролирующая часть программы фиксирует фамилию студента, группу, раздел курса, номера вопросов, ответы обучающего, оценку по каждому вопросу, время, затраченное на ответ, а также факт обращения к справочнику. Зафиксированные данные сохраняются и при необходимости по окончании работы студентов могут быть записаны на информационные носители.

Полученная статистика позволит в дальнейшем произвести анализ и расчёт эффективности процесса обучения и формирования у обучаемых базовых знаний и навыков самоконтроля.

Как известно, существует несколько этапов формирования самоконтроля [2, с. 281], работа в рассматриваемой обучающей программе соответствует третьему и четвёртому этапам формирования самоконтроля.

Так на *третьем этапе* внешний контроль уступает место самоконтролю:

- студент самостоятельно реагирует на допущенную ошибку, но с некоторым опозданием;
- преподаватель фиксирует не только неисправленные в результате самоконтроля ошибки;
- исправление ошибки студентом происходит без внешнего воздействия, самостоятельно, но с некоторым временным опозданием;
- самоконтроль сформирован, но недостаточно автоматизирован.

Роль преподавателя на этом этапе состоит в создании наилучших условий для функционирования самоконтроля, очень большое значение имеют инструкции-установки или справочник.

Четвертый этап характеризуется следующими признаками:

- студент исправляет ошибку в момент ее возникновения;
- преподаватель фиксирует только те ошибки, которые не могли быть исправлены самим обучаемым, в силу незнания нового материала;
- исправление ошибки студентом самостоятельное;
- самоконтроль сформирован, и действие его автоматизировано.

Заключение.

1. Рассматриваемая модель обучения операторов с учётом самоконтроля может быть реализована в учебном процессе.

В дальнейшем будет произведено аналитическое описание модели и построен закон распределения средних чисел величин, характеризующий уровень обучения оператора.

2. Так как, основной ролью представленной программы, является формирование УМ безошибочных действий в определении основных величин, характеризующих процессы, происходящие, в электрических цепях постоянного и переменного тока, в магнитных цепях, в трёхфазных электрических цепях, а также в электрических машинах и длинных линиях, то обучающая и контролирующая программа, называется «Азбука электротехники».

Список литературы

1. Анохин А.Н., Острейковский В.А. Вопросы эргономики в ядерной энергетике.- М.:Энергоатомиздат, 2001.-344с.: ил.
2. Гайдук С.В. Психолого-педагогический подход к проблеме формирования самоконтроля при подготовке специалистов для энергетического комплекса / С.В. Гайдук // СВМИ им. П.С. Нахимова. Сборник научных трудов. Вып.1 (11). - Севастополь: 2007. - с.277-282.
3. ГОСТ 1494-77. Электротехника буквенные обозначения основных величин, М.: Издательство стандартов, 1978 – 24с.
4. Основы теории цепей: Учебник для вузов / Г.В. Зевеке, П. А. Ионкин, А.В. Нетушил, С.В. Страхов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528с.: ил.
5. Чабаненко П.П. Исследование безопасности и эффективности функционирования систем человек-техника эргосетями / П.П.Чабаненко. – Севастополь: АВМС им.П.С.Нахимова, 2012.- 162с.
6. Inside WANO/ Информационный бюллетень №5 о «событиях» на АЭС за март 2007 года // по материалам ВАО АЭС МЦ. - Севастополь, 2007.- 18с.

References

1. Anokhin A.N., Ostreykovsky V.A. Questions of ergonomics in the nuclear power industry .- M.: Energoatomizdat, 2001.-344s .: ill.
2. Gaiduk S.V. Psychological and pedagogical approach to the problem of the formation of self-control in the training of specialists for the energy complex / S.V. Gaiduk // SVMI them. P.S. Nakhimov. Collection of scientific papers. Issue 1 (11). - Sevastopol: 2007. - p.277-282.
3. GOST 1494-77. Electrical engineering letter designations of basic quantities, M .: Publishing of standards, 1978 - 24s.
4. Fundamentals of the theory of chains: Textbook for universities / GV. Seebeke, P.A. Ionkin, A.V. Ne-

tushil, S.V. Fears. - M .: Energoatomizdat, 1989. - 528s .: ill.
5. Chabanenko P.P. Study of the safety and efficiency of the functioning of the systems man-technician ergosetyami / P.P.Chabanenko. - Sevastopol: AVMS.P.S. Nakhimova, 2012.- 162s.
6. Inside WANO / Information Bulletin No. 5 on “Events” at NPPs for March 2007 // on materials of WANO MC. - Sevastopol, 2007.- 18s

УДК.621.039.586

Анализ диагностики механического состояния опорно-стержневых изоляторов методом акустической эмиссии

[1]В.В. Смирнов, [2]А.А. Скидан, [3]А.И. Кавун
ФГАУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33, г. Севастополь, 299053, Россия.
Svadick@mail.ru,[1] a.a.skidan@sevsu.ru,[2] avraam.kavun@mail.ru,[3]

Статья поступила 01.02.2019 г.; после доработки 05.02.2019 г.

Аннотация

Контроль изоляторов методом акустической эмиссии позволяет выявить опасные (растущие в процессе силового нагружения) дефекты опорно-стержневых изоляторов, вне зависимости от места расположения дефектов) на монтаже, при ремонтах и в эксплуатации на отключенных изоляторах, смонтированных в одноколонковых разъединителях 35, 110 и 220 кВ.

Рассмотрен вопрос лабораторных испытаний, которые проводятся путем приложения одноосных растягивающих нагрузок, в то время, как при промышленной эксплуатации конструкции подвергаются воздействию сложных двух или трехосных нагрузок.

Ключевые слова: контроль, изоляторы, акустическая эмиссия, АЭ, дефекты, опорно-стержневые изоляторы, ОСИ, конструкция, нагрузка, диагностика.

Analysis of diagnostics of mechanical state of support rod insulators by acoustic emission method

[1]V.V. Smirnov, [2]A.A.Skidan, [3]A.I. Kavun
FAEI HE «Sevastopol State University», 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia.
Svadick@mail.ru,[1] a.a.skidan@sevsu.ru,[2] avraam.kavun@mail.ru,[3]

Received 01.02.2019 y.; received in final form 05.02.2019 y.

Abstract

Control of insulators by the method of acoustic emission allows to reveal dangerous (growing in the process of power loading) defects of support rod insulators and tires, regardless of the location of defects) on installation, during repairs and in operation on the disconnected insulators, mounted in single-column disconnectors 35, 110 and 220 kV.

The question of laboratory tests, which are performed by applying uniaxial tensile loads at a time, as in the industrial exploitation of the design are exposed to a complex of two or three-loads.

Keywords: control, insulators, acoustic emission, AE, defects, support rod insulators, SRI, construction, load, diagnostics.

Введение

Большую роль в безотказной работе выключателей и разъединителей играет фарфоровая изоляция. В разъединителях это опорные стержневые изоляторы, а в выключателях фарфоровые покрышки.

Поломки опорных фарфоровых изоляторов разъединителей, фарфоровых покрышек воздушных выключателей приводят к отключению потребителей, к несчастным случаям.

В настоящее время для контроля механического состояния опорно-стержневых (ОСИ) изоляторов высоковольтной коммутационной аппаратуры в условиях эксплуатации получило распространение большое число методов, зна-

чительно отличающихся по своей методической сущности и аппаратной реализации. Одним из самых эффективных является метод с применением акустической эмиссии.

Акустическая эмиссия (АЭ) представляет собой явление генерации волн напряжений, вызванных внезапной перестройкой в структуре материала. Классическими источниками АЭ является процесс деформирования, связанный с ростом дефектов, например, трещины или зоны пластической деформации.

Применение метода

При испытаниях использование АЭ контроля ставит своей целью изучение процессов деформации и разрушения материала. Метод позволяет в реальном времени по сигналам эмиссии наблюдать за поведением материала при нагружении (рис.1).

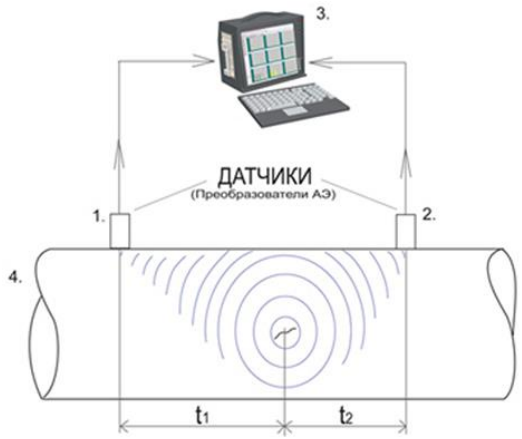

Рис. 1. Принцип действия акустической эмиссии.

При тестировании продукции метод АЭ используется для проверки и контроля сварных соединений, термически сжатых бандажей [1]. Метод также используется вовремя операций, связанных с формообразованием, таких как уплотнение или при прессовании. В целом АЭ контроль может применяться во всех случаях, когда имеют место процессы нагружения, приводящие к постоянному деформированию материалов.

Акустико-эмиссионная аппаратура является чрезвычайно чувствительной к любым видам структурных перемещений в широком частотном диапазоне работы (обычно от 20 кГц до 1200 кГц). Оборудование способно регистрировать не только рост трещин или развитие пластической деформации, но и процессы затвердевания, кристаллизации, трения, ударов, желчеобразований и фазовых переходов.

Распространение волн акустической эмиссии

Волновое смещение представляет собой функцию близкую к ступенчатой (рис.2). Напряжение, соответствующее смещению, имеет форму импульса, ширина и высота которого зависят от динамики процесса излучения. Импульсы таких источников как проскок микротрещины или разрушение осажденных фракций имеют малую длительность (порядка микросекунд или долей микросекунд).

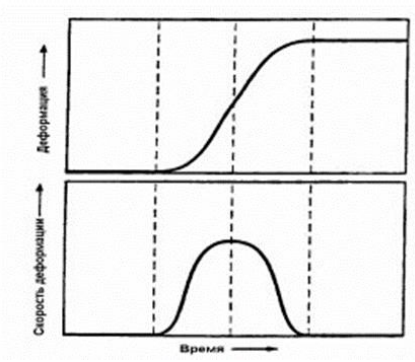

Рис. 2. Простейшая волна АЭ.

Амплитуда и энергия первоначального импульса АЭ может меняться в широком диапазоне в зависимости от типа источника акустической эмиссии. Зародившаяся волна (импульс) распространяется от источника во всех направлениях, при этом распространение в соответствии с природой источника может носить ярко выраженный анизотропный характер (т.е. зависимость скорости распространения от направления) (рис.3).

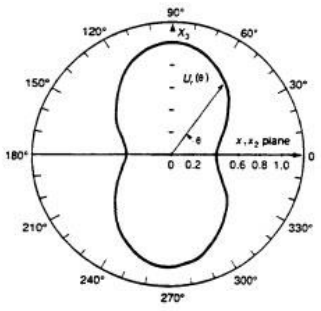

Рис. 3. Угловая зависимость АЭ от растущей скорости в источнике.

Форма первоначальной волны претерпевает существенные изменения при распространении в среде материала и при преобразовании датчиком, поэтому сигнал,

пришедший с датчика, весьма отдаленно напоминает исходный сигнал от источника. Такое изменение формы АЭ сигнала является важной проблемой, с которой приходится сталкиваться как при исследованиях функции источника, так и при решении практических задач неразрушающего контроля [2]. Те исследователи, которые стремятся определить первоначальную форму сигнала, используют широкополосные датчики и производят подробный анализ начальной части зарегистрированного сигнала.

Акустико-Эмиссионные Датчики

Основным элементом АЭ резонансного датчика является пьезоэлектрический кристалл, преобразующий механическое движение в электрический сигнал. Кристалл помещается в специальный корпус с донышком в виде пластинки и разъемом (рис.4). Датчик возбуждается волнами напряжений, попадающими на его донышко, и преобразует их в электрические сигналы. Эти сигналы поступают на расположенный поблизости предусилитель, усиливаются и на конечном этапе регистрации поступают на основную измерительную и обрабатывающую аппаратуру. В последнее время с целью достижения больших удобств при установке и одновременно снижения чувствительности к электромагнитным наводкам, предусилители делают миниатюрными и размещают непосредственно в корпусе датчика, получая совмещённый датчик-предусилитель.

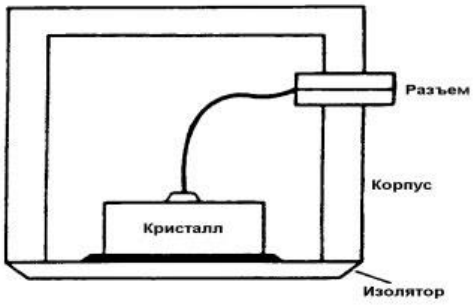

Рис. 4. - Конструкция резонансного АЭ датчика.

Акустическая эмиссия при исследовании материалов

Акустическая эмиссия является замечательным средством для изучения процессов деформирования материала, т.к. обеспечивает исследователей немедленной и подробной информацией о процессах.

Благодаря чувствительности к микроструктуре материала и непосредственной связи с процессами разрушения АЭ способ контроля обладает уникальной способностью к реакции материала на приложенное напряжение. АЭ анализ особенно полезен в случае, когда он используется совместно с другими диагностическими методами, как, например, измерением напряженно-деформированного состояния материала, электронной микроскопией, измерением раскрытия и скачков трещины, измерением ультразвукового рассеяния (при исследовании дислокационных процессов) [3].

Метод акустической эмиссии дополняет эти традиционные методы диагностики и обеспечивает дополнительной информацией о динамике и взаимосвязях.

Контроль изоляторов методом АЭ

В последние 10-15 лет объёмы инвестиций в электроэнергетику России на реконструкцию и техническое перевооружение электростанций и объектов электрических сетей были явно недостаточные. Из-за этого в эксплуатации значительно увеличилась доля высоковольтных выключателей и разъединителей, выработавших нормативный срок службы. Старение основного выключателей и разъединителей приводит к увеличению их отказов в работе. Большую роль в безотказной работе выключателей и разъединителей играет фарфоровая изоляция. В разъединителях это опорные стержневые изоляторы, а в выключателях фарфоровые покрышки. Поломки опорных фарфоровых изоляторов разъединителей, фарфоровых покрышек воздушных выключателей приводят к отключению потребителей, к несчастным случаям.

Существенной особенностью предлагаемого варианта АЭ-контроля является невысокий уровень потребного силового воздействия (не более 40% от величины минимальной разрушающей нагрузки, нормированной для данного типа изоляторов). Этого удалось добиться за счет использования оригинальной методики испытаний.

В предлагаемом варианте аппаратурно-методического обеспечения предусмотрена возможность нагружения ОСИ к центру и от центра полюса разъединителя и соответствующего нагрузкам, действующим при эксплуатации.

Метод АЭ позволяет выявлять в изоляторах

усталостные повреждения. Имеется опыт отбраковки большого количества ОСИ методом АЭ, эксплуатировавшихся в условиях сильного обледенения проводов, причем направление «бракующего» силового воздействия коррелировало с направлением нагружения.

Акустико-эмиссионному контролю должны подвергаться:

- вновь поступающие на энергопредприятия изоляторы 110 кВ серии ИОС (как в составе разъединителей 110-220 кВ, так и отдельных партий);
- изоляторы любых типов по истечении гарантийного срока на разъединители 110-220 кВ;
- изоляторы любых типов при обнаружении на них сколов фарфора, дефектов армировочных швов или контактной системы разъединителя, которые могли бы привести к снижению механической прочности изоляторов и (или) к существенному увеличению нагрузок на них;
- изоляторы, отобранные из резерва (после длительного хранения) для замены.

Вывод

Как известно среди методов неразрушающего контроля не существует ни одного такого метода, который мог бы решить проблему оценки целостности объекта оптимально с учетом таких основных факторов, как получение наиболее низкой себестоимости работ и достижения технической адекватности результатов контроля [4].

Лучшим решением проблемы является применение комбинации различных методов. Благодаря тому, что АЭ резко отличается по своим возможностям от традиционных методов контроля, на практике оказывается очень полезным совмещать АЭ с другими методами.

Основное преимущество метода АЭ связано с возможностью проведения неразрушающего контроля всего объекта целиком за один цикл нагружения.

Данный метод является дистанционным, он не требует сканирования поверхности объекта для поиска локальных дефектов.

Необходимо просто правильным образом расположить нужное число датчиков и использовать их для осуществления локации источника волн напряжений.

Возможности, связанные с дистанционным использованием метода, дают большие преимущества по сравнению с другими методами контроля, которые требуют, например, удаления изоляционных оболочек, освобождения контейнеров контроля от внутреннего содержания или сканирования больших поверхностей.

Список литературы

1. Омельченко Ю.А., Шейкин А.А. Контроль качества изделий из высоковольтного электрофарфора на монтаже и в эксплуатации. Сборник материалов 2-го семинара «Диагностика технического состояния фарфоровых изоляторов высоковольтных коммутационных аппаратов», М., ВНИИЭ, 27-29 октября 1999г.;
2. «Способ акустико-эмиссионного контроля трещинообразования в изделии», патент РФ, №1728786;
3. «Устройство акустико-эмиссионного трещинообразования», свид. На полезную модель РФ, №22713;
4. ГОСТ 26093-84. Изоляторы керамические. Методы испытаний.

Refernces

1. Omelchenko Y. A., Sheikin, A. A., Quality control of high voltage electro porcelain for the installation and operation. Collection of materials of the 2nd seminar "Diagnostics of technical condition of porcelain insulators of high-voltage switching apparatuses", M., VNIIE, October 27-29, 1999.;
2. "The method of acoustic emission monitoring of cracking in a product", patent of Russia, №1728786;
3. "Acoustic emission cracking device", swid. On the utility model of the Russian Federation, №22713;
4. GOST 26093-84. Insulators are ceramic. Test method.

УДК.621.039.586

Анализ ультразвукового метода диагностики механического состояния изоляторов

[1]В.В. Смирнов, [2]А.А. Скидан, [3]А.И. Кавун
ФГАУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33, г. Севастополь, 299053, Россия.
Svadick@mail.ru,[1] a.a.skidan@sevsu.ru,[2] avraam.kavun@mail.ru,[3]

Статья поступила 22.02.2019 г.; после доработки 27.02.2019 г.

Аннотация

Диагностика технического состояния электрооборудования может осуществляться как специальными приборами, которыми производятся прямые измерения электрических параметров контролируемых объектов традиционными методами, так и приборами для измерения косвенных характеристик электрооборудования.

Ультразвуковой неразрушающий контроль позволяет выявлять наиболее распространенные дефекты производственного и эксплуатационного происхождения в фарфоровых опорно-стержневых изоляторах, как смонтированных, (при отключенном напряжении), так и россыпью. Могут контролироваться изоляторы, смонтированные в аппараты на любые классы напряжений.

Ключевые слова: контроль, изоляторы, акустическая эмиссия, АЭ, дефекты, опорно-стержневые изоляторы, ОСИ, конструкция, нагрузка, диагностика.

Analysis of ultrasonic method of diagnostics of mechanical condition of insulators

V.V. Smirnov[1], A.A.Skidan [2], A.I. Kavun[3]
FAEI HE «Sevastopol State University», 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia.
Svadick@mail.ru,[1] a.a.skidan@sevsu.ru,[2] avraam.kavun@mail.ru,[3]

Received 22.02.2019 y.; received in final form 27.02.2019 y.

Abstract

Diagnosis of the technical condition of electrical equipment can be carried out as special devices that make direct measurements of the electrical parameters of the controlled objects by traditional methods, and devices for measuring indirect characteristics of electrical equipment.

Ultrasonic nondestructive testing can detect the most common faults found in operation and maintenance of the origin in the porcelain supporting-rod insulators, as mounted, (when off) or bulk. Can be controlled by the insulators mounted in the apparatus in any of the classes of stresses.

Keywords: control, insulators, acoustic emission, AE, defects, support rod insulators, SRI, construction, load, diagnostics

Введение

Ультразвуковой метод основан на способности ультразвуковых волн, излучаемых в контролируемое изделие, отражаться от дефектов с последующей регистрацией эхо-сигналов индикаторами дефектоскопов. На долю эхо-методов приходится около 97% общего объема ультразвукового контроля при плановых видах ремонта подвижного состава.

Применение

Ультразвуковой метод неразрушающего контроля - метод акустического неразрушающего контроля, при котором применяются при-

боры и устройства, использующие ультразвуковой диапазон частот.

Ультразвуковой контроль применяют для обнаружения несплошностей:

- усталостных трещин в осях колесных пар (в том числе, без снятия внутренних колец роликоподшипников с шеек осей);
- усталостных трещин в зоне галтели вала ведущей (малой) шестерни тягового редуктора (без демонтажа внутренних колец подшипников и самой шестерни вала);
- в межзубных впадинах шестерни и зубчатого колеса тягового редуктора;
- усталостных трещин в стержнях подвешивания тягового редуктора без их демонтажа;
- в бандажах колесных пар (или ободьях) - несплошностей, являющихся браком завода-изготовителя, а также усталостных трещин, появление которых возможно в процессе эксплуатации.

Принцип действия ультразвукового метода

Ультразвуковой метод основан на способности ультразвуковых волн, излучаемых в контролируемое изделие, отражаться от дефектов с последующей регистрацией эхо-сигналов индикаторами дефектоскопов. На долю эхо-методов приходится около 97% общего объема ультразвукового контроля при плановых видах ремонта подвижного состава.

Излучаемые в изделие через определенные промежутки времени импульсы ультразвуковых волн при помощи пъезоэлектрического преобразователя (ПЭП) отражаются от противоположной (донной) поверхности изделия и возвращаясь, попадают на пьезопластину преобразователя. На экране электронно-лучевой трубки возникает донный сигнал.

Если в изделии имеется дефект, то между зондирующим импульсом и донным появиться эхо-сигнал от дефекта.

При использовании теневого метода УЗК на контролируемую деталь с двух сторон устанавливают два пьезоэлектрических преобразователя (рис. 1), один из которых является излучателем ультразвуковой волны, а второй-приемником.

Если на пути УЗВ нет дефектов, то уровень принятого сигнала на экране дефектоскопа максимален (рис 1). При наличии несплошности сигнал резко падает до нуля, т.к. дефект создает «акустическую тень» (рис. 1).

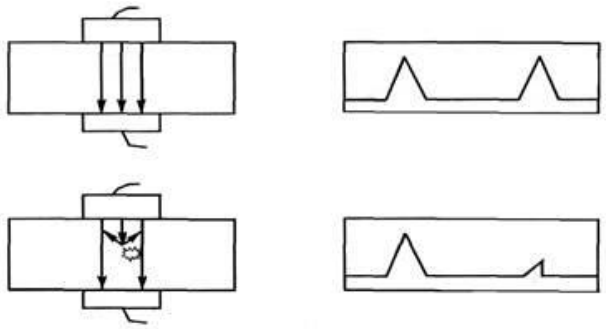

Рис. 1. Изменение уровня принятого сигнала при теневом методе контроля: при отсутствии ефекта и при наличии дефекта соответственно.

При зеркально-теневом методе УЗК, пьезоэлектрический преобразователь является и излучателем и приемником (рис. 2). Возбуждаемая УЗВ проходит через деталь, отражается от второй поверхности - «дна» и воспринимается этим же пьезоэлектрическим преобразователем. Признаком обнаружения дефекта является падение амплитуды донного сигнала (рис. 2).

Наиболее важным дефектом фарфоровых изоляторов, выявляемым с помощью УЗНК, является открытая микроскопическая пористость фарфорового тела изолятора — дефект, в настоящее время ответственный за основную часть разрушений изоляторов по вине изготовителей.

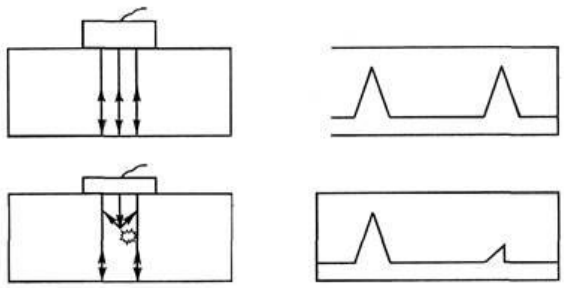

Рис. 2. Изменение уровня донного сигнала при зеркально-теневом методе контроля: при отсутствии дефекта и при наличии дефекта соответственно.

Взаимосвязь с другими методами контроля

Главной особенностью ультразвуковых методов неразрушающего контроля заключается в том, что эти методы эффективно комбинируются.

Среди методов контроля не существует ни одного такого метода, который мог бы решить проблему оценки целостности объекта оптимально с учетом таких основных факторов, как

получение наиболее низкой себестоимости работ и достижения технической адекватности результатов контроля. Лучшим решением проблемы является применение комбинации различных методов. В качестве примера возможно использование ультразвукового метода и метода акустической эмиссии.

Основное преимущество метода акустической эмиссии связано с возможностью проведения неразрушающего контроля всего объекта целиком за один цикл нагружения.

Данный метод является дистанционным, он не требует сканирования поверхности объекта для поиска локальных дефектов. Необходимо просто правильным образом расположить нужное число датчиков и использовать их для осуществления локации источника волн напряжений. Возможности, связанные с дистанционным использованием метода, дают большие преимущества по сравнению с другими методами контроля, которые требуют, например, удаления изоляционных оболочек, освобождения контейнеров контроля от внутреннего содержания или сканирования больших поверхностей. Типичный пример использования АЭ заключается в определении местоположения дефектных участков, после чего для более точного определения природы дефектов используются другие МНК.

Таблица 1

Акустическая Эмиссия	**Другие МНК**
Обнаруживает движение дефектов	Обнаруживают геометрическую форму дефектов
Требует нагружения	Не требуют нагружения
Каждое нагружение уникально	Контроль воспроизводим
Чувствителен к структуре материала	Менее чувствительны к материалу
Менее чувствительны к геометрии	Более чувствительны к геометрии
Требует меньших усилий при проведении контроля продукции/процессов	Требуют больших усилий при проведении контроля продукции/процессов
Требует доступ только в местах установки датчиков	Требуют доступ ко всей поверхности объекта
Контролирует конструкцию за один цикл нагружения	Постепенное сканирование участков конструкции
Основные проблемы: сильное влияние шума	Основные проблемы: сильное влияние геометрии

Вывод

Ультразвуковой метод обеспечивает наибольшую эффективность контроля (за счет выявления как поверхностных, так и внутренних дефектов), обладает высокой чувствительностью и относительно легко поддается автоматизации.

УЗНК изоляторов в эксплуатационных условиях позволяет выявлять макроскопические дефекты «опасных» сечений и оконечностей производственного характера и дефекты, возникающие в эксплуатации на их основе из-за впитывания влаги в зоны открытой микроскопической пористости фарфорового тела изолятора.

Для контроля механического состояния опорно-стержневых фарфоровых изоляторов высоковольтной коммутационной аппаратуры в условиях эксплуатации получило распространение большое число методов, значительно отличающихся по своей методической сущности и аппаратной реализации.

Список литературы

1. Омельченко Ю.А., Шейкин А.А. Контроль качества изделий из высоковольтного электрофарфора на монтаже и в эксплуатации. Сборник материалов 2-го семинара «Диагностика технического состояния фарфоровых изоляторов высоковольтных коммутационных аппаратов», М., ВНИИЭ, 27-29 октября 1999г.;
2. «Способ акустико-эмиссионного контроля трещинообразования в изделии», патент РФ, №1728786;
3. «Устройство акустико-эмиссионного трещинообразования», свид. На полезную модель РФ, №22713;
4. ГОСТ 26093-84. Изоляторы керамические. Методы испытаний.

Refernces

1. Omelchenko Y. A., Sheikin, A. A., Quality control of high voltage electro porcelain for the installation and operation. Collection of materials of the 2nd seminar "Diagnostics of technical condition of porcelain insulators of high-voltage switching apparatuses", M., VNIIE, October 27-29, 1999.;
2. "The method of acoustic emission monitoring of cracking in a product", patent of Russia, №1728786;
3. "Acoustic emission cracking device", swid. On the utility model of the Russian Federation, №22713;GOST 26093-84. Insulators are ceramic. Test method.

УДК –621.316.9

О возможности применения «изменяющегося» режима заземления нейтрали в сети 6-35 кВ

А.А. Панасенко[1], В.В. Колодяжный[2]
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33, г.Севастополь, 299053, Россия. alex050395@gmail.com[1], kvvula@mail.ru[2]

Статья поступила 13.02.2019 г.; после доработки 18.02.2019 г.

Аннотация

В статье предложен метод заземления нейтрали, позволяющий повысить надежность электроснабжения потребителей за счет ограничения возможных перенапряжений при дуговых замыканиях на землю и создания условий для построения селективной защиты от однофазных замыканий на землю в сетях среднего напряжения, не требующих обязательной компенсации емкостного тока.

Ключевые слова: режим заземления, замыкания на землю, ограничение перенапряжений, селективность, резистивное заземление, сети среднего напряжения.

On the possibility of applying the "changing" mode of neutral grounding in the network of 6-35 kV

A.A. Panasenko[1], V.V. Kolodyazhny[2]
Sevastopol state university, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia. alex050395@gmail.com[1], kvvula@mail.ru[2]

Received 13.02.2019 y.; received in final form 18.02.2019 y.

Abstract

The article proposes a neutral earthing method, which allows to increase the reliability of power supply to consumers by limiting possible overvoltages during arc ground faults and contributing to the creation of selective protection against single-phase earth faults in medium voltage networks that do not require compensation of capacitive current.

Keywords: grounding mode, earth fault, overvoltage limiting, selectivity, resistive grounding, medium voltage networks.

Введение

Режим заземления нейтрали в сетях 6–35 кВ определяет надежность электроснабжения потребителей, безопасность людей, находящихся вблизи от места однофазного замыкания на землю (ОЗЗ) и т.д. В большинстве таких сетей России применяются режимы изолированной и компенсированной нейтрали (то есть, заземленной через дугогасящий реактор).

Согласно статистике опроса 50-ти энергосистем России, проведенного в 2004–2005 году фирмой ОРГРЭС, суммарное количество сетей (секций) 6–35 кВ на начало 2005 г. составило 25264 (в опросе не учитывались энергосистемы Петербурга и Москвы ввиду их особой специфики).

Из которых, согласно п. 5.11.8 ПТЭЭС, применение компенсации емкостного тока обязательно в 2632 сетях (то есть примерно в 10,4% от общего числа). Несмотря на то, что большинство специалистов считают предпочтитель-

ным для российских сетей то или иное резистивное заземление нейтрали и этот способ нашел отражение в рекомендациях последней редакции ПУЭ, но переход на этот режим происходит крайне медленно [1].

Это обусловлено тем, что среди специалистов отсутствует единый подход в формировании технической политики по построению распределительных сетей, регламента, единых методик и четких критериев оценки каждого режима по этому вопросу.

Анализ зарубежного опыта показывает, что во многих странах используются различные режимы работы нейтрали, и на сегодня также нет единства мнений в этом вопросе. Вероятно, поэтому среди специалистов наблюдается устойчивая тенденция к пересмотру традиционно сложившихся режимов заземления нейтрали в отечественных сетях 6–35 кВ, которые принято называть электроустановками среднего напряжения.

Результаты многочисленных научных исследований и опыт эксплуатации в отечественной и зарубежной энергетике показывают, что каждый режим заземления нейтрали имеет свои достоинства и недостатки [2].

Основными проблемами выбора того или иного режима работы нейтрали являются ограничение возможных перенапряжений при дуговых замыканиях на землю и создание селективной защиты от ОЗЗ и, за счет этого, повышение надежности электроснабжения потребителей.

По условиям создания селективно действующей защиты и предотвращения возможных перенапряжений, наиболее рациональными видятся режимы с резистивным заземлением нейтрали [3]. Но применение низкоомного заземления приводит к возрастанию числа отключений потребителей в 2-3 раза для воздушных сетей и в 1,5-2 раза для кабельных сетей. А дорогое и громоздкое высокоомное заземление при длительных ОЗЗ приводит к значительным потерям активной мощности.

Поэтому эффективность резистивного заземления оставляет желать лучшего, и не всегда оказывается оправданным.

Исходя из анализа изученного материала по используемым на практике режимам заземления нейтрали [1-3], можно сделать вывод об отсутствии на сегодня такого режима нейтрали, который способен обеспечить ограничение возможных перенапряжений при дуговых замыканиях на землю и создание селективной защиты от ОЗЗ и, за счет этого, повышение надежности электроснабжения потребителей.

Цель и задачи исследования

Цель исследования – найти решение проблемы выбора режима нейтрали, способного обеспечить надежное электроснабжение потребителей за счет ограничения возможных перенапряжений при дуговых замыканиях на землю и создания условий для построения селективной защиты от ОЗЗ. При этом, для его массового внедрения в сети 6-35 кВ, решение должно быть относительно недорогим и максимально простым.

Задачи:

- исследовать закономерности и природу перенапряжений при ОЗЗ;
- проанализировать используемые способы ограничения перенапряжений;
- выявить условия и критерии для создания селективной защиты от ОЗЗ;
- сформировать техническое решение поставленной цели.

Природа перенапряжения при ОЗЗ

Наиболее ярко перенапряжения при ОЗЗ проявляются в сетях и изолированной нейтралью.

Рассмотрим трехфазную систему упрощенном виде с симметричными емкостями относительно земли $C_A=C_B=C_C=C$ и междуфазными емкостями $C_{AB}=C_{AC}=C_{BC}=C_{мф}$, рис.1.

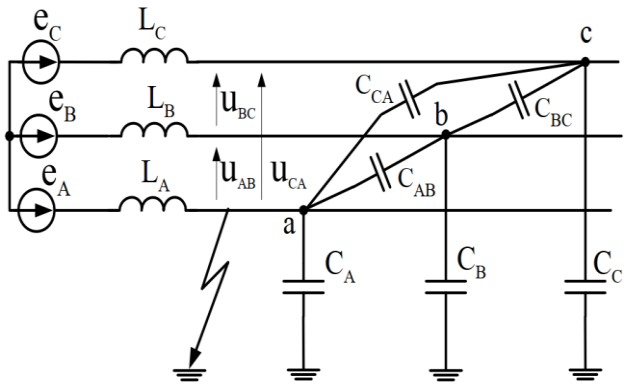

Рис. 1. Схема замещения сети с изолированной нейтралью.

С целью упрощения анализа переходного процесса индуктивностью линий можно пренебречь, а распределенные вдоль линий емкости - считать сосредоточенными.

Допустим, что замыкание на землю возникло в фазе А в момент времени t_1, когда напряжение U_A проходит свой отрицательный максимум, равный фазному значению со знаком

минус. Напряжение на фазе В и С в этот момент будет равно U_B=0,5$U_ф$, а U_{AB}=1,5$U_Ф$.

После замыкания на землю емкость фазы В, заряженная до 0,5$U_ф$, параллельно соединяется с емкостью C_{AB}, заряженной до 1,5$U_ф$. произойдет перезаряд емкостей и напряжения на них возрастут скачком до значения равного:

$$U_{нач} = \frac{Q_B + Q_{AB}}{C + C_{AB}} = \frac{U_B(t_1)C + C_{AB}[U_B(t_1) - U_A(t_1)]}{C + C_{AB}} =$$

$$= U_B(t_1) - kU_A(t_1),$$

где $k = \frac{C_{AB}}{C + C_{AB}}$ – коэффициент распределения заряда емкостей.

Тогда в момент времени t_1 напряжение на фазе В и С изменится скачком от 0,5$U_ф$ до значения $U_{нач}$, которое определяется по формуле:

$$U_{нач} = 0{,}5U_ф + kU_ф .$$

В результате этого появляются колебания напряжения, изображенные на рис. 2., около установившегося значения U_{AB} с амплитудой:

$$U_{кол} = U_{AB уст} - U_{нач} = (1-k)U_ф = 1{,}5U_ф - U_{нач}.$$

Частота этих колебаний определяется выражением:

$$\varpi_1 = \frac{1}{\sqrt{(L + 0{,}5L)2(C + C_{AB})}} = \frac{1}{\sqrt{3L(C + C_{AB})}}.$$

Следовательно, после замыкания фазы А на землю напряжение на здоровых фазах снова изменяется скачком и дальше идет второй этап переходного процесса – перезаряд емкостей С и $C_{мф}$ через индуктивность источника. В переходном процессе напряжение на здоровых фазах, к примеру на фазе В, изменяется по закону:

$$U_B = U_{AB}(t_1) - (1-k)U_A(t_1)e^{-\alpha t},$$

где α - коэффициент затухания колебаний, зависящий от соотношения активных сопротивлений и проводимостей сети, а также наличия параллельной цепи с активной нагрузкой.

Напряжение на фазе В достигает максимального значения, в зависимости от параметров сети, примерно через полпериода свободных колебаний, т.е. в момент $t_2 = t_1 + 0{,}5T = \pi/\omega_1$. Так как $\omega_1 >> \omega$, то, обозначив $\alpha\pi/\omega_1 = d$, получим:

$$U_{B макс} = 1{,}5U_B + (1-k)U_ф e^{-d}.$$

В общем виде для момента времени t_2 можно записать:

$$U_{B макс} = U_{AB}(t_2) - U_A(t_2)(1-k)e^{-d}.$$

Процесс подобного рода встречается при любом виде замыкания фазы на землю. Но в случае металлического замыкания переходной процесс на этом заканчивается, и перенапряжение здоровых фазах имеет характер кратковременного пика с максимальной амплитудой (2,1÷2,2)$U_Ф$. Но, практика показывает, что в электрических сетях замыкания на землю чаще всего происходят через дугу, причем, не важно, при атмосферных перекрытиях гирлянды или при растекании полимерной изоляции в кабельных распределительных сетях. В данном случае за счет повторных гашений и зажиганий перемежающейся дуги переходный процесс, может продолжаться длительно и привести к негативным последствиям.

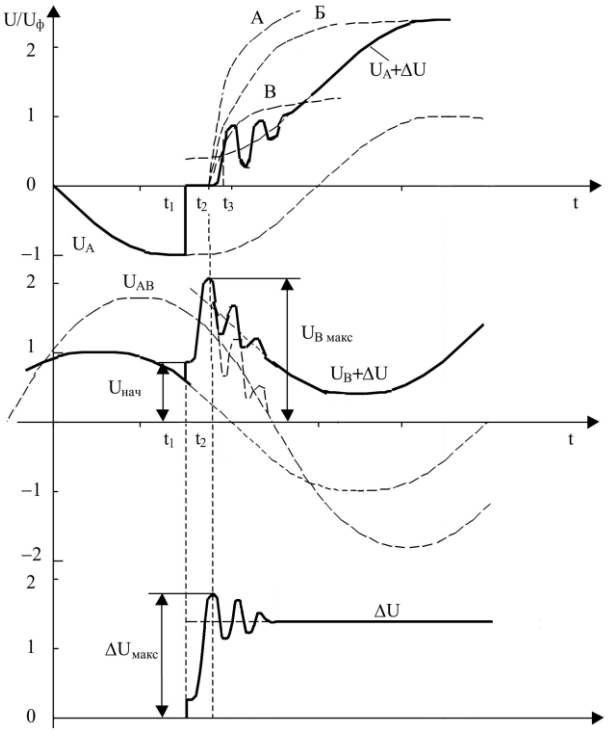

Рис. 2. Напряжения переходного процесса при дуговом замыкании фазы А на землю.

Ток, протекающий в канале дуги с момента замыкания на землю, условно можно представлен в виде свободной и вынужденной составляющей.

Во бестоковый время паузы происходит интенсивная деионизация дугового столба, вследствие чего постепенно восстанавливаются диэлектрические свойства промежутка и растет его пробивное напряжение (на рис. 2. кривые А, Б и В).

При этом из-за возрастания сопротивления дугового столба на нем растет (восстанавливается) напряжение U_A (рис. 2.), которое до возникновения бестоковой паузы было мало.

Поэтому каждое прохождение тока через

нуль сопровождается попыткой гашения дуги, итог которой зависит от соотношения интенсивности восстановления напряжения на поврежденной фазе и электрической прочности дугового промежутка. Если дуга погасает при первом переходе высокочастотного тока через нуль (момент времени t_2, на рис. 2.), то на емкостях неповрежденных фаз при напряжениях $U_{Bмакс}=U_{Cмакс}$ остаются заряды $Q_B=C\cdot U_{Bмакс}$ и $Q_C=C\cdot U_{Cмакс}$, а на емкости фазы А заряд отсутствует.

После погасания дуги суммарный заряд поровну распределится между емкостями трех фаз, которые по отношению к земле получат равное дополнительное напряжение ΔU, накладывающееся на напряжение источника, это так называемое смещение нейтрали, которое определяется по формуле:

$$\Delta U = \frac{C(U_{Bмакс} + U_{Cмакс})}{3C}.$$

В связи с тем, что заряды с емкостей неповрежденных фаз переходят на емкость поврежденной фазы через индуктивность источника, то данный процесс имеет колебательный характер.

Амплитуда колебаний равняется разности между мгновенным значением вынужденного напряжения на поврежденной фазе сразу после обрыва дуги $U_A(t_2)+\Delta U$ и первоначальным напряжением (до обрыва дуги), равным нулю.

Медленный подъем напряжения на поврежденной фазе происходит после затухания колебаний с частотой источника.

В то же время, с изменением возрастающего по кривой U_A (рис. 2.) напряжения, идет восстановление диэлектрических свойств дугового промежутка по кривым А, Б или В.

Случай А свойственен для сетей с малой емкостью, у которых дуга гаснет во время одного полупериода промышленной частоты.

В случае Б кривая восстановления электрической прочности дугового промежутка идет выше кривой U_A+ и пересекает вблизи ее максимума. В это время дуга снова загорится, но может погаснуть при переходе высокочастотного тока через нуль. Дуга будет иметь перемежающийся характер.

В случае В вторичное возгорание дуги произойдет в момент времени t_3 вскоре после гашения. Возгорание будет сопровождаться колебательным процессом с меньшей амплитудой, так как напряжение на неповрежденных фазах в этот момент времени будет близко к установившемуся значению. Шанс погасания дуги при повторном прохождении через нуль тока будет выше, а смещение нейтрали меньше. Следующая попытка гашения дуги совершится при следующем прохождении через нуль высокочастотного тока. Если во время высокочастотных колебаний дуга не погаснет, то она может погаснуть уже при прохождении тока промышленной частоты через нуль. Получается, что в случае В дуга может быть как устойчивой, так и перемежающейся.

Для изоляции наиболее опасны перемежающиеся дуги, причем максимальные перенапряжения на здоровых фазах появляются, когда повторное зажигание происходит примерно через полпериода после погасания дуги. Возрастание напряжения при повторных зажиганиях дуги в сравнении с первым зажиганием объясняется наличием ΔU смещения нейтрали.

С целью определения наибольшего напряжения при *n*-ом возгорании дуги можно воспользоваться формулой для $U_{Bмакс}$, с учетом того, что напряжение фазы А в момент времени, предшествующий зажиганию, увеличивается на значение ΔU смещения нейтрали, возникшего в результате предшествующего гашения дуги. Тогда выражение максимального напряжения будет иметь вид:

$$U_{nBмакс} = U_B(t_n) - U_A(t_n) - [U_A(t_n) + \Delta U](1-k)(1-\alpha\pi/\omega) \quad (1)$$

Если подставить значения напряжений в выражение (1), то можно отметить, что прослеживается закономерность – с каждым циклом зажигания и гашения дуги смещение нейтрали и, соответственно, перенапряжения на здоровых фазах увеличиваются. Но скорость их нарастания постепенно снижается, так как вместе с процессом накапливания зарядов на емкостях, когда дуга не горит, во время горения дуги идет процесс стекания зарядов в землю. Поэтому рост перенапряжений по мере горения дуги постепенно снижается, что соответствует теориям формирования перенапряжений и максимальное значение перенапряжения колеблется от $2{,}94U_ф$ (теория Петерса-Слепяна) до $4{,}27U_ф$ (теория Петерса) [4].

Статистика эксплуатации реальных сетей показывает, что перенапряжения $3{,}2U_ф$ являются максимальными.

Для изоляции сетей класса до 35 кВ такие кратковременные перенапряжения не критичны. Но длительное их существование может привести к повреждению загрязненной или ослабленной изоляции.

Кроме этого, дуга может перекинуться на

другие фазы и, тем самым, создать междуфазное короткое замыкание [4, 5].

Способы ограничения перенапряжений

В процессе эксплуатации электрические сети могут подвергаться воздействию различных видов перенапряжений, таких как коммутационные, грозовые, квазистационарные. Для защиты от коммутационных и грозовых перенапряжений сетей используются вентильные разрядники (РВ) и ограничители перенапряжений (ОПН) [6].

В сетях с изолированной или компенсированной нейтралью для защиты трансформаторов от воздействия перенапряжений, в нейтрали используют изоляцию того же класса напряжения, как у линейных вводов. С таким уровнем изоляции нет необходимости применения дополнительных средств защиты для нейтрали, помимо вентильных разрядников, подключаемых параллельно дугогасящему реактору [7].

Для ограничения перенапряжений при ОЗЗ в сетях 6-35 кВ применяют компенсацию токов ОЗЗ при помощи дугогасящих реакторов, заземление нейтрали через резистор и комбинированные методы.

Резистивное заземление нейтрали делится на высокоомное и низкоомное. Высокоомное заземление нейтрали допускает длительную работу при ОЗЗ с активным током замыкания на землю, примерно равным емкостному току. Данный способ хорошо справляется с перенапряжениями, но сами средства относительно дорогие и громоздкие. Низкоомное заземление нейтрали применятся на участках с сильно ослабленной изоляцией, которая может быстро выйти из строя даже при небольших перенапряжениях, но для сетей, требующих надежного электроснабжения, этот режим не подходит, так как он не предусматривает работу при ОЗЗ.

Компенсация емкостного тока в основном применяется, когда компенсация обязательна согласно требованиям ПТЭЭС, так как данный способ крайне сложный, громоздкий и дорогой. Он препятствует развитию феррорезонансных процессов и позволяет ограничить перенапряжения до уровня 2,2÷2,4 фазного значения за счет компенсации тока замыкания на землю и снижения скорости восстановления напряжения на поврежденной фазе после погасания дуги. Но все это возможно только при достаточно точной автоматической компенсации, что не всегда возможно.

Комбинированный режим предполагает параллельное подключение дугогасящего реактора и высокоомного резистора. Данный способ обладает всеми преимуществами обоих сочетаемых режимов и допускает более значительную расстройку компенсации (20% и более). Но очевидно, что это самый сложный, дорогой и громоздкий способ заземления [4, 5].

Условия для создания надежной селективной защиты от ОЗЗ

Для создания надежной селективной защиты от ОЗЗ необходимо обеспечить выполнение всех предъявляемых к ней требований, к которым относят надежность, селективность, быстродействие и чувствительность [8].

Поскольку надежность и быстродействие защиты от режима заземления нейтрали практически не зависят, то далее рассмотрим только селективность и чувствительность. Для обеспечения селективности и чувствительности необходимо обеспечить величину тока ОЗЗ, достаточную для срабатывания защиты. Из всех используемых режимов, наиболее рациональным для этого представляется резистивное заземление нейтрали, так как при таком режиме нейтрали активная составляющая тока ОЗЗ протекает только через поврежденное присоединение и нейтраль.

Выбор резистора по условию работы релейной защиты производится согласно выражению:

$$I_з > I_{с.з.},$$

где $I_з$ – ток ОЗЗ без учета емкостного тока рассматриваемого присоединения, А;

$I_{с.з.}$ – максимальный из всех присоединений ток уставки защиты, А [9].

Предлагаемое решение поставленной цели

На основании проведенного исследования предлагается использовать «изменяющийся» режим нейтрали, который для ее заземления предполагает использовать ОПН, зашунтированный цепью из низкоомного резистора и выключателя.

Поясняющая схема реализации предлагаемого режима заземления и оперативных цепей постоянного тока защиты от ОЗЗ представлены соответственно на рис. 3 и рис. 4.

Ограничитель перенапряжения FV подбирается так, чтобы его длительно допустимое рабочее напряжение соответствовало максимально возможному напряжению на нейтрали

при ОЗЗ, то есть равнялось фазному напряжению, которое возникает при металлическом замыкании на землю.

Резистор выбирается так же, как и для условий резистивного заземления нейтрали. Номинальное напряжение выключателя Q1, как и ограничителя перенапряжения, FV должно быть не меньше фазного напряжение сети, в которой они используются, а номинальный ток отключения Q1 должен быть больше максимально возможного тока ОЗЗ, протекающего через нейтраль

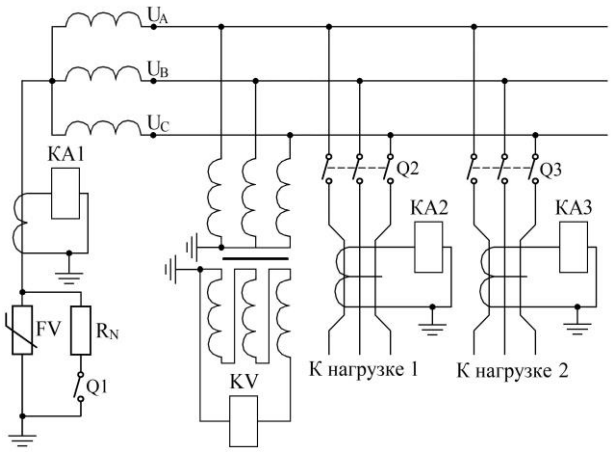

Рис. 3. Первичные цепи переменного тока.

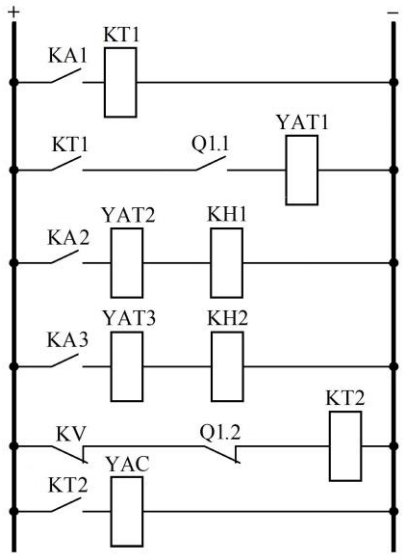

Рис. 4 Вторичные цепи постоянного тока защиты от ОЗЗ.

Рассмотрим принцип работы предлагаемого режима заземления с релейной защитой от ОЗЗ на примере сети, к которой подключены два присоединения нагрузки 1 и 2, которые необходимо отключать при возникновении на них ОЗЗ.

В случае возникновения замыкания в присоединении с нагрузкой 1 (2) через трансформатор тока в нейтрали и трансформатор тока нулевой последовательности в поврежденном присоединении потечет ток ОЗЗ, вследствие чего сработают токовые реле KA1 и KA2 (KA3), замыкая свои контакты.

В результате замыкания контакта KA2 (KA3) получает питание электромагнит YAT2 (YAT3), отключающий выключатель Q2 (Q3) и запитывающий указательное реле KH1 (KH2), сигнализирующее о возникновении ОЗЗ в присоединении с нагрузкой 1 (2).

В случае отказа выключателя Q2 (Q3), с выдержкой времени сработает реле KT1, которое замкнув свой контакт, подаст питание на электромагнит YAT1, отключающий выключатель Q1. В результате отключения выключателя Q1, схема переходит в режим заземления через ОПН до истечения выдержки времени реле KT2, которое будет начинать отсчет, когда контакт реле напряжения нулевой последовательности KV будут в замкнутом положении, что произойдет при восстановлении напряжения на поврежденной фазе в результате погасания дуги.

При срабатывании, реле KT2 замыкает свой контакт, вследствие чего получает питание электромагнит YAC, который включает выключатель Q1 и создает цепь для разряда остаточного заряда емкостей сети на землю. Защита возвращается в исходное положение.

Предлагаемый режим заземления нейтрали имеет достаточно преимуществ перед используемыми режимами. Он более простой и имеет меньшие потери активной мощности при длительных замыканиях, чем высокоомое заземление, которое на данный момент считается наиболее рациональным из используемых в России способов заземления.

Заключение

В результате проведенного исследования предложен режим заземления, позволяющий обеспечить надежное энергоснабжение потребителей за счет ограничения возможных перенапряжений при дуговых замыканиях на землю и создать селективную релейную защиту от ОЗЗ. А так же, что не маловажно при масштабах использования таких сетей, данный режим нейтрали достаточно простой по реализации и имеет меньшие потери активной мощности при длительных замыканиях, чем его главный кон-

курент в лице высокоомного заземления.

Авторы полагают, что предложенный режим нейтрали имеет хорошие перспективы для применения в сетях среднего напряжения, не требующих обязательной компенсации емкостного тока ОЗЗ в соответствии с требованиями ПТЭ.

Список литературы

1. Кричко В.А., Миронов И.А Особенности применения дугогасящих реакторов: Информационно-справочное издание [Электронный ресурс] – Новости электротехники. 2007. – №1(43) – Режим доступа: http://www.news.elteh.ru/arh/2007/43/ /07.php
2. Лихачев Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов. – М.: Энергия, 1971. – 152 с.
3. Глушко В.П., Ямный О.Е., Ковалев Э.П., Бохан Н. В. Белорусские сети 6–35 кВ переходят на режим заземления нейтрали через резистор: Информационно-справочное издание [Электронный ресурс] – Новости электротехники. 2006, № 3 (39) – Режим доступа: http://www.news.elteh.ru/ /arh/2006/39 / 05.php
4. Вайнштейн Р.А., Коломиец Н.В., Шестакова В.В. Режимы заземления нейтрали в электрических системах: учебное пособие – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – 118 с.
5. Миронов И.А Режим заземления нейтрали в сетях 6-35 кВ: Информационно-справочное издание [Электронный ресурс] – Новости электротехники. 2003. – №6(24) – Режим доступа: http://www.news.elteh.ru/arh/2003/24/ 05.php
6. Дмитриев М. В. Защита от перенапряжений в электрических сетях / М. В. Дмитриев // Применение ОПН в электрических сетях 6-750 кВ ЗАО – Санкт-Петербург: «Завод энергозащитных устройств», 2007. – С. 11.
7. Филатов А. А. Обслуживание электрических подстанций оперативным персоналом. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 304 с.: ил.
8. Беркович М.А., Молчанов В.В., Семенов В.А., Основы техники релейной защиты. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 376 с.
9. Шабад М. А. Обзор режимов заземления нейтрали и защиты от замыканий на землю в сетях 6–35 кВ России // Энергетик. –1999. – № 3. – С.8 – 14.

References

1. Krichko V.A., Mironov I.A. Features of the use of arc-suppressing reactors: Informational reference publication [Electronic resource] - Electrical Engineering News. 2007. - №1 (43) - Access Mode: http://www.news.elteh.ru/arh/ /2007/43/07.php
2. Likhachev, F.A. Ground faults in networks with isolated neutral and with compensation of capacitive currents. - M .: Energy, 1971. - 152 p.
3. Glushko V.P., Yamny O.E., Kovalev E.P., Bokhan N.V. Belarusian networks of 6–35 kV switch to neutral grounding mode through a resistor: Informational reference publication [Electronic resource] - Electrical News . 2006, No. 3 (39) - Access Mode: http://www.news.elteh.ru/arh/2006/39/05.php
4. Weinstein R.A., Kolomiets N.V., Shestakova V.V. Neutral grounding modes in electrical systems: study guide - Tomsk: TPU publishing house, 2006. - 118 p.
5. I.A. Mironov. Neutral grounding mode in networks of 6-35 kV: Informational reference publication [Electronic resource] - Electrical News. 2003. - №6 (24) - Access Mode: http://www.news.elteh.ru/arh/2003/24/05.php
6. Dmitriev M. V. Protection against overvoltage in electrical networks / M. V. Dmitriev // Application of a surge arrester in electric networks of 6-750 kV CJSC - St. Petersburg: "Plant of energy-protective devices", 2007. - P. 11 .
7. Filatov A. A. Maintenance of electrical substations by operational personnel. - M .: Energoatomizdat, 1990. - 304 pp., Ill.
8. Berkovich MA, Molchanov V.V., Semenov V.A., Fundamentals of Relay Protection Technology. - 6th ed., Pererab. and add. - M .: Energoatomizdat, 1984. - 376 p.
9. M. Shabad. Overview of Neutral Grounding Modes and Protection against Earth Circuits in 6–35 kV Networks of Russia // Energetic. –1999. - № 3. - P.8 - 14.

УДК.629.313.323

Уменьшение токов небаланса в дифференциальных защитах трансформаторов, выполненных с использованием реле ДЗТ-20

А.В.Углов[1], М.Б. Углова[2], Е.А., Дубков, Ю.О. Наумичёва, В.В. Румянцева
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33, г. Севастополь, 299053, Россия, [1]anatolyuglov@yandex,ru,[2]marina.uglova.1963@mail.ru

Статья поступила 18.02.2019 г.; после доработки 20.02. 2019 г.

Аннотация

Устройство защиты серии ДЗТ-20 обеспечивает надёжное недействие от броска намагничивающего тока. Таким образом, расчёт защиты производится по условию недействия от составляющих тока небаланса. Для согласования вторичных токов от трансформаторов тока и устройства защиты используются автотрансформаторы тока типа АТ-31 и понижающие АТ-32. В работе исследована возможность снижения составляющей тока небаланса, обусловленной неточностью выставления числа витков на неосновной стороне защищаемого трансформатора за счёт расширения числа комбинаций использования согласующих автотрансформаторов тока.

Ключевые слова: дифференциальная защита трансформатора, токи небаланса, согласующий автотрансформатор тока.

Diminishment of currents of disparities in the differential protection of transformers implemented with the use of device the DZT-20

A.V.Uglov[1], M.B. Uglova[2], E.A., Dubkov, J.O. Naumycheva, V.V. Rumyantseva
Sevastopol state university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299033, Russia, [1]anatolyuglov@yandex,ru,[2]. marina.uglova.1963@mail.ru

Received 18.02.2019 y.; received in final form 20.02.2019 y.

Abstract

The device of protection of the DZT-20 series provides un reliable action from the throw of magnetizing current. Thus, the calculation of defence is produced on the condition of no action from the constituents of current of disparities. For the concordance of the second currents from the transformers of current and device of protection autotransformers of current of the type AT-31 and AT-32 are used. Possibility of decline of constituent of current of disparities is explored in work, by the conditioned inaccuracy of exposure of number of coils on the unbasic side of the defended transformer due to expansion of combinations of the use numbers of co-ordinating autotransformers of current.

Keywords: differential protection of transformer, currents of disparities , co-ordinating the autotransformer of current.

Введение

Дифференциальные реле тока серии ДЗТ-20 предназначены для использования в качестве основной защиты силовых трансформаторов при всех видах многофазных коротких замыканий.

Использование время-импульсного метода отстройки от броска намагничивающего тока силовых трансформаторов и отстройка от токов небаланса в переходных эксплуатационных режимах в сочетании с использованием гармонического и процентного торможения от токов плеч защиты позволило снизить минимальную уставку по току срабатывания защиты до 0,3 $I_{ном}$ трансформатора. Такая чувствительность обес-

печивает выполнение требований ПУЭ для защиты силовых трансформаторов любой мощности. [1, 2].

Благодаря наличию реагирующего органа, входящего в состав модуля реле защиты дифференциального реле полностью отстроено от броска намагничивающего тока при постановке трансформатора под напряжение. Расчёт продольной дифференциальной токовой защиты трансформатора следует производить только по условию надёжного недействия от составляющих тока небаланса при протекании через трансформатор максимально возможного значения тока, не связанного с повреждением трансформатора. [1, 2]. Дифференциальное реле серии ДЗТ-20 выполняется на вторичный номинальный ток 2,5 – 5,0 *А*. [3]. Для повышения значения тока, подводимого к защите, величиной 2,0 *А* и менее следует использовать повышающие согласующие автотрансформаторы тока типа АТ-31, а для понижения подводимого тока величиной 5,5 *А* и более следует использовать понижающие согласующие автотрансформаторы тока типа АТ-32.

Постановка цели научной работы

Задачей исследования является повышение коэффициента чувствительности дифференциальной защиты трансформаторов, выполненной с использованием устройства защиты серии ДЗТ-20, без изменения состава защиты и без изменения схемы её подключения к вторичным токовым цепям трансформатора за счёт расширения числа комбинаций использования ответвлений обмоток согласующих автотрансформаторов тока.

Исследование возможности расширения диапазона коэффициента трансформации повышающего автотрансформатора тока типа АТ-31

Принципиальная электрическая схема автотрансформаторов тока типа АТ-31 и АТ-32 представлена на рис. 1.

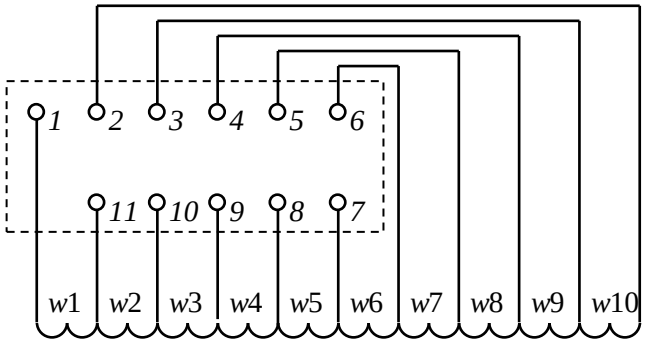

Рис. 1. Принципиальная электрическая схема автотрансформаторов тока типа АТ-31 и АТ-32.

Как уже было отмечено выше при использовании согласующих автотрансформаторов тока типа АТ-31 для повышения значения тока, подаваемого на вход защиты, со стороны трансформаторов тока используется одно из ответвлений автотрансформатора, указанных в таблице 1 [1, 2, 3].

Таблица 1. *Технические данные повышающего автотрансформатора тока типа АТ-31.*

Ответвление	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	1-7	1-8	1-9	1-10	1-11
Номинальный ток ответвления, *А*	0,34	0,44	0,60	0,81	1,10	1,45	1,97	2,12	2,29	2,5
Коэффициент трансформации	7,36	5,65	4,18	3,09	2,27	1,73	1,27	1,18	1,09	-

Однако, учитывая тот факт, что в качестве ответвления, к которому подключается трансреактор устройство защиты серии ДЗТ-20, возможно использовать не только выводы 1-11, но и восемь других (исключение составляет ответвление 1-2), число возможных значений коэффициента трансформации согласующего автотрансформатора тока типа АТ-31 возрастает до 45, т.е. в пять раз больше.

Значения коэффициента трансформации автотрансформатора тока типа АТ-31 при этом приведены в таблице 2.

Кроме того, на вход трансреактора устройства защиты серии ДЗТ-20 можно подавать не только 2,5 *А*, но и ещё пять других, являющихся номинальными (3,0, 3,63, 4,25, 4,6, 5,0 *А*). Таким образом число возможных комбинаций совместного использования повышающего автотрансформатора тока типа АТ-31 и дифференциального реле защиты серии ДЗТ-20 увеличивается до 270, что в 30 раз больше, чем при стандартном использовании.

При этом среднее значение дискретности тока, подводимого к защите уменьшается с 0,24 *А* до 0,008 *А*, что позволяет в конечном итоге с высокой степенью точности найти соответствующую комбинацию использования ответв-

лений автотрансформатора тока и трансреактора и, тем самым, существенно снизить составляющую тока небаланса $I'''_{нб}$, обусловленную неточностью выставления чисел витков на ответвлениях защиты.

Таблица 2. *Значения коэффициента трансформации повышающего автотрансформатора тока типа АТ-31 в предлагаемом методе.*

1-3	1,306								
1-4	1,761	1,348							
1-5	2,382	1,824	1,353						
1-6	3,240	2,480	1,840	1,360					
1-7	4,263	3,263	2,421	1,789	1,316				
1-8	5,785	4,429	3,286	2,429	1,786	1,357			
1-9	6,231	4,769	3,538	2,615	1,923	1,462	1,077		
1-10	6,750	5,167	3,833	2,833	2,083	1,583	1,167	1,083	
1-11	7,364	5,636	4,182	3,091	2,273	1,727	1,273	1,182	1,091
	1-2	*1-3*	*1-4*	*1-5*	*1-6*	*1-7*	*1-8*	*1-9*	*1-10*
Номера ответвлений									

Обобщённые результаты предлагаемого метода с точки зрения повышения степени соответствия между выходным током трансформатора тока защиты и номинальным током ответвления трансреактора реле защиты для повышающего автотрансформатора тока типа АТ-31 представлены в таблице 3.

Исследование возможности расширения диапазона коэффициента трансформации понижающего автотрансформатора тока типа АТ-32

При использовании согласующих автотрансформаторов тока типа АТ-32 для понижения значения тока, подаваемого на вход защиты, со стороны трансформаторов тока используется одно из ответвлений автотрансформатора, указанных в таблице 4. [1, 2, 3].

Однако, учитывая тот факт, что в качестве ответвления, к которому подключается трансреактор устройства защиты серии ДЗТ-20, возможно использовать не только выводы 1-2, но и восемь других (исключение составляет ответвление 1-11), число возможных значений коэффициента трансформации согласующего автотрансформатора тока типа АТ-32 возрастает до 45, т.е. в пять раз больше.

Значения коэффициента трансформации автотрансформатора тока типа АТ-32 при этом приведены в таблице 5.

Кроме того, на вход трансреактора устройства защиты серии ДЗТ-20 можно подавать не только 5,0 *А*, но и ещё пять других, как указано выше.

Таким образом число возможных комбинаций совместного использования понижающего автотрансформатора тока типа АТ-32 и дифференциального устройства защиты серии ДЗТ-20 увеличивается до 270, что в 30 раз больше, чем при стандартном использовании.

При этом среднее значение дискретности тока, подводимого к защите уменьшается с 2,944 *А* до 0,098 *А*, что позволяет в конечном итоге с высокой степенью точности найти соответствующую комбинацию использования ответвлений автотрансформатора тока и трансреактора и, тем самым, существенно снизить составляющую тока небаланса $I'''_{нб}$, обусловленную неточностью выставления числа витков на ответвлениях защиты.

Обобщённые результаты предлагаемого метода расчёта с точки зрения повышения степени соответствия между выходным током трансформатора тока защиты и номинальным током ответвления трансреактора реле защиты для понижающего автотрансформатора тока типа АТ-32 представлены в таблице 6.

Оценка эффективности применения уточнённого метода расчёта продольной дифференциальной токовой защиты трансформаторов энергоблоков

Для оценки эффективности предлагаемого метода расчёта продольной дифференциальной защиты был выполнен расчёт защиты по типовой и уточнённой методикам следующих трансформаторов энергоблоков типа ВВЭР-1000:

– блочный трансформатор ОРЦ-417000/24;
– блочный трансформатор ТЦ-1250/347;
– рабочие трансформаторы собственных нужд ТРДНС-63000/35 для энергоблоков с высшим напряжением 330 и 750 *кВ*;

– резервный трансформатор собственных нужд ТРДНС-63000/330.

Таблица 3. *Обобщённые результаты уточнения выбора ответвлений повышающего автотрансформатора тока типа АТ-31.*

Диапазон тока на входе, *А*	0,34 – 0,444	0,44 – 0,60	0,60 – 0,81	0,81 – 1,10	1,10 – 1,45	1,45 – 1,97	1,97 – 2,12	2,12 – 2,29	2,29 – 2,50	2,50 – 3,00	3,00 – 3,63	3,63 – 4,25
Степень повышения точности выставления тока на входе АТ, %	18,4	20,2	19,1	13,3	16,2	15,6	4,3	2,7	4,3	9,8	6,5	5,4
Среднее значение погрешности уточнённого метода в диапазоне, %	4,74	3,38	2,54	2,45	2,85	2,59	1,88	2,15	2,32	2,55	3,30	2,88
Среднее значение погрешности стандартного метода в диапазоне, %	6,70	29,6	29,97	30,50	27,3	30,2	7,3	8,0	8,72	18,18	4,75	15,74
Коэффициент эффективности предлагаемого метода	1,414	8,757	11,799	12,449	9,579	11,660	3,883	3,716	3,759	7,129	1,439	5,465
Среднее значение коэффициента эффективности предлагаемого метода	6,754											

Таблица 4. *Технические данные понижающего автотрансформатора тока типа АТ-32.*

Ответвление	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	1-7	1-8	1-9	1-10	1-11
Номинальный ток ответвления, *А*	5,00	5,44	5,88	7,60	9,60	12,2	15,6	20,0	25,0	31,3
Коэффициент трансформации	-	0,920	0,850	0,660	0,520	0,410	0,320	0,250	0,200	0,160

Таблица 5. *Значения коэффициента трансформации понижающего автотрансформатора тока типа АТ-32 в предлагаемом методе.*

1-10	0,800								
1-9	0,640	0,800							
1-8	0,500	0,625	0,781						
1-7	0,390	0,488	0,610	0,780					
1-6	0,308	0,387	0,481	0,615	0,788				
1-6	0,242	0,303	0,379	0,485	0,621	0,788			
1-4	0,188	0,235	0,294	0,376	0,482	0,612	0,776		
1-3	0,174	0,217	0,272	0,348	0,446	0,565	0,717	0,924	
1-2	0,160	0,200	0,250	0,320	0,410	0,520	0,660	0,850	0,920
	1-11	*1-10*	*1-9*	*1-8*	*1-7*	*1-6*	*1-5*	*1-4*	*1-3*
Номера ответвлений									

Обобщённые количественные и качественные показатели расчёта для блочных трансформаторов ТЦ-1250/347 для энергоблоков типа ВВЭР-1000 с высшим напряжением 330 *кВ* и ОРЦ-417000/24 для энергоблоков с высшим напряжением 750 *кВ* приведены в таблице 7.

Таблица 6. *Обобщённые результаты уточнения выбора ответвлений понижающего автотрансформатора тока типа АТ-32.*

Диапазон тока на входе, *А*	5,00 – 5,44	5,44 – 5,88	5,88 – 7,60	7,60 – 9,61	9,61 – 12,2	12,2 – 15,6	15,6 – 20,0	20,0 – 25,0	25,0 – 31,3
Степень повышения точности выставления тока на входе АТ, %	3,4	4,1	10,8	9,24	11,4	11,9	10,4	11,6	11,7
Среднее значение погрешности уточнённого метода в диапазоне, %	1,13	1,13	1,32	1,11	1,52	1,65	1,65	2,82	7,27
Среднее значение погрешности стандартного метода в диапазоне, %	7,09	7,90	25,17	23,72	22,66	24,66	24,56	22,20	22,38
Коэффициент эффективности предлагаемого метода	6,272	7,027	19,072	21,369	15,586	14,945	14,858	7,880	3,078
Среднее значение коэффициента эффективности предлагаемого метода	12,232								

Таблица 7. *Обобщённые количественные и качественные показатели расчёта для блочных трансформаторов ТЦ-1250/347 и ОРЦ-417000/24.*

Тип блочного трансформатора	Метод расчёта	Погрешность при выборе тока ответвления АТ на стороне ВН трансформатора	Погрешность при выборе тока ответвления трансреактора на стороне ВН трансформатора	$I_{ср\ min}$	Эффективность метода при определении $I_{ср\ min}$	Доля $I_{нб}'''$ от $I_{нб\ \Sigma}$	Эффективность метода по уменьшению доли $I_{нб}'''$ от $I_{нб\Sigma}$	$k_ч$ защиты	Эффективность метода при определении $k_ч$ защиты
		%	%	*о.е.*	-	%	-	*о.е.*	-
ОРЦ-417000	Типов.	9,66	9,48	0,328	1,086	48,99	7,62	5,23	1,087
	Уточн.	0,63	0,40	0,302		6,43		5,68	
ТЦ-1250	Типов.	24,9	4,50	0,315	1,047	31,00	2,20	5,38	1,047
	Уточн.	1,47	1,60	0,301		14,10		5,64	

Обобщённые количественные и качественные показатели расчёта для рабочего трансформаторов собственных нужд ТРДНС-63000/35 для энергоблоков с высшим напряжением 330 и 750 *кВ* и резервного трансформатора собственных нужд ТРДНС-63000/330 приведены в таблице 8.

В результате проведённого анализа схемы включения продольной дифференциального устройства защиты серии ДЗТ-20 и методики её расчёта выявлена возможность повышения точности расчёта продольной дифференциальной защиты трансформаторов энергоблоков за счёт расширения диапазона коэффициентов трансформации промежуточных автотрансформаторов тока типа АТ-31 и АТ-32. Использование возможности комбинирования ответвлениями автотрансформаторов тока совместно с ответв-

лениями трансреактора дифференциального устройства защиты ДЗТ-20 позволяет существенно уменьшить дискретность величины тока, подводимого к защите, что, в свою очередь, значительно уменьшает составляющую тока небаланса $I'''_{нб}$, обусловленную неточностью выставления числа витков на ответвлениях защиты.

Таблица 8. *Обобщённые количественные и качественные показатели расчёта для рабочих трансформаторов собственных нужд ТРДНС-63000/35 для энергоблоков с высшим напряжением 330 и 750 кВ и резервного трансформатора собственных нужд ТРДНС-63000/330.*

Тип трансформатора собственных нужд и $U_{ВН}$ блока	Метод расчёта	Погрешность при выборе тока ответвления АТ на стороне ВН трансформатора	Погрешность при выборе ответвления трансреактора на стороне ВН трансформатора	Погрешность при выборе тока ответвления АТ на стороне НН трансформатора	Доля $I'''_{нб}$ от $I_{нб\,\Sigma}$	Эффективность метода по уменьшению доли $I'''_{нб}$ от $I_{нб\,\Sigma}$	$I_{ср\,min}$	Эффективность метода при определении $I_{ср\,min}$	$k_ч$ защиты	Эффективность метода при определении $k_ч$ защиты
		%	%	%	%	-	*о.е.*	-	*о.е.*	-
ТРДНС-63000/35 $U_{ВН}$=330 *кВ*	Типов.	31,5	9,6	9,86	34,55	5,72	0,317	1,057	2,816	1,437
	Уточн.	1,37	1,38	1,08	6,04		0,300		4,047	
ТРДНС-63000/35 $U_{ВН}$=750 *кВ*	Типов.	31,5	9,6	9,86	34,55	5,72	0,317	1,057	3,107	1,301
	Уточн.	1,37	1,38	1,08	6,04		0,300		4,043	
ТРДНС-63000/330	Типов.	15,73	15,72	9,86	34,50	15,00	0,347	1,130	2,419	1,697
	Уточн.	0,78	0,63	1,08	2,30		0,307		4,105	

Заключение

1. Учитывая тот факт, что в качестве ответвления, к которому подключается трансреактор устройства защиты серии ДЗТ-20, возможно использовать не только выводы 1-11 для АТ-31 или 1-2 для АТ-32, но и восемь других, число возможных значений коэффициента трансформации согласующих автотрансформаторов тока типа АТ-31 и АТ-32 возрастает до 45, т.е. в пять раз больше.

2. Если на вход трансреактора устройства защиты серии ДЗТ-20 подавать не только 2,5 *А*, при использовании АТ-31 или 5,0 *А* при использовании АТ-32, но и ещё пять других, то число возможных комбинаций совместного использования автотрансформаторов тока и дифференциального устройства защиты серии ДЗТ-20 увеличивается до 270, что в 30 раз больше, чем при стандартном использовании.

3. За счёт более точного выбора ответвлений согласующих автотрансформаторов тока и трансреактора защиты доля составляющей тока небаланса, обусловленной неточностью выставления числа витков в обмотках защиты в среднем уменьшилась в 8,44 раза, что привело к уменьшению уставки по минимальному току срабатывания защиты в среднем в 1,076 раза, а коэффициент чувствительности возрос в среднем в 1,318 раза, что очевидным образом свидетельствует о преимуществах предложенного метода расчёта защиты.

Список литературы

1. Голанцов Е.Б., Молчанов В.В. Дифференциальные защиты трансформаторов с реле защиты ДЗТ-21 (ДЗТ-23) /Е.Б. Голанцов. – М.: «Библиотека электромонтёра». Выпуск 631. «Энергоатомиздат», 1990. – 88 с.
2. Релейная защита понижающих трансформаторов и автотрансформаторов 110-500 кВ. Расчёты. «Руководящие указания по релейной защите». Выпуск 13Б. – М.: Энергоатомиздат, 1985.
3. Методические указания по наладке и проверке дифференциальной защиты ДЗТ-21, ДЗТ-23. – М.: СПО «Союзтехэнерго», 1981.

References

1. Golantsov E.B., Molchanov V.V. Differential protection of transformers with the relay of the protection DZT-21 (DZT-23) /E.B. Golantsov.-M.: «Library of electrician». Issue 631. «Energoatomyzdat», 1990. – 88 p.
2. Relay protection of step-down transformers and autotransformers is 110-500 кV. Calculations. «Leading pointing on relay protection». Issue 13Б.-M.: Energoatomyzdat, 1985.
3. Methodical pointing on adjusting and verification of the differential protection DZT-21, DZT-23.-M.: SPO «Soyuztekhenergo», 1981.

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 551.58

Анализ генерации радиоактивных газов в экспериментальных устройствах исследовательского реактора ИР-100

П. А. Пономаренко[1], М. А. Фролова[2], И. Г. Тананаев[3], Д.О. Пшеничная[4]
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33, г. Севастополь, 299053, Россия. [1]ppa4493@gmail.com, [2] frolova-85@mail.ru, [3]geokhi@mail.ru, [4]dasha-96-22@yandex.ru

Статья поступила 28.01.2019 г.; после доработки 31.01.2019.г.

Аннотация

Статья посвящена рассмотрению процесса генерации радионуклидов химических элементов, которые являются составляющими воздушной среды облучательных устройств ядерного исследовательского реактора и представить расчет наведенной удельной активности ядрами-продуктами воздушной среды, учитывая, что в вертикальных экспериментальных каналах, находящихся во втором слое графитового отражателя, преобладают нейтроны тепловых энергий.

Ключевые слова: генерация, радионуклиды, исследовательский реактор, экспериментальные каналы, спецустройства.

Analysis of radioactive gas generation in experimental devices of the research reactor IR-100

M. A. Frolova[1], P. A. Ponomarenko[2], I. G. Tananaev [3], D.O. Pshenichnaya[4]
Federal STATE Autonomous educational institution "Sevastopol state University", University-33, Sevastopol, 299053, Russia.[1] ppa4493@gmail.com, [2] frolova-85@mail.ru, [3]geokhi@mail.ru, [4]dasha-96-22@yandex.ru

Received 28.01.2019 y.; received in final form 31.01.2019 y.

Annotation

The article is devoted to the consideration of the process of generation of radionuclides of chemical elements that are components of the air environment of irradiation devices of a nuclear research reactor and to present the calculation of the induced specific activity by nuclei-products of the air environment, taking into account that in the vertical experimental channels located in the second layer of the graphite reflector, neutrons of thermal energies prevail.

Keywords: generation, radionuclide, research reactor, special devices, experimental channel.

Введение

На момент физического пуска исследовательского ядерного реактора ИР-100 состояние всех видов и систем безопасности, в том числе радиационная безопасность, соответствовали нормативным документам того времени. С тех пор прошло 40 лет.

За это время нормативные документы в части касающейся радиационной безопасности стали более жесткими и более конкретными.

В связи с этим возникла необходимость по-

верить соответствие радиационной обстановки зоны строго режима требованиям современных документов [1].

При проведении экспериментов количественную оценку поступления радионуклидов в организм персонал не проводит, но, за рабочий день в 8 часов, ингаляционно в организм поступает и облученный воздух объемом примерно 10^7 $см^3$. Поэтому задача, которую необходимо решить – рассмотреть процесс генерации радионуклидов химических элементов, которые являются составляющими воздушной среды облучательных устройств ядерного исследовательского реактора и представить расчет наведенной удельной активности ядрами-продуктами воздушной среды, учитывая, что в вертикальных экспериментальных каналах (далее – ВЭК) находящихся во втором слое графитового отражателя, преобладают нейтроны тепловых энергий.

Исследовательский реактор ИР-100 представляет собой ядерный реактор водо–водяного бассейнового типа, на тепловых нейтронах, мощность 200 кВт. Ядерное топливо UO_2 в виде метало – керамических стержней диаметром 7 см и длиной 50 см. Каждый стержень находится в цилиндрической герметичной оболочке диаметром 1·0,1 см из алюминиевого сплава АД – 1. Эта конструкция представляет собой тепловыделяющий элемент. 7 ТВЭЛов объединены и размещены в одной конструкции по треугольной решетке. Такая конструкция называется тепловыделяющей сборкой (далее - ТВС) [2, 3]. В активной зоне находится 46 ТВС.

В принципе, исследовательские реакторы являются источниками полей проникающей радиации (нейтронных и гамма) высокой интенсивности, и служащей для обеспечения облучения в этих полях различных материалов, а также исследования свойств этих новых материалов, которые возникают в результате трансформации исходных. Эти технологические операции должны быть абсолютно безопасными для персонала, который их реализует. Поэтому исследовательские реакторы оборудуются спецустройствами для безопасного облучения. ИР-100 имеет 17 таких экспериментальных устройств различного назначения. В этих устройствах вместе с облучаемой пробой облучается и воздух внутри устройства. Кроме того, воздух устройства облучается при работе реактора всегда, не важно загружена в устройство проба или нет. Часть экспериментальных устройств для реализации безопасной технологии облучения герметичны, а часть - нет.

По условиям обеспечения безопасности в негерметичных устройствах спецвентиляция при работе реактора должна работать всегда и, благодаря этому, в негерметичных устройствах поддерживается небольшой вакуум. Поэтому в эти устройства через щели идет подсос чистого воздуха и образующиеся в негерметичных устройствах радиоактивные газы и аэрозоли попасть в рабочие помещения не могут. К герметичным устройствам относятся центральный экспериментальный канал и вертикальные экспериментальные каналы (рис.1), которые находятся в графитовом отражателе. Последнее свидетельствует о том, что в вертикальных экспериментальных каналах значительно преобладает плотность потока тепловых нейтронов.

Все герметичные устройства представляют собой алюминиевые трубы с нижним дном, а верхняя часть трубы закрывается специальной пробкой при открытии которой, накопившиеся в канале за время работы реактора радиоактивные газы и аэрозоли попадают в рабочие помещения. Вот почему актуальна информация о виде и величине активности накопившихся радиоактивных газов и аэрозолей в этих каналах, и какую удельную активность воздуха в рабочем помещении эти газы и аэрозоли создадут при вскрытии экспериментального канала в любое рабочее время. Настоящая статья и посвящена анализу такой информации при работе реактора на номинальной мощности и после его остановки в вертикальном экспериментальном канале (далее - ЭК) ВЭК – 4.

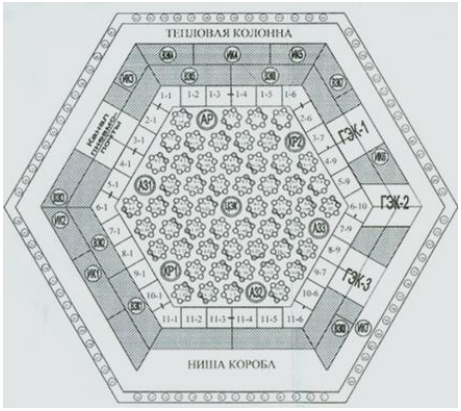

Рис. 1. Поперечный разрез активной зоны реактора ИР-100.

Канал ВЭК имеет внутренний диаметр $d_п$=76 мм, длина канала $H_п$= 3800 мм, верхняя часть канала закрыта пробкой на глубину $H_{пр}$=1760 мм [2, 3]. Следовательно, объем воздуха внутри канала составляет $9{,}3 \cdot 10^3$ $см^3$:

В связи с тем, что температура воздуха в Севастополе и, соответственно, в экспериментальном канале ВЭК-4 изменяется в широких пределах весь анализ будет проводится при температуре воздушной среды равной 30ºС. Плотность воздуха при этих условиях составляет $1{,}165\cdot10^{-3}$ г·см$^{-3}$. Масса этого воздуха при условиях (760 мм Hg и t=30 ºС) будет равна 10,8 г.

Средние данные о качестве севастопольского воздуха, который облучается в канале ВЭК-4: средняя влажность воздуха 70 %; абсолютная влажность воздуха при температуре 30 ºС будет составлять $2{,}1\cdot10^{-5}$ г·см$^{-3}$. Кроме того, атмосферная вода содержит до 300 мг·л$^{-1}$ хлор-ионов.

Состав облучаемого воздуха в канале ВЭК-4 принят следующим: азот 75,5 масс. %, кислород 23,1 масс. %, аргон 1,29 масс. %, углекислый газ 0,046 масс. %, неон $1{,}3\cdot10^{-3}$ масс. %, гелий $7{,}2\cdot10^{-5}$ масс. %, криптон $2{,}9\cdot10^{-4}$ масс. %, водород $3{,}5\cdot10^{-6}$ масс. %, двуокись азота $7{,}6\cdot10^{-5}$ масс. %, ксенон $3{,}6\cdot10^{-6}$ масс. %, вода в канале составляет 0,2 г, а хлор-ионы – 0,06 мг.

Эти данные позволяют оценить массу и число ядер составляющих воздуха в ВЭК-4 при выбранных условиях, которые облучаются плотностью потока тепловых нейтронов в этом канале (таблица 1).

Таблица 1 *Расчетные значения массы и числа ядер химических элементов*

N п/п	Химический элемент	Масса элемента в канале ВЭК-4, г	Число ядер элемента в канале ВЭК-4
1	N	8,154	$3{,}51\cdot10^{23}$
2	O	2,5	$9{,}41\cdot10^{22}$
3	Ar	0,138	$2{,}08\cdot10^{21}$
4	Ne	$1{,}4\cdot10^{-4}$	$4{,}18\cdot10^{18}$
5	He	$7{,}78\cdot10^{-6}$	$1{,}17\cdot10^{18}$
6	Kr	$3{,}13\cdot10^{-5}$	$2{,}21\cdot10^{17}$
7	H	$3{,}78\cdot10^{-7}$	$2{,}28\cdot10^{17}$
8	H_2O	0,2	$6{,}69\cdot10^{21}$
	H	0,022	$1{,}33\cdot10^{22}$
	O	0,178	$6{,}7\cdot10^{21}$
9	Xe	$3{,}88\cdot10^{-7}$	$1{,}78\cdot10^{15}$
10	Cl	$6\cdot10^{-4}$	$1{,}02\cdot10^{19}$
11	CO_2	0,005	$6{,}84\cdot10^{19}$
	C	0,00136	$6{,}83\cdot10^{19}$
	O	0,00364	$1{,}37\cdot10^{20}$
12	NO_2	$8{,}21\cdot10^{-6}$	$1{,}12\cdot10^{17}$
	N	$2{,}5\cdot10^{-6}$	$1{,}08\cdot10^{17}$
	O	$5{,}71\cdot10^{-6}$	$2{,}15\cdot10^{17}$
13	∑O	2,682	$1{,}01\cdot10^{23}$
14	∑H	0,022	$1{,}33\cdot10^{22}$
15	∑N	8,154	$3{,}51\cdot10^{23}$

В связи с этим число ядер каждого из изотопов рассмотренных всех химических элементов в воздухе экспериментального канала будет составлять [4] (табл. 2):

Таблица 2 *Число ядер каждого из изотопов химических элементов воздуха*

Нуклид	Число ядер	Нуклид	Число ядер
$^{14}_{7}N$	$3{,}49\cdot10^{23}$	$^{78}_{36}Kr$	$7{,}74\cdot10^{14}$
$^{15}_{7}N$	$1{,}3\cdot10^{21}$	$^{80}_{36}Kr$	$5{,}02\cdot10^{15}$
$^{16}_{8}O$	$1{,}01\cdot10^{23}$	$^{82}_{36}Kr$	$2{,}55\cdot10^{16}$
$^{17}_{8}O$	$3{,}7\cdot10^{19}$	$^{83}_{36}Kr$	$2{,}55\cdot10^{16}$
$^{18}_{8}O$	$2{,}06\cdot10^{20}$	$^{84}_{36}Kr$	$1{,}26\cdot10^{17}$
$^{36}_{18}Ar$	$7{,}07\cdot10^{18}$	$^{86}_{36}Kr$	$3{,}84\cdot10^{16}$
$^{38}_{18}Ar$	$1{,}31\cdot10^{18}$	$^{124}_{54}Xe$	$1{,}71\cdot10^{12}$
$^{40}_{18}Ar$	$2{,}07\cdot10^{21}$	$^{126}_{54}Xe$	$1{,}6\cdot10^{12}$
$^{12}_{6}C$	$6{,}76\cdot10^{19}$	$^{128}_{54}Xe$	$3{,}42\cdot10^{13}$
$^{13}_{6}C$	$7{,}59\cdot10^{17}$	$^{129}_{54}Xe$	$4{,}71\cdot10^{14}$
$^{20}_{10}Ne$	$3{,}8\cdot10^{18}$	$^{130}_{54}Xe$	$7{,}26\cdot10^{13}$
$^{21}_{10}Ne$	$1{,}09\cdot10^{16}$	$^{131}_{54}Xe$	$3{,}77\cdot10^{14}$
$^{22}_{10}Ne$	$3{,}69\cdot10^{17}$	$^{132}_{54}Xe$	$4{,}79\cdot10^{14}$
$^{4}_{2}He$	$1{,}17\cdot10^{18}$	$^{134}_{54}Xe$	$1{,}86\cdot10^{14}$
$^{1}_{1}H$	$1{,}33\cdot10^{22}$	$^{136}_{54}Xe$	$1{,}58\cdot10^{14}$
$^{2}_{1}H$	$2\cdot10^{18}$		
$^{35}_{17}Cl$	$7{,}69\cdot10^{18}$		
$^{37}_{17}Cl$	$2{,}51\cdot10^{18}$		

Ядерно-химические модели

Схемы ядерно-химических моделей трансформации ядер представленных изотопов химических элементов в поле тепловых нейтронов в ВЭК-4 будут иметь вид [4, 5]:

$$^{14}_{7}N(n_m;\gamma)^{15}_{7}N,\ \sigma_a=0{,}08\ \text{барн}$$

$$^{16}_{8}O(n_m;\gamma)^{17}_{8}O,\ \sigma_a=0{,}08\ \text{барн}$$

$$^{14}_{7}N\left(n_m;^{1}_{1}p\right)^{14}_{6}C,\ \sigma_a=1{,}75\ \text{барн}$$

$$^{17}_{8}O\left(n_m;^{4}_{2}\alpha\right)^{14}_{6}N,\ \sigma_a=0{,}45\ \text{барн}$$

$$^{15}_{7}N(n_m;\gamma)^{16}_{7}N,\ \sigma_a=24\cdot10^{-3}\ \text{мбарн}$$

$$^{18}_{8}O(n_m;\gamma)^{19}_{8}N,\ \sigma_a=0{,}21\ \text{мбарн}$$

$$^{36}_{18}Ar(n_m;\gamma)^{36}_{18}Ar,\ \sigma_a=6\ \text{барн}$$

$$^{1}_{1}H(n_m;\gamma)^{1}_{1}H,\ \sigma_a=332\ \text{мбарн}$$

$$^{38}_{18}Ar(n_m;\gamma)^{39}_{18}Ar,\ \sigma_a=0{,}8\ \text{барн}$$

$$^{2}_{1}H(n_m;\gamma)^{3}_{1}H,\ \sigma_a=0{,}57\ \text{мбарн}$$

$$^{40}_{18}Ar(n_m;\gamma)^{41}_{18}Ar,\ \sigma_a=0{,}53\ \text{барн}$$

$$^{35}_{17}Cl(n_m;\gamma)^{36}_{17}Cl,\ \sigma_a=30\ \text{барн}$$

или

$$^{37}_{17}Cl(n_m;\gamma)^{38}_{17}Cl,\ \sigma_a=5\ \text{мбарн}$$

$$^{35}_{17}Cl\left(n_m;^{4}_{2}\alpha\right)^{32}_{15}P,\ \sigma_a=0{,}05\ \text{мбарн}$$

$$^{12}_{6}C+n_m \xrightarrow{\sigma_a=3{,}3\ \text{барн}} \gamma+^{13}_{6}C$$

$$^{35}_{17}Cl\left(n_m;^{1}_{1}p\right)^{35}_{16}S,\ \sigma_a=0{,}3\ \text{барн}$$

$$^{13}_{6}C(n_m;\gamma)^{14}_{6}C,\ \sigma_a=0{,}9\ \text{мбарн}$$

Анализ приведенных моделей ядерно-химических преобразований, позволяет заключить:

– образовавшиеся дочерние нуклиды: $^{15}_{7}N$, $^{17}_{8}O$, $^{2}_{1}H$ и $^{13}_{6}C$ стабильны, поэтому на радиационную обстановку окружающей среды не влияют и из дальнейшего рассмотрения могут быть исключены;

– образовавшиеся радионуклиды: $^{16}_{7}N$, $^{19}_{8}O$ имеют малый период полураспада. Такие радионуклиды также из дальнейшего рассмотрения в статье исключаются;

– образовавшиеся радионуклиды: $^{14}_{6}C$, $^{3}_{1}H$, $^{39}_{18}Ar$, $^{36}_{17}Cl$ имеют очень большой период полураспада и будут участвовать в дальнейшем анализе;

– часть радионуклидов характеризуются средними периодами полураспада и по классификации относятся к инертным газам: $^{79,83,85,87}_{36}Kr$, $^{37,40}_{18}Ar$, $^{125,127,129m,131m,133m,135}_{54}Xe$. Эти радионуклиды рассматриваются как источник внешнего облучения для объектов биосферы;

– радионуклиды $^{36,38}_{17}Cl$, $^{32}_{15}P$, $^{35}_{16}S$, а также дочерние радионуклиды второго поколения $^{87}_{37}Rb$, $^{125}_{53}Y$, $^{135,137}_{55}Cs$ относятся к радионуклидам внешнего и возможного внутреннего облучения, поэтому рассматриваться будут только нуклиды $^{36,38}_{17}Cl$, $^{32}_{15}P$, $^{35}_{16}S$.

Во всех ядерно-химических моделях трансформации, составляющих воздуха в поле тепловых нейтронов, последние являются активнейшей составляющей, которая характеризуется величиной – плотность потока тепловых нейтронов. Измерению этой составляющей было отведено на исследовательском реакторе очень значительное время.

Плотность потока тепловых нейтронов в ВЭК-4

Работы по измерению плотности потока нейтронов в канале ВЭК-4 проводились под руководством Пономаренко П.А. и при участии Фроловой М.А. [6, 7], результаты которых отражены в [8, 9]. Плотность потока измерялась экспериментально аналитически с помощью набора активационных детекторов, аттестованных Всероссийским научно-исследовательским институтом физико-технических и радиотехнических измерений (далее – ВНИИФТРИ): АКН и АКН-Т [10]. Абсолютная плотность потока тепловых нейтронов измерялась дисковыми золотыми детекторами из набора АКН-Т с использованием из этого набора кадмиевых чехлов.

Активность облученного детектора измерялась на аттестованных ВНИИФТРИ гамма-анализаторе АИ-1024 и CANBERRA по измерению гамма-квантов. бета активность золотого детектора измерялась с помощью торцевого счетчика МСТ-17 на аттестованном приборе ПСО-2-4.

В ВЭК-4 нейтронное поле складывается из поля тепловых, замедляющихся и нейтронов спектра деления. все указанные группы нейтронов облучают золотой детектор и создают активность в нем, пропорционально плотностям потоков каждого вида нейтронов. чтобы выделить активность, пропорциональную плотности потока только тепловых нейтронов в одной и той же точке пространства ВЭК-4 и при одинаковой мощности нейтронов последовательно облучались два дисковых золотых детектора: один в стандартном кадмиевом чехле, другой – без чехла. Кадмиевый чехол непрозрачен для тепловых нейтронов. Таким образом активность золотого детектора после облучения без чехла пропорциональна плотностям потоков всех нейтронов. Активность золотого детектора, облученного в кадмиевом чехле пропорциональна плотностям потоков, замедляющихся и нейтронов спектра деления. Разность этих двух активностей дает активность, пропорциональную только плотности потока тепловых нейтронов. используя зависимость, речь о которой пойдет ниже, активности и плотности потока нейтронов аналитически определялась плотность потока тепловых нейтронов [12-15]. По

измеренной активности (a) плотность потока тепловых нейтронов вычислялась аналитически по формуле:

$$\Phi_{тн}=\frac{A\cdot m\cdot e^{\lambda_{au}\cdot T_{выд}}}{\Sigma^{au}_{акт}\cdot N_a\cdot(1-e^{-\lambda_{au}\cdot T_{обл}})};\frac{н}{см^2\cdot с}$$

Где: a – измеренная активность детектора, бк; $м$ – массовое число золота $^{197}_{79}au$, г·моль$^{-1}$; λ_{au} – постоянная распада $^{198}_{79}au$, с$^{-1}$; $\sigma_{акт}^{au}$ – сечение активации золота $^{197}_{79}au$, см^2; n_a – число авогадро, моль$^{-1}$; $t_{обл}$ – время облучения детектора, с; $t_{выд}$ – время от конца облучения до измерения активности детектора, с.

Распределение плотности потока тепловых нейтронов по высоте канала ВЭК-4 определялась с помощью аттестованных ВНИИФТРИ медных детекторов в кадмиевых чехлах и без. Измерение активности медных детекторов осуществлялось по энергии гамма-квантов 0,511 МэВ $^{64}_{29}Cи$ на гамма-анализаторах, указанных выше. Бета-активность медных детекторов измерялась счетчиком МСТ-17 на ПСО-2-4 в области энергий бета частиц 0,05 - 0,656 и 0,05 - 0,573 МэВ.

Распределение плотности потока тепловых нейтронов по высоте канала отличается от косинусоидального (как внутри активной зоны), максимум плотности по отношению к геометрическому центру активной зоны сдвинут вверх, и происходит значительное расширение границ нейтронного поля по вертикали.

Путем графического интегрирования кривой распределения плотности потока тепловых нейтронов по высоте воздушного объема ВЭК-4 определялась средняя плотность потока тепловых нейтронов в канале. Она оказалась равной $3{,}8\cdot10^{11}$ н·см$^{-2}$·с$^{-1}$.

При всех измерениях плотности потока тепловых нейтронов золотыми и медными детекторами всегда использовался и один серный детектор, как свидетель стабильности в канале ВЭК-4 нейтронного поля.

Кроме этого, экспериментально было установлено, что плотности потока нейтронов тепловых, нейтронов спектра деления и нейтронов с энергией более 3 *МэВ* в канале ВЭК-4 пропорциональны тепловой мощности реактора, но с разными коэффициентами пропорциональности:

$$\varphi_{тн}^{ВЭК-4}=К_{тн}^{ВЭК-4}\cdot W_T$$

$$К_{тн}^{ВЭК-4}=1{,}9\cdot10^6=\frac{н}{см^2\cdot с\cdot Вт}$$

$$\varphi_{сд}^{ВЭК-4}=К_{сд}^{ВЭК-4}\cdot W_T$$

$$К_{сд}^{ВЭК-4}=3{,}37\cdot10^4=\frac{н}{см^2\cdot с\cdot Вт}$$

$$\varphi_{E\geq3МэВ}^{ВЭК-4}=К_{E\geq3\ МэВ}^{ВЭК-4}$$

$$К_{E\geq3\ МэВ}^{ВЭК-4}=7\cdot10^3\frac{н}{см^2\cdot с\cdot Вт}$$

Математические модели ядерно-химических превращений химических элементов в ВЭК-4 [11]

Схемы приведенных моделей ядерно-химических превращений элементов под действием тепловых нейтронов дают качественную картину. Количественный анализ таких трансформаций описывается математическими моделями. В основу математических моделей трансформации ядер исходных изотопов был положен закон сохранения вещества:

$$\frac{dN}{dt}=\left(\frac{dN}{dt}\right)_{обр}-\left(\frac{dN}{dt}\right)_{убыли},\ ядер,$$

где: $\frac{dN}{dt}$- - скорость изменения числа ядер составляющих воздуха в кале ВЭК-4.

Например, математическая модель для определения числа ядер $^{14}_6C$, образовавшегося из $^{14}_7N$ будет иметь вид:

$$\begin{cases}\left\{\frac{dN_{N-14}}{dt}=-\sigma_a^{N-14}\cdot N_{N-14}\cdot\overline{\varphi_{тн}}\right.\\ \left\{\frac{dN_{C-14}}{dt}=\sigma_a^{N-14}\cdot N_{N-14}\cdot\overline{\varphi_{тн}}-N_{C-14}\cdot(\lambda_{C-14}+\sigma_a^{C-14}\cdot\overline{\varphi_{тн}})\right.\end{cases}\quad(1)$$

Анализ данной системы: если плотность потока тепловых нейтронов принять равной $3{,}8\cdot10^{11}$ *н·см$^{-2}$·с$^{-1}$* , микросечение активации $^{14}_6C$ менее 200 мбарн, постоянная распада $3{,}95\cdot10^{-12}$ *с$^{-1}$*, то скобка второго уравнения системы (1) будет равно λ_{C-14}. Применяя аналогичный анализ к математическим моделям в дальнейшем, модели будут иметь общий вид, учитывая, что в первом уравнении системы описывается процесс бомбардировки ядер-мишени, а во втором – образование ядер-продукта:

$$\begin{cases}\frac{dN_{ядро\text{-}мишень}}{dt}=-\sigma_a^{ядро\text{-}мишень}\cdot N_{ядро\text{-}мишень}\cdot\overline{\varphi_{тн}}\\ \frac{dN_{ядро\text{-}продукт}}{dt}=\sigma_a^{ядро\text{-}продукт}\cdot N_{ядро\text{-}продукт}\cdot\overline{\varphi_{тн}}-N_{ядро\text{-}продукт}\cdot\lambda_{ядро\text{-}продукт}\end{cases}$$

Таким образом, согласно математическим моделям, в воздухе канала ВЭК-4 под действием тепловых нейтронов получено 8 радионуклидов: $^{14}_{6}C$, $^{3}_{1}H$, $^{37}_{18}Ar$, $^{39}_{18}Ar$, $^{36}_{17}Cl$, $^{38}_{17}Cl$, $^{32}_{15}P$, $^{35}_{16}S$. Активность каждого радионуклида выражается как $A_i = N_i \cdot \lambda_i$ Бк. С учетом этого решением каждой математической системы будет уравнение вида:

$$A_{iя\text{-}n}=\lambda_{iя\text{-}n}\cdot N_{iя\text{-}n}=\frac{\lambda_{iя\text{-}n}\cdot N_{0i}^{я\text{-}м}\cdot\sigma_{ia,акт}^{я\text{-}м}\cdot\overline{\varphi_{тн}}}{\lambda_{доч}+\overline{\varphi_{тн}}\cdot\sigma_{ia,акт}^{д}-\overline{\varphi_{тн}}\cdot\sigma_{ia,акт}^{мат}}\cdot$$
$$\cdot\left[e^{-\overline{\varphi_{тн}}\cdot\sigma_{ia,акт}^{я\text{-}м}\cdot t_{обл}}-e^{-\left(\lambda_{iя\text{-}n}+\overline{\varphi_{тн}}\cdot\sigma_{ia,акт}^{я\text{-}п}\right)\cdot t_{обл}}\right];\frac{Бк}{см^3}\quad(2)$$

где индексом «я-м» обозначено ядро-мишень, а индексом «я-п» – ядро-продукт.

После упрощения формула (2) приводится к виду:

$$A_{iя\text{-}n}=N_{0i}^{я\text{-}м}\cdot\sigma_{ia,акт}^{я\text{-}м}\cdot\overline{\varphi_{тн}}\cdot(1-e^{-\lambda_{я\text{-}n}\cdot t_{обл}})\quad(3)$$

Формула (3) имеет хорошую точность и часто используется в практическом нейтронно-активационном анализе [5]. Анализ наведенной активности в ВЭК-4 выполнялся с использованием упрощенной формулы (3) при различных плотностях потока тепловых нейтронов $\varphi^1=4\cdot10^{11}$ н·см$^{-2}$·с$^{-1}$, $\varphi^2=2\cdot10^{11}$ н·см$^{-2}$·с$^{-1}$, $\varphi^3=10\cdot10^{11}$ н·см$^{-2}$·с$^{-1}$ и средней плотности потока $\varphi^{ср}=3{,}8\cdot10^{11}$ н·см$^{-2}$·с$^{-1}$ при различном времени облучения (50000 с, 100000 с, 150000 с, 200000 с, 300000 с). Произведен расчет активности генерируемых радионуклидов в канале ВЭК-4 (таблица 3).

Таблица 3 *Активности радионуклидов, генерируемых в канале ВЭК-4 при стабильной средней плотности потока тепловых нейтронов в зависимости от времени облучения*

Р/н	$\overline{\varphi_{тн}}=3{,}8\cdot10^{11}$ н·см$^{-2}$·с$^{-1}$					ДОА* Бк/л
	$A^{[1]}$, Бк	$A^{[2]}$, Бк	$A^{[3]}$, Бк	$A^{[4]}$, Бк	$A^{[5]}$, Бк	
^{14}C	4,58 ·10^4	9,15 ·10^4	1,37 ·10^5	1,83 ·10^5	2,74 ·10^5	1,3·10^3
^{3}H	0,39	0,07	0,11	0,15	0,23	4,4·10^6
^{37}Ar	1,89 ·10^5	3,75 ·10^5	5,60 ·10^5	7,42 ·10^5	1,10 ·10^6	-
^{39}Ar	1,65	3,30	4,95	6,60	9,90	-
^{36}Cl	0,32	0,64	0,96	1,28	1,92	24
^{38}Cl	1,71	3,41	5,12	6,83	10,2	3,5·10^2
^{32}P	4,04	7,96	11,78	15,504	22,62	2,5
^{35}S	4,02 ·10^3	8,03 ·10^3	1,20 ·10^4	1,59 ·10^5	2,38 ·10^4	1,5·10^2

[1] при t=50000 с;
[2] при t=100000 с;
[3] при t=150000 с;
[4] при t=200000 с;
[5] при t=300000 с.

*ДОА –Допустимая среднегодовая объемная активность (НРБ-99)

Так, при постоянной мощности реактора ИР-100 активность радионуклидов $^{14}_{6}C$, $^{3}_{1}H$, $^{37}_{18}Ar$, $^{39}_{18}Ar$, $^{36}_{17}Cl$, $^{32}_{15}P$, $^{35}_{16}S$ в зависимости от продолжительности работы реактора растет; образованными активностями $^{39}_{18}Ar$, $^{36}_{17}Cl$ и $^{38}_{17}Cl$ – их влиянием на окружающую среду можно пренебречь. В таблице 4 представлены результаты аналитических исследований зависимости активности дочерних радионуклидов, составляющих воздуха в канале ВЭК-4, от времени работы реактора на различных мощностях.

Таблица 4 *Активности радионуклидов, генерируемых в канале ВЭК-4 при сменных значениях плотности потока тепловых нейтронов*

Р/н	$t_{обл}$ =50 000 с			
	А, Бк при $\overline{\varphi_{тн}}=4\cdot10^{11}$ н·см$^{-2}$·с$^{-1}$	А, Бк при $\overline{\varphi_{тн}}=10^{11}$ н·см$^{-2}$·с$^{-1}$	А, Бк при $\overline{\varphi_{тн}}=5\cdot10^{10}$ н·см$^{-2}$·с$^{-1}$	А, Бк при $\overline{\varphi_{тн}}=10^{10}$ н·см$^{-2}$·с$^{-1}$
$^{14}_{6}C$	49414,74	12052,38	6026,188	1205,238
$^{3}_{1}H$	0,041887	0,010216	0,005108	0,001022
$^{37}_{18}Ar$	203941,8	49741,91	24870,95	4974,191
$^{39}_{18}Ar$	1,781538	0,434521	0,217261	0,043452
$^{36}_{17}Cl$	0,346423	0,084493	0,042247	0,008449
$^{38}_{17}Cl$	1,844275	0,449823	0,224912	0,044982
$^{32}_{15}P$	4,359714	1,063345	0,531672	0,106334
$^{35}_{16}S$	4345,136	1059,789	529,8946	105,9789
Р/н	$t_{обл}$=100 000 с			
	А, Бк при $\overline{\varphi_{тн}}=4\cdot10^{11}$ н·см$^{-2}$·с$^{-1}$	А, Бк при $\overline{\varphi_{тн}}=10^{11}$ н·см$^{-2}$·с$^{-1}$	А, Бк при $\overline{\varphi_{тн}}=5\cdot10^{10}$ н·см$^{-2}$·с$^{-1}$	А, Бк при $\overline{\varphi_{тн}}=10^{10}$ н·см$^{-2}$·с$^{-1}$
$^{14}_{6}C$	98829,474	24104,74996	12052,37	2410,475
$^{3}_{1}H$	0,0837695	0,020431	0,010216	0,002043
$^{37}_{18}Ar$	405492,20	98900,53	49450,27	9890,054
$^{39}_{18}Ar$	3,5630678	0,869040	0,43452	0,086904
$^{36}_{17}Cl$	0,6928461	0,168986	0,084493	0,016899
$^{38}_{17}Cl$	3,6878882	0,89948	0,449742	0,089948
$^{32}_{15}P$	8,5988594	2,097282	1,048641	0,209728
$^{35}_{16}S$	8670,3107	2114,709	1057,355	211,471

Из данных таблицы 4 видно, что:

- при всех рассмотренных в таблице плотностях потоков тепловых нейтронов имеется заметный рост активности дочерних радионуклидов в зависимости от увеличения плотности потока и времени облучения;

- при всех мощностях работы реактора ниже номинальной и временах облучения образованием активности $^{36}_{17}Cl$, $^{38}_{17}Cl$, $^{39}_{18}Ar$ и влиянием на окружающую среду можно пренебречь.

В ходе рассмотрения указанного вопроса

выполнен экспериментально-аналитический анализ ядерно-химических трансформаций, составляющих воздуха в экспериментальном канале реактора ИР-100 ВЭК-4 под действием плотности потока тепловых нейтронов в зависимости от уровня мощности и времени работы реактора. В результате было установлено:

- количественные ядерные характеристики составляющих воздуха в ВЭК-4 были приняты при температуре воздушной среды равной 30ºС и давлении 760 мм Hg;

- плотность потока тепловых нейтронов в ВЭК-4 пропорциональна мощности реактора;

- оценка абсолютных значений плотностей потока тепловых нейтронов и их пространственные распределения в объеме канала были выполнены по методикам и аттестованным техническим средствам ВНИИФТРИ;

- разработаны ядерно-химические модели трансформации составляющих воздуха в ВЭК-4 под действием тепловых нейтронов;

- разработаны, обосновано упрощены математические модели трансформаций элементно-изотопного состава воздуха в ВЭК-4 и представлено общее решение этих моделей;

- представлены расчетные данные активностей дочерних радионуклидов и их анализ;

- среднее суммарное значение активности в канале генерируемых радионуклидов составляет 144,7 Бк/см^3;

- с учетом того, что объем надреакторного помещения №102 составляет 755 м3 и при отсутствии работающей вентиляции активность воздуха, в том числе вдыхаемого персоналом, увеличивается до 1,78 Бк/л, что не превышает нормативных значений ни по одному из параметров;

- расчетное значение совпадает с экспериментальными данными измерений с помощью прибора РВ-4. При этом отличие результатов измерений составляет ~ 8 %.

Факт значительного превышения по всем радионуклидам в канале допустимых значений говорит о том, что наведенная активность превалирует именно в воздушной среде канала ВЭК-4, но при вскрытии пробки происходит разбавление с воздушной средой надреакторного помещения, объем которого составляет $32 \cdot 10^3$ м^3, и эта активность в помещении значительно снижается в первые секунды после вскрытия. В конечном итоге активность по всем радионуклидам в отдельности в надреакторном помещении будет ниже допустимых значений [1].

Таким образом, цель статьи достигнута – определено, что при работе реактора на мощности, ингаляционно, обслуживающий персонал, находясь в надреакторном помещении, вдыхает воздух суммарной активностью 7,12 Бк за один вдох. Это значение активности не превышает допустимых значений норм радиационной безопасности.

Список литературы

1. СанПиН 2.6.1.2523-09 Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009 // Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 07 июля 2009 года №47.
2. Лабораторный практикум по курсу ядерных реакторов и парогенераторов / коллектив авторов под редакцией член-корреспондента АН СССР А.А. Саркисова. - ВМФ, 1986. - 225 с.
3. Черняев, С.В. Лабораторные работы на ядерном реакторе «ИР-100». Часть 1 / под редакцией доктора технических наук, профессора А.А. Саркисова. – Севастополь: Севастопольское высшее военно-морское инженерное училище, 1977. – 64 с.
4. Гордеев, И.В. Справочник по ядерно-физическим константам для расчетов реакторов / Гордеев И.В., Кардашев Д.А., Малышев А.В. - Москва: Издательство государственного комитета совета министров СССР по использованию атомной энергии, 1960. – 279 с.
5. Меднис, И.В. Справочные таблицы для нейтронно-активационного анализа / И.В. Меднис. - Рига: Изд-во Зинатне, 1974. - 410 с.
6. Измерение плотности потока тепловых нейтронов с помощью аттестованного набора АКН-Т. Методические рекомендации [Текст]: отчет о НИР: / Мин-во топлива и энергетики Украины, Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности; рук. Подтынных В.Н.; исполн.: Пономаренко П.А. – Севастополь, 2008. – 23 с.
7. Определение плотности потока тепловых нейтронов при облучении золотых детекторов [Текст]: отчет научно-технический: / Мин-во топлива и энергетики Украины, Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности; рук. Подтынных В.Н.; исполн.: Пономаренко П.А. – Севастополь, 2008. – 28 с.
8. Фролова М.А. Экспериментально-аналитическое измерение плотности потока тепловых нейтронов в экспериментальных каналах реактора ИР-100 / М.А. Фролова, П.А. Пономаренко, Е.Н. Киеня, В.А. Тяпкина // Сборник научных трудов Севастопольского национального университета ядерной энергии и промышленности. – 2009. – Т. 2, № 30.
9. Фролова М.А. Экспериментально-аналитическое измерение плотности потока тепловых нейтронов в отражателе реактора ИР-

100 / П.А. Пономаренко, Е.Н. Киеня, М.А. Фролова, С.С. Безотосный // Сборник научных трудов Севастопольского национального университета ядерной энергии и промышленности. – 2010. – Т 3, № 35.
10. Свидетельство о метрологической аттестации набора активационных комплектов нейтронных тепловых АКН-Т-3 №617. - Всесоюзный ордена трудового красного знамени научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, 1986. – 10 с.
11. Левин В.И. Измерение ядерных излучений / В.И. Левин, Л.П. Хамьянов. – М.: Атомиздат, 1969. – 233 с.
12. Крамер-Агеев, Е.А. Активационные методы спектрометрии нейтронов / Е.А. Крамер-Агеев, В.С. Трошин, Е.Г. Тихонов. – Москва: Атомиздат, 1976. – 232 с.
13. Ломакин, С.С. Радиометрия нейтронов активационным методом / С.С. Ломакин, В.И. Петров, П.С. Самойлов. Москва: Атомиздат, 1975. – 208 с.
14. Бриксман, Б. А. Внутриреакторная дозиметрия: Практическое руководство / Б.А. Бриксман, В.В. Генералова, Е.А. Крамер-Агеев, В.С. Трошин. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 200 с.
15. Климентов, В.Б. Активационные измерения потоков и спектров нейтронов в ядерных реакторах / В.Б. Климентов, Копчинский Г.А., Фрунзе В.В. – Издательство стандартов, 1974. – 208 с.

References

1. SanPiN 2.6.1.2523-09 Norms of radiation safety NRB-99/2009 / / Post-innovation of the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation dated July 07, 2009 №47.
2. Laboratory workshop on the course of nuclear reactors and steam generators / number of authors edited by corresponding member of the USSR Academy of Sciences A. A. Sarkisov. - Navy, 1986. 225 p.
3. Chernyaev, S. V. Laboratory work at the nuclear reactor "IR-100". Part 1 / edited by doctor of technical Sciences, Pro-fessor A. A. Sarkisov. - Sevastopol: Se-vastopol higher naval engineering school, 1977. - 64 p –
4. Gordeev, I. V. reference Book on nuclear-physical constants for reactor calculations / Gordeev I. V., Kardashev D. A., Malyshev A.V.-Moscow: publishing House of the state Committee of the Council of Ministers of the USSR on the use of atomic energy, 1960. - 279 p.
5. Mednis, I. V. Reference tables for neutron activation analysis / I. V. Mednis. - Riga: zinatne publishing House, 1974. - 410 p.
6. Measurement of thermal neutron flux density using a certified set of APC-T. Guidelines [Text]: report on R & d: / Min fuel and energy of Ukraine, Sevastopol national University of nuclear energy and industry; hands. Podlinnykh V. N.; version: Ponomarenko P. A.-Sevastopol, 2008. 23 PP –
7. Determination of the heat flux density of neutrons under irradiation of gold detectors [Text]: scientific and technical report: / Min.of fuel and energy of Ukraine, Se-vastopol national University of nuclear energy and industry; ruk. Podlinnykh V. N.; version: Ponomarenko P. A.-Sevastopol, 2008. - 28 p.
8. Frolova M. A. Experimental and analytical measurement of thermal neutron flux density in the experimental channels of the reactor IR-100 / M. A. Frolova, P. A. Ponomarenko, E. N. Kienya, V. A. Tyapkina / / Collection of scientific works of Sevastopol national University of nuclear energy and industry. - 2009. - Vol. 2, № 30.
9. Frolova M. A. Experimental and analytical measurement of thermal neutron flux density in the reactor reflector IR-100 / P. A. Ponomarenko, E. N. Kienya, M. A. Frolova, S. S. bezotosny // Collection of scientific works of Sevastopol national University of nuclear energy and industry. - 2010. - T 3, № 35.
10. Certificate of metrological certification kit activation.-ing neutron heat APC-T-3 No. 617. - All-Union order of the red zna-meni research Institute of Fi-Zico-technical and radio engineering measurements, 1986. - 10 PP –
11. Levin V. I. Measurement of nuclear radiation-cheny / V. I. Levin, L. P. Hamanov. - Moscow: Atomizdat, 1969. - 233 p.
12. Kramer-Ageev, A. E. Activation methods of neutron spectrometry / E. A. Kramer-Ageev, V. S. Troshin, E. G. Tikhonov. - Moscow: Atomizdat, 1976. - 232 p.
13. Lomakin, S. S. Radiometry of neutrons by activation method / S. S. Lomakin, V. I. Petrov, P. S. Samoilov. Moscow: Atom-published, 1975. - 208 p.
14. Brickman, B. A. in-pile dosimetry: a Practical guide / B. A., Brikman, V. V. Generalova, E. A. Kramer-Ageev, V. S. Troshin. - Moscow: Energoatomizdat, 1985. - 200 p.
15. Klimentov, V. B. Activation measurements of neutron fluxes and spectra in nuclear reactors / V. B. Klimentov, Kop-chinsky G. A., Frunze V. V. – publishing house of standards, 1974. - 208 p

УДК 630.867:661.183.2

Оценка эффективности новых сорбционных материалов при очистки водных сред

Н.И. Черкашина[1], В.А. Ерофеев[2]
ФГАУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33, г. Севастополь, 299053, Россия.[1]selyanskij-as@ya.ru,[2]*oleksandra.litvinova@mail.ru*

Статья поступила 05.02.2019 г.; после доработки 11.02.2019 г.

Аннотация

Проведен анализ элементного и функционального состава исходного сырья до и после механохимической обработки. Получены концентрации ионов некоторых загрязнителей до и после очистки в динамических условиях. Определены величины предельной адсорбции для некоторых загрязнителей сточных вод.

Ключевые слова: отходы сельскохозяйственного производства, подсолнечная, овсяная, рисовая лузга, хлопковая шелуха, механо-химическая обработка, сорбционная емкость.

Evaluation of the effectiveness of new sorption materials in the treatment of aquatic environments

N.I. Cherkashina[1], V.A. Erofeev[2]
Sevastopol State University, 33 Universitetskayast,, Sevastopol, 299053, Russia
[1]selyanskij-as@ya.ru, [3]*oleksandra.litvinova@mail.ru*

Received 05.02.2019 y.; received in final form 11.02.2019 y.

Abstract

The analysis of the elemental and functional composition of the feedstock before and after mechanochemical processing was carried out. The ion concentrations of some pollutants were obtained before and after purification under dynamic conditions. The values of limiting adsorption are determined for some pollutants of wastewater.

Keywords: agricultural waste, sunflower, oatmeal, rice husk, cotton husk, mechano-chemical treatment, sorption capacity.

Введение

Одним из основных направлений федеральных целевых программ по обращению с радиоактивными отходами и отработанным ядерным топливом, утилизации и захоронении является:

- очистка РАО, для последующего вывода ее из цикла обращения и сброса в окружающую среду;
- минимизация РАО в процессе эксплуатации энергоблоков;
- внедрение мало и безреагентных технологий.

Такими технологиями могут быть ионообменные и сорбционные технологии с использованием природных органических и неорганических материалов [1].

Проблемой оказывающей влияние на экологическую безопасность окружающей среды является образование сточных вод химических и промышленных производств, которые относятся к числу основных загрязнителей водоемов. В состав таких сред входят соединения тяжелых металлов Cu, Zn, Ni, Cr, Cd, Pb, Sn, Ti, Sb, Mn и др, оказывающие отрицательное экологическое воздействие на гидробионты и по трофической цепочки поступают с превышением ПДК.

В свете жестких требований по экологической безопасности функционирования «вредных» производств, существующие системы очистки требуют модернизации технологии, так как они не гарантируют качественную и количественную очистку промышленных стоков от токсичных ингредиентов и радионуклидов до уровня ПДК и ПДУА.

Существенный вклад в решение этой проблемы может внести использование достаточно дешевых и универсальных технологий эффективных новых фильтрующих материалов, как альтернатива используемым в настоящее время промышленными сорбентами (цеолиты, активированные угли, вермикулит, ионообменные смолы и т.п.).

Наряду с промышленными сорбентами, используемых для очистки водных сред сорбенты на основе лигнина обладают рядом преимуществ: лигнинсодержащее сырье является достаточно дешевым крупнотоннажным производством; приемлемые физико-химические свойства (ионообменная и сорбционная емкость, универсальность по отношению очистки от вредных примесей); низкая стоимость и не сложные технологии утилизации [2, 3]. Недостатком полученных материалов является ограниченность сырьевых источников и сезонность их образования и накопления.

Для обеспечения необходимых объемов промышленных поставок фильтрующих материалов предлагается расширение материалов сырья: пентозан и лигнинсодержащие компоненты. К ним относятся отходы после механической обработки древесины (древесная мука); стержни кукурузных початков (кукурузная кочерыжка); хлопковая шелуха; подсолнечная, рисовая, овсяная лузга; пшеничные и ржаные отруби; мякина; солома пшеницы и других злаков.

Постановка цели и задач научного исследовании

Целью данной работы является исследование физико-химических свойств фильтрующих материалов на основе пентозан и лигнинсодержащих растительных отходов после механохимической обработки в среде модифицирующих ингредиентов и возможность их использования для эффективной очистки жидких сред от вредных примесей.

Для решения поставленной задачи, объектом исследования выбраны обработанные механохимическими методами подсолнечная, рисовая лузга и солома пшеницы, взятая в соотношении 1:1:1 по массе, технология обработки механохимическим методом вариант opt [4].

Порядок и параметры эксперимента

Эффективность очистки оценивалась по сточным водам, которые поступают в открытые водоемы (водохранилища, реки, озера и т.п.) и модельным растворам. Модельные растворы готовили из расчета по концентрации вредных примесей близких к сточным водам, которые превышают показатели предельно допустимых сбросов, мг/дм^3: сухой остаток – 3,5; хлориды – 5,5; медь – 5,2; ртуть – 4,0; цинк – 15,5; СПАВ – 28; фтор – 210,8; роданиды – 46,0; никель – 3,2; фосфаты – 4,0.

Элементарный и функциональный состав целевого продукта (сорбентов), а так же хроматографический анализ после механохимической обработки определяли по известным методикам [5, 6].

Для определения статических и динамических параметров полученных сорбентов использовали атомно адсорбционный спектрофотометр (ААС) «Сатурн – 4ЭПАВ» с электротермическим и плазменным анализатором. Результаты обрабатывали на ПК «AnLab».

Природу функциональных групп, образовавшихся в результате механохимической обработки и структурную информацию после взаимодействия с вредными примесями оценивали по методикам [7].

Элементный и функциональный состав исходного сырья и после механохимической обработки приведен в [2, 4].

В результате технологического процесса механохимической обработки исходного сырья происходит физико-химические превращения измельчаемого продукта. Физико-механические параметры процесса приведены [4].

При повышенном давлении, температуре и механическом воздействии происходит разрыв волокон органических параметров, входящих в структуру исходного сырья с образованием свободнорадикальных образований.

В нейтральной среде макромолекулу можно представить как цвиттер-ион. В кислой среде подавляется диссоциация кислых функциональных групп и материал ведет как катион, в щелочной среде подавляется протонирование с образованием аммониевой группы и цвиттерион превращается в анион. Эти выводы подтверждаются результатами испытаний представленные на рис. 1 и в таблице 1.

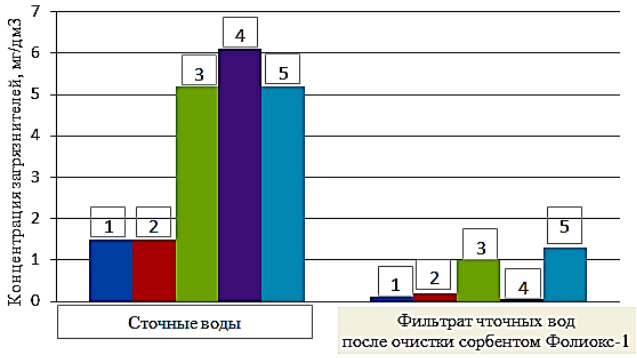

Рис. 1.Концентрация катионов некоторых загрязнителей до и после очистки в динамических условиях при PH=8 при объеме раствора V=5,0 дм^3: 1 - NH_4^+; 2 - Co^{2+}; 3 - Cu^{2+}; 4 - Fe^{3+}; 5 - Ni^{2+}.

В результате механохимической обработки наряду с образованием свободных радикалов происходит окислительный аммонолиз, с присоединением к фрагментам макромолекулы растительного сырья функциональных групп: -OH – фенольные, -COOH – карбоксильные, -NH_2- аминные, ≡NH – имминные и д.р.

Природу взаимодействия и структурную информацию полученных сорбентов с вредными примесями по методикам [7].

ПДК по этим ионам, мг/дм^3: NH_4^+ -2,0; Co^{2+} - 0,1; Cu^{2+} - 0,1; Fe^{3+} - 0,5; Ni^{2+} - 0,1 .

Таблица 1. *Концентрация анионов некоторых загрязнителей до и после очистки в динамических условий при pH=5*

Исследуемая среда	Концентрация загрязнителей, мг/дм^3				
	NO_3^-	Cl^-	CNS^-	SO_4^{2-}	PO_4^{3-}
ПДК	50,0	17,8	0,01	95,5	3,0
Модельный раствор	190	270,5	150,8	230,5	10,5
Фильтрат после очистки модельного раствора (V=5,0 дм^3)	90,0	22,5	0,15	75,7	2,9
Сточные воды	205,0	177,8	2,5	200,5	6,5
Фильтрат после очистки сточных вод	45,0	12,5	0,1	83,5	2,4

Результаты определения СОЕ для некоторых радионуклидов согласно ГОСТ 20.255.1-89 приведены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты определения СОЕ для некоторых катионов при pH=6 масса навески сорбента m=1,0±0,01 г, $V_{раст}$=100 см^3

Образцы	№№ навески	Масса образцов, г	СОЕ (мг-экв/г)					
			Cs^+	Sr^{2+}	Pb^{2+}	Cd^{2+}	Hg^{2+}	UO_2^{2+}
Материал (сорбент) после механохимической обработки	1	0,999	4,89	5,8	6,8	3,85	4,2	6,4
	2	0,989	4,9	5,78	6,79	4,0	4,41	6,29
	3	1,001	4,95	6,0	6,71	3,91	4,73	6,41

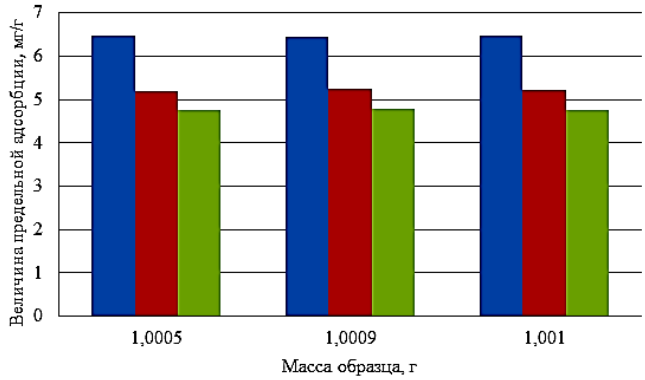

Рис. 2.Величины предельной адсорбции для некоторых загрязнителей (три параллельных опыта): синий - раствор $UO_2(NO_3)_2$ (C=1 г/дм^3); красный - раствор $Sr(NO_3)_2$ (C=1 г/дм^3); зеленый - Раствор $CsNO_3$ (C=1 г/дм^3)

В процессе изучения термодинамики адсорбционных процессов для расчета термодинамических величин использовали хроматограф «Мелихром А-02» с ультрафиолетовым детектором, позволяющий осуществлять мгновенное детектирование в области 190-360 нм, с термостатом обеспечивающего термостатирование в диапазоне температур 310-365 К.

Для исследования брали образцы растворов $UO_2(NO_3)_2$, $CsNO_3$, $Sr(NO_3)_2$ с концентрацией 1,0±0,01 г/дм^3.

Для определения термодинамических характеристик адсорбции (ТХА) детектирование проводили в интервале длин волн 220, 250,300, 380 нм.

Расчеты осуществляли по результатам полученных при λ=350 нм.

Расчетные термодинамические параметры сорбции UO_2^{2+}, Cs^+, Sr^{2+} фильтрующими материалами на основе пентозан и лигнинсодержащих растительных отходов после механохимической обработки С=1,00±0,01 мг/дм^3 приведены на рис. 3 - 4.

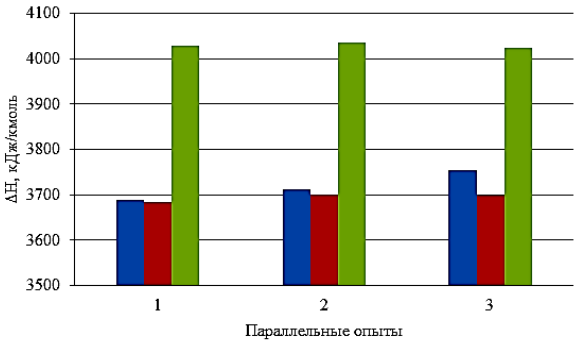

Рис.3.Термодинамический параметр сорбции ΔH ионов на пентозан и лигнинсодержащих материала: 1 - UO_2^{2+}; 2 - Cs^+; 3 - Sr^{2+}.

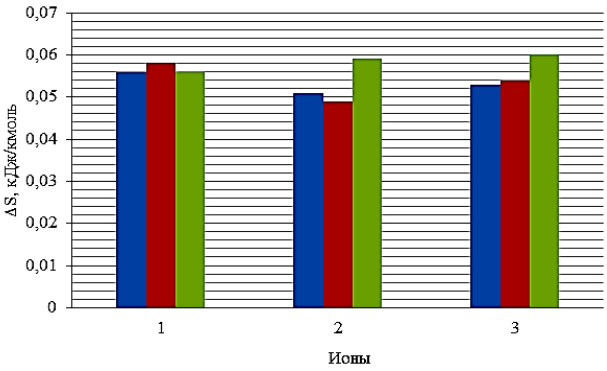

Рис.4.Термодинамический параметр сорбции ΔS ионов на пентозан и лигнинсодержащих материала: 1 - UO_2^{2+}; 2 - Cs^+; 3 - Sr^{2+}.

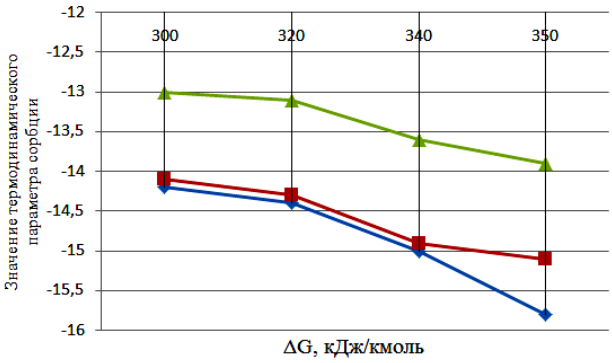

Рис.5.Термодинамический параметр сорбции ΔG ионов на пентозан и лигнинсодержащих материала: синий - UO_2^{2+}; красный - Cs^+; зеленый - Sr^{2+}.

Элементный и функциональный состав исходного сырья и после механохимической обработки приведен в таблице 3.

Таблица 3. *Результаты функционального анализа*

Функциональные группы	Количество, мг-экв/г			
	*исх. продукт до обработки	исх. продукт после обработки	скорлупа грецких орехов до обработки	скорлупа грецких орехов после обработки
Кислые ОН-группы (ОН- фенольные; СООН- гидроксильные)	0,89	13,9	0,97	14,2
Карбонилы =СО	0,14	1,84	0,12	1,91
Спиртовые гидроксилы (ОН группы)	4,78	3,35	4,62	3,48
** связанный азот	0,52	4,23	0,67	4,22

Примечание:

*) исходное сырье до механохимической обработки: подсолнечная лузга, рисовая лузга, измельченная солома пшеницы в соотношении 1:1:1.

**) связанный азот зафиксирован в азотсодержащих функциональных группах: аммонийных-$COONH_4$; амидных – $CONH_2$; иминных =C=NH; имидных -CO-NH-CO$^-$; аминных ≡C-NH_2.

По рассчитанным термодинамическим параметрам и результатам опытных данных определения предельной адсорбции (рис. 2-4) можно предположить о внутри диффузной модели

сорбции ингредиентов, находящихся в водной среде на пентозан и лигниносодержащих сорбентах, что подтверждает результаты более ранних исследований [8].

В результате механохимической обработки наряду с образованием свободных радикалов происходит окислительный аммонолиз, с присоединением к фрагментам макромолекулы растительного сырья функциональных групп: -ОН – фенольные, -СООН – карбоксильные, -NH_2- аминные, ≡NH- имминные и д.р.

Выводы

Полученные результаты исследований могут быть использованы в прогнозировании технологических процессов при расчете расхода сорбента для эффективного извлечения радионуклидов из технологических сред ЖРО и вредных примесей из промышленных стоков, с использованием оптимальных вариантов технологических схем очистки [9-12].

Простота изготовления, не сложное оборудование и неограниченная сырьевая база (косточки плодов сельскохозяйственных культур, подсолнечная, рисовая, овсяная лузга, кукурузная кочерыжка и т.д.), которая ежегодно возобновляется, позволит экономически выгодно решать вопросы крупнотонажного производства.

Использование данного вида сорбционных материалов решают другую задачу – утилизация отходов сельскохозяйственного производства с получением эффективного сорбента.

Список литературы

1. Применение модифицированных природных сорбентов марки «Фолиокс» в системах очистки ЖРО / В.А. Ерофеев, А.М. Акимов, В.Ю. Клюев и др. // Экология и атомная энергетика. Научно-технологический сборник. Сосновый бор: 2001, вып.1, С. 91-94.
2. Использование лигниновых сорбентов для очистки воды и технологических сред / Э.А. Культенко, В.А. Ерофеев, Н.И. Черкашина // Тезисы докладов V международной научной конференции студентов, магистрантов и аспирантов. Одесса, 2012. С. 177-179.
3. Использование сорбционных материалов на основе плодовой косточки для очистки сточных вод / В.А. Ерофеев, Э.А. Культенко, Д.Ю. Сулавко // Энергетические установки и технологии. Севастполь, ИЯЭиП, 2015, Т1 №1, С.46-50.
4. Способ получения селективного сорбента патент на изобретение № 2015119875 / В.А. Ерофеев, Э.А. Культенко, И.И. Пилипченко - заявл. 26.06.2015; опубл. 9.07.2016.
5. Закис Г. Ф. Функциональный анализ лигнинов и их производных / Закис Г. Ф. – Рига: Зинатне, 1987. –230 с.
6. О теоретическом описании процессов внутридиффузионой сорбции и десорбции в ионообменных сорбентах / А. Н. Груздева, Р. Х. Хамизов // Сорбционные и хроматографические процессы. 2008. Т. 8, № 1. С. 99–105.
7. Физико-химическая модель взаимодействия препаратов лигнина в процессах очистки ЖРО / Н.И. Черкашина, В.А. Ерофеев // Экология и развитие общества. 2015. №2 (13). С. 23 – 27.
8. Изучение механизма процессов сорбции радионуклидов на ионообменных лигниновых сорбентах / В.А. Ерофеев, Н.И. Черкашина, Д.Ю. Сулавко и др. // Энергетические установки и технологии. - Севастополь: СевГУ, 2016. Т. 2, № 2. С. 83–90.
9. Выбор оптимальной схемы технологического процесса очистки жидких радиоактивных отходов сложного составалигниновыми сорбентами / В.А. Ерофеев, О.В. Ворник, О.В. Ведищева и др. // Энергетические установки и технологии. 2017. Т. 3, № 1. С. 107–117.
10. Исследование эффективных сорбционных материалов для извлечения радионуклидов из технологических сред / Н.И. Черкашина, О.В. Ведищева // материалы конференции Актуальные вопросы ядерно-химических технологий и экологической безопасности. Севастополь, СевГУ, 2016. С. 229–232.
11. Очистка сточных вод фильтрующими материалами на основе природного полимера / Н.И. Черкашина, В.А. Ерофеев, Э.А. Культенко // материалы конференции «Актуальные вопросы ядерно-химических технологий и экологической безопасности». Севастополь, СевГУ, 2016. С. 209–213.
12. Черкашина Н.И. Химико-технологический процесс получения сорбента на основе природного материал // Энергетические установки и технологии. Севастополь, СевГУ, 2016. Т. 2, № 2. С. 54–60.
13. Черкашина Н.И. Использование сорбентов на основе отходов переработки растительного сырья при очистке сточных вод и технологических сред / В.А. Ерофеев, Е.А. Культенко, Н.И. Черкашина // Экологическая безопасность.- 2013. - № 2 (16). - С. 89-92.
14. Пат. 78908 Украины, МПК51 B 01 J 20/22 (2006.01). Технология производства сорбента на основе лигнина (патент на изобретение) / Н.И. Черкашина, В.А. Ерофееф.; заявитель и патентообладатель Севастопольский нац. ун–т ядерной энергии и промыщленности. – № u 2012 09109; заявл. 10.04.2013; опубл. 12.07.13, Бюл. № 7. – 5 С.
15. Ерофеев В.А. Характер взаимодействие препаратов на основе лигнина с катионами металлов / Ерофеев В.А., Культенко Э.А., Ведищева О.В.//

Збірник науковіх праць СНУЯЕП – Севастополь: СНУЯЭиП, 2014, вып. 2(50) – С 80-85.

References

1. The use of the modified natural sorbents brand "Folioks" in systems of purification of LRW / V. A. Erofeev, A. M., Akimov, V. Yu. Klyuev and others // Ecology and nuclear power. Scientific and technological collection. Pine forest: 2001, is.1, P. 91-94.
2. Use ligninase sorbents for water purification and technological environments / E. A. Kulichenko, V. A. Erofeev, N. And. Cherkashin // Abstracts of V international scientific conference of students, undergraduates and postgraduates. Odessa, 2012.P. 177 - 179.
3. The use of sorption materials based on fruit seeds for wastewater treatment / V. A. Erofeev, E. A., Kulenko, D. Y. Sulavko // Energy and technology. Sevastpol, Eeip, 2015, INE and I, 2015, Vol. 1, №. 1, P. 46-50.
4. The method of obtaining selective sorbent patent for the invention № 2015119875 / V. A. Erofeev, E. A., Kulenko, I. I., Pilipenko.] 26.06.2015; publ. 9.07.2016.
5. Zakis G. F. Functional analysis of lignins and their derivatives / by G. F. Zakis, Riga: zinatne, 1987. - 230 P.
6. On the theoretical description of the processes of intra-diffusion sorption and desorption in ion-exchange sorbents / An Gruzdeva, R. H. Khamizov / / Sorption and chromatographic processes. 2008. Vol. 8, №. 1. P. 99-105.
7. Physical and chemical model of interaction of lignin preparations in processes of purification of Gro / N. And. Cherkashina, V. A. Erofeev / / Ecology and society development. 2015. №. 2 (13).P. 23 – 27.
8. Study of the mechanism of radionuclide sorption processes on ion-exchange lignin sorbents / V. A. Erofeev, N. And. Cherkashina, D. Yu. Sulavko et al. // Power plants and technologies. - Sevastopol: SSU, 2016. Vol. 2, №. 2. P. 83-90.
9. The choice of the optimum scheme of the technological process of purification of liquid radioactive waste of complex composition ligninase sorbents / V. A. Erofeev, A. V. Vornik, O. V. Vedischeva, etc. / / Energy and technology. 2017. Vol. 3, №. 1. P. 107-117.
10. Investigation of effective sorption materials for extraction of radionuclides from process media / N. And. Cherkashina, O. V. Vedisheva / / proceedings of the conference Topical issues of nuclear chemical technologies and environmental safety. Sevastopol, SSU, 2016. P. 229-232.
11. Sewage treatment filter materials based on natural polymer / N. And. Cherkashin, V. A. Erofeev, E. A., Kultenko // materials of conference "Topical issues of nuclear-chemical technologies and ecological safety". Sevastopol, SSU, 2016. P. 209-213.
12. Cherkashina N. And. Chemical and technological process of producing sorbent on the basis of natural material // Power plants and technologies. Sevastopol, SSU, 2016. Vol. 2, №. 2. P.54-60.
13. Cherkashina N.I., Erofeyev V.A, Kultenko E.A. ispolzovanie sorbentov na osnove othodov pererabotki rastitelnogo sirjz pri ochistke stochnix vod I tehnologicheskix sred [The use of sorbents based on waste processing of vegetable raw materials in the purification of wastewater and technological environments.] Environmental safety, 2013, the Issue Vol. 2(16) – Pp. 89-92.
14. Cherkashina N.I., Erofeev V. A., Pat. 93824 Ukraine, IPC 51 B 01 J 20/22, B 01 J 20/30, C 02 F 1/28. Metod proizvodstva modificirovannogo kostochkovogo sorbenta “Foliox- MSP” [A method of producing stone of the modified powder of organic sorbent "Foliox- MSP"]; the applicant and patent-winner of Sevastopol national University of nuclear energy and industry № A 2010 04280; - 13.04.2010 ; publ. 12.07.10. – P 5.
15. Erofeev V. A. The nature of the interaction of drugs on the basis of lignin with cations of metals / Erofeev V. A., Kulichenko E. A. Vedischeva O. V.// Collection of scientific works of SNUNPI Sevastopol: SNUNPI, 2014, vol. 2 (50) – P. 80-85.

УДК 627.24:606:51-7

Определение оптимальных концентраций добавок нанопорошков тугоплавких металлов для увеличения прочностных характеристик бетона

С.А.Федорова[1], В.М. Гавриш[2], О.П. Гавриш[3], Т.В. Чайка[4], Г.А. Баранов[5]

ФГАУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33, г. Севастополь, 299053, Россия. [1]s.a.fedorova@sevsu.ru, [2] VMGavrish@sevsu.ru,[3]5brachman5@gmail.com, [4]TVChayika@sevsu.ru, [5]GABaranov@sevsu.ru.

Статья поступила 04.02.2019 г.; после доработки 06.02.2019 г.

Аннотация

В работе определено наличие корреляционной связи между добавками нанопорошка WO_3 и смесью нанопорошков WC, TaC и TiC для увеличения прочностных характеристик бетона. С использованием методов дихотомии и соседних прямоугольников определены оптимальные значения добавок нанопорошков WC, WO_3, смеси WC, TaC и TiC для повышения прочности бетона.

Ключевые слова: нанопорошок WC, нанопорошок WO_3, нанопорошок смеси нанопорошков WC, TaC и TiC, бетон, метод дихотомии, метод соседних прямоугольников.

Determination of optimal concentrations of additives of nanopowders of refractory metals to increase the strength characteristics of concrete

S.A. Fedorova[1], V.M. Gavrish[2], O.P. Gavrish[3], T.V. Chaika[4], G.A. Baranov[5]

Sevastopol State University, 33 Universitetskaya st,, Sevastopol, 299053, Russia [1]s.a.fedorova@sevsu.ru, [2] VMGavrish@sevsu.ru,[3]5brachman5@gmail.com, [4]TVChayika@sevsu.ru, [5]GABaranov@sevsu.ru.

Received 04.02.2019 y.; received in final form 06.02.2019 y.

Abstract

In the work, the presence of a correlation relationship between the additives of a WO3 nanopowder and a mixture of WC, TaC and TiC nanopowders to increase the strength characteristics of concrete is determined. Using the methods of dichotomy and neighboring rectangles, the optimal values of the addition of nanopowders WC, WO3, a mixture of WC, TaC and TiC were determined to increase the strength of the concrete.

Keywords: nanopowder WC, nanopowerWO_3 , nanopower mixture of WC, TaC and TiC, concrete, dichotomy method, the method of adjacent rectangles

Введение

В Федеральной целевой программе «Социально-экономического развития Республики Крым и г. Севастополя до 2020 года» [1] одним из целевых индикаторов обозначена реконструкция водохранилищ, дамб, гидроузлов на действующих водохранилищах комплексного назначения.

Порядка трети существующих берегозащитных сооружений находятся в эксплуатации

более 40 лет и нуждаются в реконструкции. Необходимо внедрение новых технологий получения бетонов с повышенными прочностными характеристиками обуславливает **актуальность исследования**.

В исследованиях [2-11] показана возможность использования нанопорошков, в том числе нанопорошков тугоплавких металлов, для повышения прочностных характеристик материалов. На базе научно-образовательного центра «Перспективные технологии и материалы» на протяжении ряду лет успешно используются нанопорошки тугоплавких металлов для получения различных материалов с повышенным прочностными характеристиками [2-5].

В нашей работе мы рассматривали три модельных состава бетонов, отличающиеся добавками нанопорошков, которые варьировались как на качественном, так и на количественном уровнях. Первый модельный раствор готовили с добавкой нанопорошка карбида вольфрама. Во втором модельном растворе использовали нанопорошок оксида вольфрама. В третий модельный раствор бетона добавляли смесь нанопорошков карбида вольфрама, карбида тантала и карбида титана.

Объектом исследования является модельные составы бетонов с различными добавками нанопорошков тугоплавких металлов.

Цель исследования

Определение оптимальных концентраций добавок нанопорошков тугоплавких металлов для увеличения прочностных характеристик бетонов.

Задачи исследования:

1. Определение корреляционной связи между добавками нанопорошков тугоплавких металлов при исследовании прочности бетонов.
2. Использование безградиентных методов для определении оптимальных концентраций нанопорошков тугоплавких металлов для упрочнения бетонов.

Определение корреляционной связи между добавками нанопорошков тугоплавких металлов при исследовании прочности бетонов

Для проведения исследования готовили три параллельных образца бетонной матрицы. Затем выдерживали регламентированное время и определяли прочностные характеристики. Документом [12] определено, что расчеты проводятся по двум максимальным значения. Однако, проведение научного эксперимента предполагает обработку всех данных и определение выбросов в результате статистического анализа. В нашей работе мы делали анализ результатов, полученных в обоих вариантов. При проведении исследований мы предположили однозначно положительное влияние нанопорошков тугоплавких металлов на прочность бетонов. Т.е. процессы, протекающие при упрочнении бетона имеют определенную физическую связь. Следствием присутствия физической связи между переменными является наличие корреляционной связи. Расчетные величины парных коэффициентов корреляции представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1. *Корреляционная матрица для объектов при трех параллельных опытах*

	WC+TaC+TiC	WC	WO_3
WC+TaC+TiC	1		
WC	-0,296	1	
WO_3	0,972	-0,283	1

Таблица 2. *Корреляционная матрица для объектов при двух параллельных опытах*

	WC+TaC+TiC	WC	WO_3
WC+TaC+TiC	1		
WC	0,335	1	
WO_3	0,865	0,019	1

В таблицах 1 и 2 аббревиатурами обозначены добавки нанопорошков тугоплавких металлов в бетон: WC - карбид вольфрама, WO_3 - оксид вольфрама, WC+TaC+TiC - смесь карбидов вольфрама, тантала и титана.

Определена прямая очень тесная (0,972) и прямая тесная (0,865) корреляционная связь между наличием добавок нанопорошков смеси карбидов тугоплавких металлов и нанопорошка оксида вольфрама как при проведении трех параллельных опытов, так и при проведении двух параллельных опытов соответственно.

Коэффициент корреляции показывает тесноту только линейной связи. Поэтому, если зависимости более сложные, чем линейные, то коэффициент корреляции может показывать отсутствие связи. Для определения сложных зависимостей между переменными используются другие статистические методы, более всего часто и эффективно – регрессионный анализ.

Определение наличия тесной корреляционной связи между различным составом модельных бетоном имеет практическое значение при определении ценовой политики использования в качестве добавки для повышения прочностных характеристик бетонов нанопорошка оксида вольфрама или смеси нанопорошков карбидов вольфрама, титана и тантала.

Определение оптимальных концентраций нанопорошков тугоплавких металлов для упрочнения бетона

Расчеты проводили исходя из предположения унимодальности функций. С целью повышения достоверности полученных данных мы использовали два метода оптимизации: дихотомию и метод соседних прямоугольников.

При использовании метода дихотомии для определения оптимальной концентрации нанопорошка карбида вольфрама, получили интервал концентраций нанопорошка карбида вольфрама от 2,949% до 2,954%, при этом значения функции прочности бетона составляют 15,412 МПа и 15,413 МПа соответственно.

Вычисленное оптимальное значение добавки и определяемая с этих точках функция прочности бетона расходятся в третьем знаке. В методе соседних прямоугольников оптимальный интервал концентраций составляет 2,945% - 2,955% и соответствующие им значения функций 15,413 МПа - 15,413 МПа. Расхождения в значениях также отмечаются в третьем знаке. Графически положение оптимума представлено на рисунке 1.

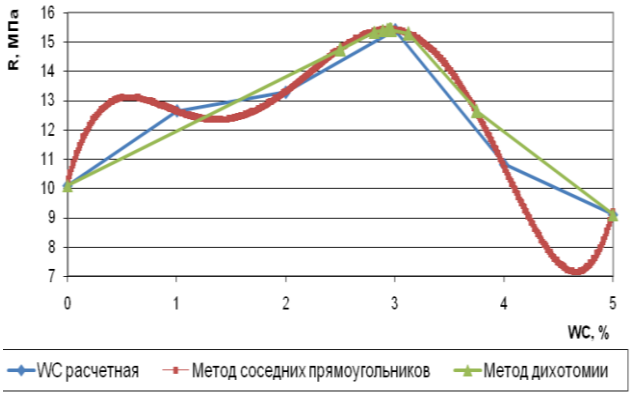

Рис.1. Оптимизация количества добавки нанопорошка WC для повышения прочности бетона по методу дихотомии и методу соседних прямоугольников.

Расчеты, проведенные для определения оптимума по количеству добавки WO_3 для повышения прочностных характеристик бетона по методу дихотомии показали интервал: 1,721% - 1,723% (13,52910 МПа и 13,52911 МПа соответственно функции прочности).

В методе соседних прямоугольников интервал концентрации WO_3 составил 1,721191% - 1,72192%, соответствующие значения функции - 13,52910 МПа и 13,52911 МПа.

Таким образом, расхождения в вычисленных значениях функции наблюдаются в пятом знаке. Геометрическая интерпретация результатов представлена на рисунке 2.

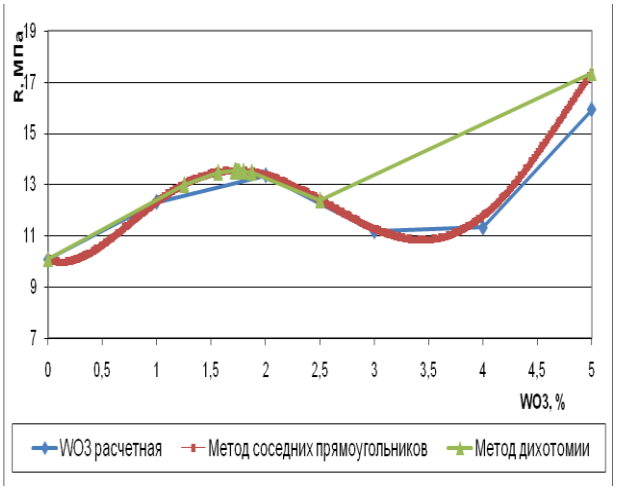

Рис.2. Оптимизация количества добавки нанопорошка WO_3 для повышения прочности бетона по методу дихотомии и методу соседних прямоугольников.

Аналогичные расчеты, проведенные для нахождения оптимальной концентрации смеси карбидов вольфрама, титана и тантала, показали интервал концентраций по методу дихотомии 1,733% - 1,738%, а соответствующие им значения функции - 14,9168 МПа и 14,9167 МПа.

По методу соседних прямоугольников рассчитанные концентрации составили: 1,733% и 1,735% (14,91684 МПа и 14,91683 МПа соответствующие значения функции).

Вычисленные значения прочности бетона при заданных концентрациях добавки, различаются в четвертом знаке при использовании метода дихотомии, а метод соседних прямоугольников дает расхождение в пятом знаке. На рисунке 3 приведены вычисленные зависимости.

Следует отметить, что оптимальное значение концентрации при одинаковой точности методом дихотомии было получено за 60 шагов, метод соседних прямоугольников – за 500 шагов.

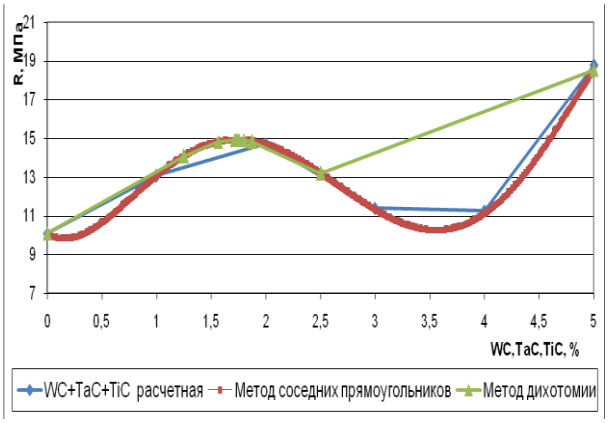

Рис. 3. Оптимизация количества добавки нанопорошка смеси карбидов вольфрама, титана и тантала для повышения прочности.

Выводы

Итак, в ходе проведенного анализа:

1. Определили корреляционную связь между влиянием нанопорошка оксида вольфрама и смеси нанопорошков карбида вольфрама, карбида тантала и карбида титана на прочностные характеристики бетона.

Возможно, это связано с типом механизма воздействия нанопорошков этих веществ на бетонную матрицу. Кроме того, наблюдаемая аналогия позовляет потребителю решать вопрос соотношения «цена-качество».

2. Для определения оптимальных концентраций нанопорошков тугоплавких металлов для повышения прочности бетона были использованы метод дихотомии и метод соседних прямоугольников.

Получены следующие оптимальные значения концентраций нанопорошков: 2,95% карбида вольфрама, 1,72% оксида вольфрама, 1,73% смеси карбидов вольфрама, тантала и титана.

Работа выполнялась в рамках гранта РФФИ № 18-43-920001 р_а «Определение механизмов влияния наномодификаторов порошков тугоплавких металлов на свойства гидротехнических бетонов».

Список литературы

1. Постановление Правительства РФ от 11 августа 2014 г. № 790 "Об утверждении федеральной целевой программы "Социально-экономическое развитие Республики Крым и г. Севастополя до 2020 года" http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/70614732/.
2. Гавриш В.М. Влияние нанопорошка, полученного из лома твердых сплавов марки ТТК, на эксплуатационные свойства эпоксидного клея / В.М. Гавриш, Г.А. Баранов, Е.А. Храброва, Т.В. Чайка, О.П. Гавриш // Энергетические установки и технологии. 2016. Т. 2. № 3. С. 64-69. https://elibrary.ru/item.asp?id=27518630.
3. Чайка Т.В. Исследование возможности усовершенствования смазочных материалов наномодификаторами, полученных микробиологическим методом. / Т.В. Чайка, Н.М. Дербасова, В.М.Гавриш, В.В. Михайлов, Г.А. Баранов // Сборник научных трудов SWorld. 2013. Т. 15. № 4. С. 3-9. http://www.sworld.com.ua/ndex.hp/uk/,echnical-sciences-413/innovative-technologies-413/20667-413-0637.
4. Гавриш В.М. Анализ влияния наномодификатора порошка вольфрама на высокомолекулярный полиэтилен марки GUR 4122 и клей эпоксидный ТУ 2252-003-62517430-01 / В.М. Гавриш, А.А. Бурьянская, Г.А.Баранов, О.П. Гавриш //Актуальные вопросы ядерно-химических технологий и экологической безопасности сборник статей по материалам научно-практической конференции. ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет». 2016. С. 189-194.https://elibrary.ru/item.asp?id=27270486.
5. Гавриш М.В., Федорова С.А., Храброва Е.А. Применение микробиологического выщелачивания для отвалов полиметаллических руд с целью извленчения Ni, Cu, Ti, Cr, Mn, Mo, Zn, Zr. // "Экология и развитие общества" МАНЭБ: Сосновый Бор - №4(19), 2016 - С.22-27. Пономарев А. Н. Высококачественные бетоны. Анализ возможностей и практика использования методов нанотехнологии // Инженерно-строительный журнал. -СПб, 2009. - № 6(8). - С. 25-33.
6. Пономарев А. Н. Развитие прикладных нанотехнологий в России // Наноиндустрия. - 2012. - № 38. - С. 6-10.
7. Jalal M., Pouladkhan A., Harandi O.F., Jafari D. Comparative study on effects of Class F fly ash, nano silica and silica fume on properties of high performance self compacting concrete Construction and Building Materials 94,6816, SEP. C.90-104.
8. Ebrahimi, Khashayar; Daiezadeh, Mohammad Javad; Zakertabrizi, MohammadCONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALST186 C. 1105-1113/
9. Hola Jerzy, Cwirzen Andrzej. Study on properties of self-compacting concrete modified with nanoparticles/ ARCHIVES OF CIVIL AND MECHANICAL ENGINEERING T:18 B 3, C. 877-886.
10. Reches Yonathan. Nanoparticles as concrete additives: Review and perspectives. CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS Том: 175, С. 483-495.
11. ГОСТ 10180-2012 Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. http://docs.cntd.ru/document/1200100908.

References

1. Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 11 av-gusta 2014 g. № 790 "Ob utverzhdenii federal'-noj celevoj programmy "Social'no-ehkonomicheskoe razvitie Respubliki Krym i g. Sevastopolya do 2020 goda" [Decree of the Government of the Russian Federation of 11 August 2014 No. 790 "On Approval of the Federal Target Program" Social and Economic Development of the Republic of Crimea and the City of Sevastopol until 2020 "] http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/70614732/
2. Gavrish, V. M., Vliyanie nanoporoshka, poluchennogo iz loma tverdyh splavov marki TTK, na ehkspluatacionnye svojstva ehpoksidnogo kleya [Effect of nanopowder, semi-cluded from scrap solid alloy brand TTK, the performance properties of epoxy adhesive] / Gavrish, V. M., G. A. Baranov, E. A. Khrabrova, T. V. Chaika, O. P. Gavrish // Energy and technology. 2016. Vol.2. No. 3. P. 64-69.
https://elibrary.ru/item.asp?id=27518630
3. Chaika T.V. Issledovanie vozmozhnosti usovershenstvovaniya smazochnyh materialov nanomo-difikatorami, poluchennyh mikrobiologicheskim metodom [Investigation of the possibility of improving lubricants with nanomicrobials obtained by the microbiological method] / T. V. Chaika, N. M. Girbasova, V. M. Gavrish, V. V. Mikhailov, G. A. Baranov // Collection of scientific works SWorld. 2013. Vol. 15. No. 4. P.3-9. http://www.sworld.com.ua/ndex ahhh! hp/uk/ echnical-sciences-413/innovative-technologies-413/20667-413-0637
4. Gavrish, V. M. Analiz vliyaniya nanomodifi-katora poroshka vol'frama na vysokomolekulyar-nyj poliehtilen marki GUR 4122 i klej ehpok-sidnyj TU 2252-003-62517430-01 [Analysis of the effect of a nanomodiffator of tungsten powder on high-molecular-weight polyethylene of the GUR 4122 brand and epoxy glue TU 2252-003-62517430-01] / V. M. Gavrish, A. A. Buryansky, G. A. Baranov, O. P. Gavrish //Actual problems of nuclear-chemical technologies and environmental safety collection of articles on materials of international scientific-practical conference. The Sevastopol state University. 2016. P. 189-194.
https://elibrary.ru/item.asp?id=27270486
5. Gavrish, M. V., Fedorova S. A., Khrabrova E. A. Primenenie mikrobiologicheskogo vyshchelachivaniya dlya otvalov polimetallicheskih rud s cel'yu izvlencheniya Ni, Cu, Ti, Cr, Mn, Mo, Zn, Zr [The use of microbiological leaching for waste dumps of polymetallic ores in order to extract Ni, Cu, Ti, Cr, Mn, Mo, Zn, Zr]// "Ecology and development" MANEB: Pine forest - №4(19), 2016 - P. 22-27.
6. Ponomarev A. N. Vysokokachestvennye beto-ny. Analiz vozmozhnostej i praktika ispol'zo-vaniya metodov nanotekhnologii [High-quality Concrete. Analysis of the possibilities and practice of using methods of nanotechnology] // magazine of civil Engineering. -SPb, 2009. - № 6 (8). - P. 25-33.
7. Ponomarev A. N. Razvitie prikladnyh nanotekhnologij v Rossii // Nanoindustriya [The development of applied n-technologies in Russia] // nanoindustry. - 2012. - №38. - P. 6-10.
8. Jalal M., Pouladkhan A., Harandi O.F., Jafari D. Comparative study on effects of Class F fly ash, nano silica and silica fume on properties of high performance self compacting concrete Construction and Building Materials 94,6816, SEP. P. 90-104.
9. Ebrahimi, Khashayar; Daiezadeh, Mohammad Javad; Zakertabrizi, MohammadCONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALST186 C. 1105-1113/
10. Hola Jerzy, Cwirzen Andrzej. Study on properties of self-compacting concrete modified with nanoparticles/ ARCHIVES OF CIVIL AND MECHANICAL ENGINEERING T: 18 B 3, P.877-886.
11. Reches Yonathan. Nanoparticles as concrete additives: Review and perspectives. CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS T: 175, P. 483-495.
12. GOST 10180-2012 *Betony. Metody oprede-leniya prochnosti po kontrol'nym obrazcam* [GOST 10180-2012 Concretes. Methods for determining the strength of the control samples]. Http://docs.cntd.ru/document/1200100908.

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСТНОСТЬ

УДК 623.454.82

Радиоэкологический анализ атомной бомбардировки Хиросимы

А.В. Гережун [1], П. А. Пономаренко[2], М.А. Фролова [3]
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33, г. Севастополь, 299053, Россия. [1]AVGerezhun@sevsu.ru, [2]ppa4493@gmail.com, [3] frolova-85@mail.ru

Статья поступила 31.01.2019 г.; после доработки 04.02.2019 г.

Аннотация
Статья посвящена анализу радионуклидного загрязнения окружающей среды после атомной бомбардировки Хиросимы. В основу анализа положена мощность тротилового эквивалента взрыва.

Ключевые слова: Хиросима, атомная бомба «Малыш», ядерный взрыв, тротиловый эквивалент, энергия, γ-кванты, радионуклиды, активность, период полураспада, число ядер, окружающая среда.

Radioecological analysis of the atomic bombing of Hiroshima

A.V. Gerezhun[1], P.A. Ponomarenko[2], M.A. Frolova [3]
FAEI HE «Sevastopol State University», 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia. [1]AVGerezhun@sevsu.ru, [2]ppa4493@gmail.com, [3] frolova-85@mail.ru

Received 31.01.2019 y.; received in final form 04.02.2019 y.

Abstract
The article is devoted to the analysis of radionuclide pollution of the environment after the atomic bombing of Hiroshima. The analysis is based on the power of the TNT equivalent of an explosion.

Keywords: Hiroshima, atomic bomb “Little boy”, nuclear explosion, TNT equivalent, energy, γ-quanta, radionuclides, activity, half-life, number of nuclei, environment

Введение

16 июля 1945 года в 5:30 утра в штате Нью-Мексико на пустынной территории в 80 км от авиабазы Аламогордо на металлической башне высотой 30 м была взорвана 1 в мире атомная бомба мощностью взрыва 20 килотонн тротила. [1,2,3] Эта дата считается началом атомного века.

В это время в стадии готовности находились ещё 2 атомные бомбы: «Малыш» – урановая бомба, содержащая 64 кг высокообогащённого урана, и «Толстяк» – плутониевая бомба, содержащая 6 кг плутония.

Принципиальное решение о применении их против японских городов было принято президентом США Гарри Трумэном и премьер-министром Великобритании - Уинстоном Черчиллем. [1]

Однако после встречи в апреле 1945 г министра обороны США Генри Льюиса Стимсона с Трумэном было принято решение создать специальный консультативный комитет из гражданских лиц и учёных для определения целесообразности применения атомных бомб.

В состав комитета вошли: председатель – Стимсон (министр обороны США); фактический заместитель председателя – Джордж Л. Гарриссон (президент нью-йоркской страховой компании «Лагтер Иншуренс» и специальный советник в министерстве обороны США).

Членами комитета были: Джеймс Ф. Бирнс

– частное лицо, личный представитель Трумэна; Ральф А. Бард – заместитель военно-морского министра; Уильям Л. Клинтон – помощник государственного секретаря; Ванневар Буш – директор Управления научных исследований и усовершенствований (УНИУ) и президент Института Карнеги в Вашингтоне; Карл Т. Комптон – начальник канцелярии полевой службы при УНИУ и президент Массачусетского технологического института; Джеймс Б. Конент – председатель исследовательского комитета по вопросам государственной обороны (ИКГО) и президент Гарвардского университета.

Для помощи в работе Временному комитету Стимсоном были приглашены четыре видных физика-ядерщика, играющие важную роль в ядерных работах с самого начала «Манхеттенского проекта»: доктора Артур Х. Комптон, Энрико Ферчли и Эрнест О. Лоуренс – все лауреаты Нобелевской премии в области физики, и Ю. Роберт Оппенгеймер – научный руководитель лаборатории, где завершилось создание атомной бомбы.

Заключительное заседание комитета состоялось 31 мая 1945 года. На этом заседании кроме перечисленных лиц присутствовали: генерал Джордж С. Маршалл – начальник штаба сухопутных войск США и генерал Лесли Р. Гровс – военный руководитель «Манхеттенского проекта».

1 июня 1945 года Временный комитет единодушно вынес следующее решение:

1. На Японию атомную бомбу сбросить необходимо и как можно ранее;
2. Цель для сбрасывания бомбы должна быть двойная: военный объект или военный завод, окружённый жилыми домами (жилым массивом);
3. Бомбу следует сбросить без предупреждения противника о характере данного оружия.

Временный комитет сыграл важную роль в решении вопроса о применении бомбы, но его рекомендации носили совещательный характер. Окончательное решение об атомной бомбардировке было принято президентом США Трумэном после бесед с военными руководителями США и Уинстоном Черчиллем, которые единогласно и настойчиво выразились о скорейшей атомной бомбардировке Японии.

Для атомной бомбардировки были определены 5 городов: Киото, Хиросима, Кокура, Нагасаки и Ниигата. Когда министру обороны Стимсону были представлены на утверждение планы атомного нападения на Японию, он вычеркнул из списка Киото – древнюю столицу Японии и храм японского искусства и культуры.

Таким образом, в зависимости от погодных условий, только 2 города из четырёх должны быть подвергнуты атомной бомбардировке. Ими стали Хиросима, на которую была сброшена урановая бомба «Малыш» и Нагасаки, на которую была сброшена плутониевая бомба «Толстяк». [3]

Анализ взрыва

Тротиловый эквивалент каждой из бомб оценивался в 20 кт тротила. При взрыве 1 кг тротила выделяется энергия $4{,}19 \cdot 10^6$ Дж. [3]

При взрыве 20 кт тротила выделившаяся энергия составит: $4{,}19 \cdot 10^6 \cdot 2 \cdot 10^7 = 8{,}38 \cdot 10^{13}$ Дж.

При делении 1 ядра ^{235}U выделяется энергия $3{,}2 \cdot 10^{-11}$ Дж. [4] Таким образом, при взрыве «Малыша» разделилось $2{,}62 \cdot 10^{24}$ ядер ^{235}U, его масса составила 1022 г, что согласно закону А. Эйнштейна об эквивалентности массы и энергии, эквивалентно 0,931 г массы.

Это произошло примерно за 10^{-6} с и при этом выделилось $6{,}4 \cdot 10^{24}$ нейтронов деления со средней энергией 200 МэВ.

Энергия мгновенных гамма-квантов, сопровождающих деление, составила $2{,}05 \cdot 10^{25}$ МэВ = $3{,}29 \cdot 10^{12}$ Дж. [8]

Спектр мгновенных гамма-квантов непрерывен, но если принять его линейчатым и выделить 7 групп, то:

- с энергией 1 МэВ в момент взрыва выделилось $9{,}04 \cdot 10^{24}$ γ-квантов,
- с энергией 2 МэВ – $3{,}1 \cdot 10^{24}$ γ-квантов,
- с энергией 3 МэВ – $1{,}5 \cdot 10^{24}$ γ-квантов,
- с энергией 4 МэВ – $2{,}62 \cdot 10^{24}$ γ-квантов,
- с энергией 5 МэВ – $1{,}26 \cdot 10^{22}$ γ-квантов,
- с энергией 6 МэВ – $6 \cdot 10^{22}$ γ-квантов,
- с энергией 7 МэВ – $9{,}7 \cdot 10^{21}$ γ-квантов.

Продукты деления ядер ^{235}U представляют собой сложную смесь более чем 200 радионуклидов, большую часть активности которых составляют короткоживущие радионуклиды. [5,6]

Но после взрыва «Малыша» образовались радионуклиды с периодом полураспада от нескольких суток до десятков лет и более, которые значительно повлияли на степень причинённого ущерба окружающей среде (табл. 1).

Для оценки количества образовавшихся после взрыва ядер радионуклидов использовалась формула:

$N_i^{ядер} = N_{U\text{-}5} \cdot \%$,

где $N_{U\text{-}5}$ – количество разделившихся ядер ^{235}U;

% – выход ядер определённого радионуклида на одно деление ^{235}U. [8]

Таблица 1. *Выход некоторых продуктов деления при ядерном взрыве*

№ п/п	Радионуклид	Период полураспада	λ, с$^{-1}$	Выход на одно деление, %
1	^{3}H	12,3 лет	$1{,}79\cdot10^{-9}$	0,01
2	^{14}C	5570 лет	$2{,}95\cdot10^{-12}$	*
3	^{89}Sr	50,5 сут.	$1{,}6\cdot10^{-7}$	2,56
4	^{90}Sr	28,6 лет	$8\cdot10^{-10}$	3,5
5	^{93}Zr	$1{,}11\cdot10^{6}$ лет	$1{,}98\cdot10^{-14}$	6,4
6	^{95}Zr	64 сут.	$1{,}3\cdot10^{-7}$	5,07
7	^{95}Nb	36 сут.	$2{,}2\cdot10^{-7}$	4,3
8	^{103}Ru	39,5 сут.	$2\cdot10^{-7}$	5,2
9	^{106}Ru	368 сут.	$2{,}2\cdot10^{-8}$	2,44
10	^{131}I	8 сут.	$1\cdot10^{-6}$	2,9
11	^{134}Cs	2,3 года	$9{,}6\cdot10^{-9}$	8
12	^{136}Cs	13,2 сут.	$6{,}1\cdot10^{-7}$	0,036
13	^{137}Cs	30,2 лет	$7\cdot10^{-10}$	5,57
14	^{140}Ba	13 сут.	$6{,}2\cdot10^{-7}$	5,18
15	^{141}Ce	32,5 сут.	$2{,}5\cdot10^{-7}$	4,58
16	^{144}Ce	284 сут.	$2{,}8\cdot10^{-8}$	4,69
17	^{151}Sm	73 года	$3\cdot10^{-10}$	0,045

* ^{14}C образуется в результате облучения атмосферного азота тепловыми нейтронами.

Масса образовавшихся радионуклидов рассчитана по формуле:

$$m_i = \frac{M_i \cdot N_i^{ядер}}{N_A},$$

где M_i – молярная масса образовавшегося радионуклида;

$N_i^{ядер}$ – количество образовавшихся после взрыва ядер радионуклидов;

N_A – число Авогадро (= $6{,}023\cdot10^{23}$).

Активность образовавшихся радионуклидов рассчитана по формуле:

$$A_i^{обр.} = N_i^{ядер} \cdot \lambda,$$

где λ – постоянная распада (вероятность распада ядер в единицу времени).

Количество и активность образовавшихся после взрыва «Малыша» радионуклидов представлены в таблице 2. [7]

С момента атомной бомбардировки Хиросимы прошло уже 73 года. Большинство образовавшихся в результате взрыва радионуклидов (с периодом полураспада до 1 года) уже распались.

Активность «доживших» до наших дней (долгоживущих) радионуклидов рассчитана по формуле:

$$A_i = A_i^{обр.} \cdot e^{-\lambda \cdot t},$$

где t – время, прошедшее с момента бомбардировки в секундах:

t = 73·365·24·3 600 = 2 302 128 000 с.

Таблица 2. *Характеристика радионуклидов, образовавшихся после взрыва*

№ п/п	Р/н	Количество образовавшихся ядер	Активность образовавшихся р/н, Бк	Активность в настоящее время, Бк
1	^{3}H	$2{,}62\cdot10^{20}$	$4{,}69\cdot10^{11}$	$7{,}6\cdot10^{9}$
2	^{14}C	$5{,}5\cdot10^{23}$	$1{,}6\cdot10^{12}$	$1{,}6\cdot10^{12}$
3	^{89}Sr	$6{,}71\cdot10^{22}$	$1{,}1\cdot10^{16}$	0
4	^{90}Sr	$9{,}17\cdot10^{22}$	$7{,}3\cdot10^{13}$	$1{,}1\cdot10^{13}$
5	^{93}Zr	$1{,}65\cdot10^{23}$	$3{,}3\cdot10^{9}$	$3{,}3\cdot10^{9}$
6	^{95}Zr	$1{,}49\cdot10^{23}$	$1{,}94\cdot10^{16}$	0
7	^{95}Nb	$1{,}65\cdot10^{23}$	$3{,}6\cdot10^{16}$	0
8	^{103}Ru	$1{,}36\cdot10^{23}$	$2{,}7\cdot10^{16}$	0
9	^{106}Ru	$6{,}39\cdot10^{22}$	$1{,}4\cdot10^{15}$	0
10	^{131}I	$7{,}6\cdot10^{22}$	$7{,}6\cdot10^{16}$	0
11	^{134}Cs	$1{,}83\cdot10^{23}$	$1{,}76\cdot10^{15}$	$4{,}4\cdot10^{5}$
12	^{136}Cs	$9{,}43\cdot10^{20}$	$5{,}75\cdot10^{14}$	0
13	^{137}Cs	$1{,}46\cdot10^{23}$	$1{,}02\cdot10^{14}$	$2\cdot10^{13}$
14	^{140}Ba	$1{,}68\cdot10^{23}$	$1{,}04\cdot10^{17}$	0
15	^{141}Ce	$1{,}2\cdot10^{23}$	$3\cdot10^{16}$	0
16	^{144}Ce	$1{,}23\cdot10^{23}$	$3{,}4\cdot10^{15}$	0
17	^{151}Sm	$1{,}18\cdot10^{22}$	$3{,}5\cdot10^{12}$	$1{,}75\cdot10^{12}$

Заключение

Таким образом, на момент взрыва суммарная активность образовавшихся радионуклидов составляла $3{,}1\cdot10^{17}$ Бк или $8{,}4\cdot10^{6}$ Ku.

Как показали испытания ядерных боеприпасов, проводимые после атомной бомбардировки Хиросимы, при воздушном взрыве только 50 % радионуклидов выпало в районе г. Хиросима. Часть радиоактивных веществ под действием ветров переместилась на большие расстояния, оставаясь при этом на той же широте.

Находясь в воздухе около 1 месяца часть радиоактивных веществ постепенно оседает на поверхность земли. [9]

Значительная часть радионуклидов уходит в стратосферу на высоту 12-16 км, где происходит их глобальное рассеивание и в значительной степени распад.

Суммарная активность долгоживущих радионуклидов (^{3}H, ^{14}C, ^{90}Sr, ^{93}Zr ^{134}Cs, ^{137}Cs, ^{151}Sm) в настоящее время составляет $3{,}4\cdot10^{13}$ Бк. К тому же в окружающей среде были рассеяны 63 кг неразделившегося высокообогащённого ^{235}U ($1{,}6\cdot10^{26}$ ядер активностью $5\cdot10^{9}$ Бк).

Долгоживущие радионуклиды со временем выпадают по всей поверхности Земли, включая мировой океан, а такие радионуклиды как ^{3}H, ^{14}C, ^{90}Sr, ^{131}I и ^{137}Cs попадают в пищевые цепи и оказываются в организме человека.

Список литературы

1. Люди и атомы / У.Л. Лоуренс. Под ред. чл.-корр. АН СССР В.С. Емельянова. М.: Атомиздат, 1967.
2. Ярче тысячи Солнц / Р. Юнг. М., 1960.
3. Советская военная энциклопедия. М.: Воениздат, 1960.
4. Основы теории и методы расчёта ядерных энергетических реакторов. М.: Энергоатомиздат, 1989.
5. Ядерная энергетика, человек и окружающая среда/ Н.С. Бабаев, В.Ф. Дёмин, Л.А. Ильин и др. Под ред. А.П. Александрова. 2-е Изд. М.: Энергоатомиздат,1984.
6. Допустимые выбросы радиоактивных и вредных химических веществ в приземный слой атмосферы / Е.Н. Теверовский, Н.Е. Артёмова, А.А. Бондарев и др. 2-е Изд. Под ред. Е.Н. Теверского и И.А. Терновского. М.: Энергоатомиздат, 1980.
7. Справочник ядерно-физических и радиобиологических констант / П.А. Пономаренко, М.А. Фролова, Л.И. Лукина. Севастополь, 2012.
8. Справочник по ядерно-физическим константам для расчётов реакторов / И.В. Гордеев, Д.А. Кардашев, А.В. Малышев. Под ред. Лауреата Ленинской премии академика АН БССР А.К. Красина. М.: Атомиздат, 1960.
9. Справочник по радиационной безопасности / В.Ф. Козлов. 4-е Изд., переработанное и дополненное. М.: Энергоатомиздат, 1991.

References

1. People and Atoms / U.L. Lawrence Ed. Corr. USSR Academy of Sciences. Yemelyanov. M.: Atomizdat, 1967.
2. Brighter than a thousand suns / R. Jung. M., 1960.
3. Soviet military encyclopedia. M.: Voenizdat, 1960.
4. Fundamentals of the theory and methods for calculating nuclear power reactors. M.: Energoatomizdat, 1989.
5. Nuclear energy, man and the environment / N.S. Babaev, V.F. Demin, L.A. Ilyin and others. Ed. A.P. Alexandrova. 2nd Ed. M.: Energoatomizdat, 1984.
6. Permissible emissions of radioactive and harmful chemicals into the atmospheric surface layer / E.N. Teverovsky, N.E. Artyomov, A.A. Bondarev et al. 2nd ed. Ed. E.N. Teversky and I.A. Ternovsky. M.: Energoatomizdat, 1980.
7. Reference book of nuclear-physical and radiobiological constants / P.A. Ponomarenko, M.A. Frolova, L.I. Lukin. Sevastopol, 2012.
8. Reference book on nuclear-physical constants for reactor calculations / I.V. Gordeev, D.A. Kardashev, A.V. Malyshev. Ed. Lenin Prize winner of the Academician of the Academy of Sciences of the BSSR A.K. Krasin. M.: Atomizdat, 1960.
9. Handbook of radiation safety / V.F. Kozlov. 4th ed., Revised and enlarged. M.: Energoatomizdat, 1991.

УДК 656.61

Повышение экологической безопасности судов путем рециркуляции части выпускных газов дизелей

В.И. Истомин[1], С.Е. Тверская[2], В.В. Хлебникова[3]
ФГАОУ ВО «Севастопольского государственного университета», ул. Университетская, 33
г. Севастополь, 299029, Россия, [1,3] v-istomina@mail.ru, [2] svettverskaya@mail.ru

Статья поступила 15.02.2019 г.; после доработки 19.02.2019 г.

Аннотация

С целью выполнения современных требований VI Приложения Международной конвенции МАРПОЛ 73/78 одной из эффективных мер является рециркуляция части выпускных газов из системы газовыпуска дизелей на всасывание компрессора с промежуточным их охлаждением и очисткой, что позволит не только уменьшить количество отработавших газов, но и существенно сократить содержание в них токсичных веществ, повысив тем самым экологическую безопасность судов.

Ключевые слова: рециркуляция, выпускные газы, снижение токсичности, циклонно-пенный аппарат, очистка газов.

Improving the environmental safety of ships by recycling part of the exhaust gases of diesel engines

V.I. Istomin[1], S.E. Tverskaya[2], V. V. Hlebnikova[3]
Sevastopol State University, 33 Universitetskaya st, c. Sevastopol,
299029, Russia, [1,3] v-istomina@mail.ru, [2] svettverskaya@mail.ru

Received 15.02.2019 y.; received in final form 19.02.2019 y.

Abstract

In order to meet modern requirements of the VI Annex of the International Convention MARPOL 73/78, one of the effective measures is the recirculation of part of the exhaust gases from the gas exhaust system to the compressor intake with their intermediate cooling and cleaning, which will not only reduce the amount of exhaust gases, but also significantly reduce the in them toxic substances, thereby increasing the environmental safety of vessels.

Keywords: recycling, exhaust gases, reduction of toxicity, cyclone-foam apparatus, gas cleaning.

Введение

Серьезной проблемой современных судов является повышение их экологической безопасности, так как в последнее время Международная морская организация (IMO) предъявляет повышенные требования, касающиеся проблем предотвращения загрязнения вредными веществами с судов. К таким веществам относятся, в частности, выпускные газы (ВГ) главных и вспомогательных дизелей и котлов. Эти газы содержат около 200 компонентов [1], из которых наибольшую опасность по токсичности представляют оксиды азота (NO_x) и серы (SO_x).

При сжигании топлив с высоким содержанием серы в двигателях возникает ряд отрицательных явлений, таких как коррозия и интенсивное изнашивание втулок цилиндров, шеек коленчатого вала, подшипников; отложение нагара в зоне поршневых колец, на головке и тронке поршня, в выпускных окнах и каналах выпускных клапанов, истощение масляной пленки зеркала цилиндра и пр.

При высокой температуре в камере сгорания

азот, содержащийся в топливе, начинает интенсивно взаимодействовать с кислородом воздуха. В результате образуются сильнотоксичный NO_x азота. Это приводит к недостатку кислорода в камере сгорания, а следовательно, к неполному сгоранию топлива, потери части мощности двигателя, избытку в выпускных газах оксидов азота. Оксид азота оказывает отрицательное воздействие на окружающую среду и здоровье человека, вызывая кислование, образование накопление нитратов.

Кроме того, при взаимодействии SO_x и NO_x с водяным паром образуются серная и азотная кислоты, которые осаждаются на поверхность воды и почвы, отравляя все живое.

В связи с этим в соответствии с Приложением VI Конвенции МАРПОЛ-73/78 [2] вводятся ограничения на предельно допустимое содержание серы в топливе, сжигаемом в судовых дизелях (в пределах районов контроля выбросов SO_x не более 0,1%, в остальных районах – не более 3,5%), а также окислов азота в выпускных газах двигателя, приведенных в таблице 1.

Таблица 1 *Предельные нормы выбросов NO_x, г/кВт·ч*

Частота вращения n, об/мин	Дизель судна постройки с 1.01.2000г. до 1.01.2011г.	Дизель судна постройки с 1.01.2011г. или после этой даты	Дизель судна постройки с 1.01.2016г. или после этой даты (в пределах Районов контроля выбросов NO_x)
$n \le 130$	17,0	14,4	3,4
$130 < n < 2000$	$45 \cdot n^{(-0,2)}$	$44 \cdot n^{(-0,23)}$	$9 \cdot n^{(-0,2)}$
$n \ge 2000$	9,8	7,7	2,0

Выполнение современных требований Приложения VI Конвенции МАРПОЛ 73/78 достаточно сложная задача, однако требует немедленных мер по приведению токсичных выбросов с судов в соответствие с введенными нормами.

Изложение основного материала

Все существующие в настоящее время способы снижения токсичных выбросов делятся на первичные и вторичные.

В свою очередь, первичные способы делятся на две категории:

1. Требующие существенной модернизации двигателя (модернизация систем впрыска и смесеобразования, системы наддува, камеры сгорания, применение альтернативных сортов топлива (сжиженный природный газ) и др. Данные способы могут быть реализованы при проектировании и разработке новых двигателей.
2. Требующие незначительной модернизации двигателя (перевод работы двигателя на водотопливную эмульсию (ВТЭ), применение рециркуляции части отработанных газов, применение многофункциональных присадок к топливу, предварительная обработка топлива).

К вторичным способам относятся нейтрализация и очистка выпускных газов.

Для находящихся в эксплуатации двигателей на сегодняшний день самыми эффективными, малозатратными, не требующими значительной модернизации самого двигателя, являются следующие методы: применение присадок, очистка выпускных газов, их рециркуляция, предварительная обработка топлива и применение ВТЭ. Все эти методы имеют свои преимущества и недостатки.

Присадки, интенсифицирующие горение, увеличивают полноту сгорания топлива, а, следовательно, уменьшают образование в камере сгорания токсичных веществ (содержание сажи уменьшается на 70÷90%, канцерогенных веществ – на 60÷80%).

Однако присадки снижают стабильность свойств топлива при хранении, что приводит к уменьшению цетанового числа, с увеличением концентрации присадки ее относительная эффективность понижается.

Применение ВТЭ, которая получается путем эмульгирования воды в топливе в специальных смесительных устройствах, качественно и количественно изменяет процесс горения.

Содержащиеся в топливе частицы воды при прогреве в цилиндре превращаются в паровые пузырьки, мгновенно дробящие топливные капли на мельчайшие частицы, которые, перемешиваясь с кислородом воздушного заряда, ускоренно сгорают. Это приводит к повышению экономичности двигателя, существенному уменьшению нагарообразования в цилиндрах и выпускном тракте дизеля и уменьшению вредных выбросов в атмосферу.

Недостатком метода является возможность потери стабильности ВТЭ, что выражается в повышении скорости изнашивания деталей двигателя.

Суммарный износ объясняется воздействием на металл механических и коррозионных

факторов. В реальных условиях эксплуатации коррозионный износ как деталей топливной аппаратуры, так и деталей двигателя определяется одновременно протекающими химическими (взаимодействие металла с топливом, маслами, продуктами сгорания) и электрохимическими процессами (коррозия металла в присутствии электролита – воды). Возможно также отложение водорастворимых солей в виде накипи на поверхности втулки.

Поэтому к воде, входящей в состав ВТЭ, предъявляются определенные требования по качеству: полное отсутствие коррозионной активности, отсутствие солей общей жесткости и механических примесей, что требует дополнительной ее подготовки.

В современных системах топливоподготовки для улучшения качественных характеристик тяжелых сортов топлива применяются гомогенизаторы – аппараты для получения однородных мелкоизмельченных смесей.

В процессе обработки топлива в гомогенизаторах балластно-негорючие соединения (смолы, желеобразные сгущения, механические примеси), входящие в его состав, разрываются под воздействием ультразвуковых колебаний, измельчаются и интенсивно перемешиваются в топливе вихревым потоком.

Это приводит к уменьшению вязкости топлива, температуры вспышки, уменьшению нагарообразования, сокращению выбросов окислов азота и серы.

Однако гомогенизированное топливо обладает повышенной абразивностью из-за попадания частиц металла, разрушаемых в гомогенизаторе, в рабочие органы топливной аппаратуры. Поэтому после гомогенизатора необходима установка магнитного фильтра.

Установка газоочистителей (судовых скрубберов) на выхлопном тракте двигателя позволяет существенно снизить содержание вредных веществ и твердых частиц в выпускных газах. Кроме того, газоочистители дополнительно выполняют функции охладителей и глушителей шума, однако имеют большие массогабаритные показатели, высокую стоимость оборудования и его эксплуатации.

Перепуск (рециркуляция) части выпускных газов из выпускной системы на всасывание компрессора позволяет изменить химический состав заряда, снизив содержание свободного кислорода в камере сгорания.

Эффективность использования рециркуляции объясняется тем, что в выпускных газах содержатся водяной пар и двуокись углерода, имеющие достаточно высокую теплоемкость.

Это приводит к уменьшению пламени внутри камеры сгорания и, тем самым, снижению образования NO_x.

Применение до 30% рециркуляции ВГ приводит к снижению содержания NO_x примерно на 75% без существенного снижения расхода топлива.

Дальнейшее увеличение доли рециркуляции приводит к повышению расхода топлива, увеличению дымного выхлопа и преждевременному старению смазочного масла.

Недостатками метода является следующее: износ абразивными частицами ВГ деталей дизеля, что приводит к необходимости фильтрации ВГ; рост температуры надувочного воздуха, что требует охлаждения ВГ; низкотемпературная коррозия деталей дизеля из-за высокого содержания SO_x в ВГ.

Исходя из анализа существующих способов уменьшения содержания NO_x в выпускных газах дизеля, можно сделать вывод, что наибольший эффект можно получить, если использовать положительные стороны метода с устранением его недостатков.

В настоящей работе предлагается использовать метод рециркуляции части выпускных газов из системы газовыпуска на всасывание компрессора с промежуточным их охлаждением и очисткой в циклонно-пенном аппарате.

Система рециркуляции выпускных газов представлена на рис. 1.

После использования теплоты выпускных газов в утилизационном котле 2 часть их поступает на рециркуляцию (до 30%), проходит через циклонно-пенный аппарат 4 и поступает на всасывание компрессора 9. Смесь ВГ и надувочного воздуха проходит через охладитель 11 и подается в цилиндры двигателя.

Регулирование интенсивности рециркуляции ВГ осуществляет система управления двигателем с помощью электромагнитного клапана 3.

Циклонно-пенный аппарат (ЦПА) предназначен для охлаждения, очистки и нейтрализации выпускных газов посредством «мокрого» инерционного метода [3], основанном на растворении и химическом взаимодействии токсичных компонентов ВГ при пропускании их через морскую воду.

Схема ЦПА представлена на рис. 2.

Аппарат содержит корпус с бункером, заполненным морской водой, тангенциальный патрубок для ввода очищаемого газа, патрубок для

отвода очищенного и охлажденного газа и каплеуловитель.

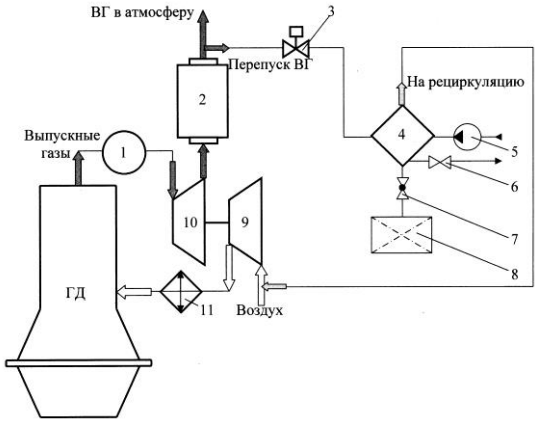

Рис. 1. Система рециркуляции выпускных газов двигателя:
1 – выпускной коллектор; 2 – утилизационный котел; 3 – электромагнитный клапан; 4 – циклонно-пенный аппарат; 5 – насос подачи забортной воды; 6 – клапан для удаления загрязненной воды; 7 – кран для удаления шлама; 8 – шламовая цистерна; 9 – компрессор; 10 – турбина; 11 – воздухоохладитель.

В корпусе ЦПА расположена активная камера с разделительной решеткой и центробежным завихрителем газа внизу.

Кольцевое пространство между корпусом и камерой разделено на две половины наклонной перегородкой таким образом, чтобы нижняя часть была соединена с патрубком для ввода газа, а верхняя – с патрубком для его отвода.

Решетка и завихритель заглублены в воду на определенную величину H_0, поддерживаемую поплавковым клапаном, который обеспечивает как первоначальное заполнение бункера забортной водой, так и его автоматическое пополнение до заданного уровня.

Выпускные газы поступают в нижнюю часть ЦПА и, проходя через завихритель, равномерно распределяются в камере, приобретая вращательное движение с большой скоростью. Определенный объем воды при этом вытесняется на решетку, подхватывается газом и увлекается вверх, образуя слой высокотурбулизированной пены, обладающей развитой поверхностью контакта газа и воды, которая непрерывно обновляется за счет поступления воды из бункера.

В этих условиях температура газа снижается до 50÷70 ^{0}С. Из-за смачивающих свойств воды газ очищается от основной массы сажи (практически полностью улавливаются частицы крупнее 10 мкм и достаточно хорошо – частицы крупнее 4÷5 мкм), а соли кальция, содержащиеся в морской воде, взаимодействуют с окислами серы с образованием нейтрального сульфата кальция.

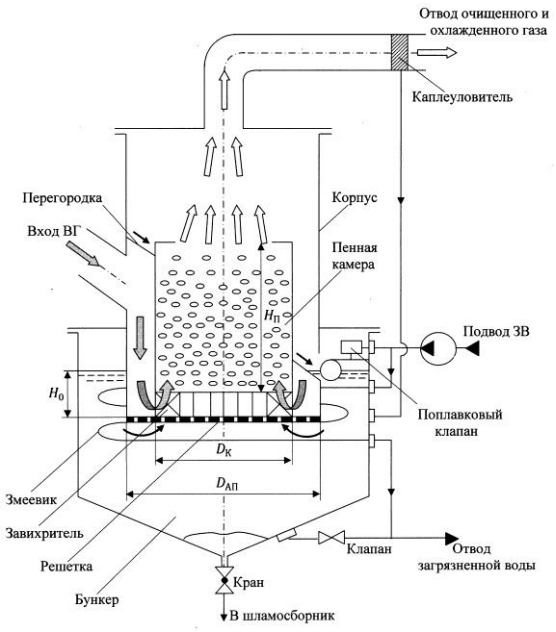

Рис. 2. Схема циклонно-пенного аппарата.

По мере подъема газа вверх вращение газожидкостного слоя уменьшается и пена разрушается.

Загрязненная вода стекает на наклонную перегородку и сливается в бункер, а очищенный газ отделяется от капель воды в каплеуловителе и поступает на рециркуляцию через патрубок, расположенный в верхней части аппарата.

Нагретая в камере вода охлаждается в бункере змеевиком, через который непрерывно прокачивается забортная вода.

Такое охлаждение позволяет отказаться от непрерывной подачи свежей воды, что значительно снижает количество загрязненной воды, сбрасываемой за борт.

Из бункера вода вновь поступает в камеру через разделительную решетку, которая одновременно предохраняет находящуюся в бункере воду от раскручивания газом при прохождении его через завихритель.

Накопившиеся загрязнения оседают в нижней конической части бункера и периодически отводятся в шламосборник путем открытия крана.

Пополнение бункера водой, осуществляемое поплавковым клапаном, необходимо в таком количестве, чтобы компенсировать испаренную или выброшенную влагу.

Оптимальный гидродинамический режим в ЦПА соответствует скоростям газа в камере $v_г$ –

5 м/с, в свободном сечении аппарата $v_{\text{г.вх}}$ – 10 м/с и высоте слоя пены $H_{\text{п}}$ = 0,3 м. При этом гидравлическое сопротивление аппарата не превышает 1,1 кПа.

Ниже приведен расчет ЦПА для главного двигателя 6ДКРН 42/136-10 (6L42MC) мощностью 5100 кВт и частотой вращения 168 об/мин.

Исходные данные для расчета ЦПА.

Массовый расход газа через турбину: $G_{\text{г}} = 13$ кг/с.

Температура воды на входе в ЦПА: $t_{\text{в.вх}}$ = 30 ^{0}С (исходя из температуры забортной воды летом 25 ^{0}С);

Температура газа за ЦПА:

$t_{\text{г.вых}}$ = 50 ^{0}С (принимается);

Расчет.

Температура воды на выходе из ЦПА $t_{\text{в.вых}}$ при заданной конечной температуре газа $t_{\text{г.вых}}$ составит:

$$t_{\text{в.вых}} = t_{\text{г.вых}} - 4{,}2 + 0{,}9H_{\text{п}} + 0{,}0915v_{\text{г}}^2 = $$
$$= 50 - 4{,}2 + 0{,}9 \cdot 0{,}3 + 0{,}0915 \cdot 5^2 = $$
$$= 43{,}24\ ^0\text{С}.$$

Принимаем $t_{\text{в.вых}}$ = 44 ^{0}С.

Величина заглубления завихрителя:

$$H_0 = 0{,}96H_{\text{п}}^{1{,}14}/v_{\text{г}}^{0{,}65} =$$
$$= 0{,}96 \cdot 0{,}3^{1{,}14} \cdot 5^{0{,}65} = 0{,}7\ \text{м}.$$

Минимально допустимая температура газа за утилизационным котлом $t_{\text{г.вх}}$ должна быть больше температуры точки росы паров серной кислоты t_p на 15÷20 ^{0}С.

$$t_p = 130(100S^p)^{0{,}2} =$$
$$= 130(100 \cdot 0{,}035)^{0{,}2} = 167\ ^0\text{С},$$

где S^p = 0,035 – содержание серы в топливе RMG380.

Отсюда $t_{\text{г.вх}} = 167 + 20 = 187\ ^0$С (принимаем $t_{\text{г.вх}} = 190\ ^0$С).

Расход газов на рециркуляцию:

$G_{\text{г.р}} = 0{,}3G_{\text{г}} = 0{,}3 \cdot 13 = 3{,}9$ кг/с.

Массовый расход воды, подаваемой в ЦПА, определяется из уравнения теплового баланса:

$$G_{\text{г.р}}c_{p\text{г}}(t_{\text{г.вх}} - t_{\text{г.вых}}) = G_{\text{в}}c_{p\text{в}}(t_{\text{в.вых}} - t_{\text{в.вх}}),$$

где $c_{p\text{г}}$ = 1,01 кДж/(кг·К) – средняя массовая изобарная теплоемкость газа;

$c_{p\text{в}}$ = 3,973 кДж/(кг·К) – средняя массовая изобарная теплоемкость морской воды.

$$G_{\text{в}} = \frac{3{,}9 \cdot 1{,}01 \cdot (190 - 50)}{3{,}973 \cdot (44 - 30)} = 9{,}9\ \text{кг/с}.$$

Объемный расход воды:

$$Q_{\text{в}} = 3600\frac{G_{\text{в}}}{\rho_{\text{в}}} = \frac{3600 \cdot 9{,}9}{1010} = 35{,}3\ \text{м}^3/\text{ч},$$

где $\rho_{\text{в}}$ – плотность морской воды.

Выбираем производительность насоса 36 м^3/ч.

Диаметр пенной камеры определяется из уравнения неразрывности:

$$D_{\text{К}} = \sqrt{\frac{4G_{\text{г.р}}}{\pi\rho_{\text{г}}v_{\text{г}}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 3{,}9}{3{,}14 \cdot 0{,}869 \cdot 5}} = 1{,}07\ \text{м}.$$

где $\rho_{\text{г}}$ = 0,869 кг/м^3 – плотность газа при средней температуре

$t_{\text{г.ср}} = 0{,}5(t_{\text{г.вх}} + t_{\text{г.вых}})$ = 120 ^{0}С.

Диаметр внешнего цилиндра $D_{\text{АП}}$:

$$D_{\text{АП}} = \sqrt{\frac{4G_{\text{г.р}}}{\pi\rho_{\text{г.вх}}v_{\text{г.вх}}} + D_{\text{К}}^2} =$$
$$= \sqrt{\frac{4 \cdot 3{,}9}{3{,}14 \cdot 0{,}738 \cdot 10} + 1{,}07^2}$$
$$= 1{,}35\ \text{м}.$$

где $\rho_{\text{г.вх}}$ = 0,738 кг/м^3 – плотность газа при температуре $t_{\text{г.вх}}$.

Представленный расчет показывает, что ЦПА соответствует судовым требованиям по массогабаритным характеристикам.

Достоинством ЦПА является то, что у судна имеется неограниченный объем морской воды, ЦПА надежно работает на переменных режимах, имеет незначительное гидравлическое сопротивление, низкое энергопотребление и пожаробезопасен.

После очистки используемую для обработки воду можно удалять за борт.

Таким образом, предложенный метод позволяет использовать положительные стороны рециркуляции выпускных газов (уменьшение содержания оксидов азота) и устранить недостатки – осуществить промежуточное охлаждение и очистку ОГ от твердых частиц и оксидов серы.

Заключение

С целью повышения экологической безопасности судов предложенный метод рециркуляции части выпускных газов из системы газовыпуска дизеля на всасывание компрессора с промежуточным их охлаждением и очисткой в циклонно-пенном аппарате позволит не только уменьшить общее количество отработавших газов, выбрасываемых в атмосферу (на 30%), но и существенно сократить содержание в них токсичных веществ.

Список литературы

1. Курников А.С. Концепция повышения экологической безопасности судна / А.С. Курников. –

Н.Новгород: ВГАВТ. – 2002. – 83с.
2. Международная Конвенция по предотвращению загрязнения с судов 1973 г., измененная протоколом 1978 г. к ней (МАРПОЛ 73/78). Книги I и II. – СПб., ЗАО «ЦНИИМФ», 2012. -760с.
3. Макаров В.В. Основы защиты воздушного бассейна: учеб. пособие/ В.В. Макаров. – Севастополь: Изд-во СевНТУ. – 2013. - 282с.

References

1. Kyrnikov A.S. Koncepciya povyusheniya ekologicheskoyi bezopasnosti sudna (The concept of improving the environmental safety of the vessel) / A.S. Kyrnikov. - N.Novgorod: VGAVT. - 2002. – 83p.
2. Mezhdunarodnaya Konvencia po predotvrasheniyu zagryazneniya s sudov 1973y., izmenennaya protokolom 1978y. k ney (The International Convention on predotvra-scheniyu Pollution from Ships, 1973., Measurable, nennaya Protocol of 1978 relating thereto) (MARPOL 73/78). Bk. I and II. – SPb.: ZAO "TSNIIMF" 2008. - 761p.
3. Makarov V.V. Osnovyu zashityu vozdushnogo basseina: ycheb. posobiye (Basics of air protection) / V.V. makarov. – Sevastopol: Publishing house of the SevNTU. – 2013. – 282p.

УДК 502.175

Комплексная экологическая оценка качества вод малых рек региона Севастополя

Г.В. Кучерик, Ю.А. Омельчук

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия. Galina_kucherik@mail.ru

Статья поступила 28.01.2019.г; после доработки 31.01.2019 г.

Аннотация

В работе произведена оценка качества вод малых рек региона Севастополя (Черной, Качи и Бельбек) по методике комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям, определен вклад определяемых параметров в техногенную нагрузку на данный водный объект. Качественный состав вод малых рек определялся по динамике содержания главных ионов и минерализации, соединений азота разной степени окисленности, фосфатов, органических соединений и параметрам, характеризующим антропогенное воздействие на речную систему по сезонам и по течению рек.

Ключевые слова: гидрохимические показатели, комплексная экологическая оценка, малые реки, техногенная нагрузка.

Integrated environmental assessment of the water quality of small rivers in the region of Sevastopol

G.V. Kucherik, Yu.A. Omelchuk

Sevastopol state university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia. Galina_kucherik@mail.ru

Received 28.01.2019 y.; received in final form 31.01.2019 y.

Abstract

The work assessed the water quality of small rivers in the region of Sevastopol (Chernyaya, Kacha and Belbek) according to the method of integrated assessment of the level of contamination of surface waters using hydrochemical parameters, and determined the contribution of the parameters to the man-induced impact on the water body. The qualitative composition of the waters of small rivers was determined by the dynamics of the content of major ions and mineralization, nitrogen compounds of varying degrees of oxidation, phosphates, organic compounds and parameters characterizing the anthropogenic effect on the river system by seasons and the river flow.

Keywords: hydrochemical indicators, integrated environmental assessment, small rivers, man-induced impact.

Введение

В России протекает два с половиной миллиона малых рек. Подавляющее их большинство имеют длину до 25 километров.

На долю малых рек приходятся 99% всех естественных водотоков России, а протяженность составляет 94% длины всех рек [1]. На водосборной площади и вблизи русел малых рек располагается 90 % всех населенных пунктов Российской федерации.

Водными ресурсами этих рек обеспечивается значительная часть всех хозяйственно-питьевых, производственных, оросительных, сельскохозяйственных потребностей в воде.

В них же сбрасываются 20% всех сточных вод разной степени очистки [2].

Малые реки испытывают наибольшее давление, вызванное человеческой деятельностью. Это отражается на жизни рек, приводит к их истощению, ухудшение качества воды, заилению русла и другим, иногда непредвиденным отрицательным последствиям [3]. Именно малые реки в особенности страдают от антропогенного влияния, поэтому экологическое состояние этих рек вызывает сегодня большую тревогу.

Особое место среди малых рек России занимают малые реки юга и Крыма. Их значение для этих регионов определяется маловодностью территорий, особым гидрологическим режимом и характером течения [4].

Охрана малых рек и водоемов от истощения и загрязнения - одна из важнейших экологических задач. Значение этой проблемы резко возрастает, и, можно сказать, что, либо общество ее решит положительно, либо начнется деградация окружающей среды и общества [5].

Многие отечественные и зарубежные ученые подчеркивают необходимость разработки критериев и нормативов, регламентирующих общую нагрузку на природные экосистемы [6,7].

С целью обеспечения соблюдение природоохранных требований и установления экологических приоритетов относительно поверхностных вод суши и эстуариев России, Гидрохимическим институтом Федеральной службы России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды в 2002 г. была разработана «Методика комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям» (РД 52.24.643-2002) [8].

Метод расчета комплексных показателей дает возможность формализовать процессы анализа, обобщения, оценки аналитической информации о химическом составе воды и трансформировать ее в относительные показатели, комплексно оценивающие степень загрязненности и качество воды водных объектов.

Постановка задачи

Объектом исследования послужило состояния вод малых рек региона Севастополя - Черной, Бельбек и Кача.

Качество вод малых рек региона Севастополя особенно значимо из-за маловодности региона, использования р.Черной как основного источника водоснабжения города, высокой степени хозяйственной освоенности водосборного бассейна и использования прибрежных площадей под жилищные и хозяйственные застройки [9].

Состояние малых рек региона Севастополя ранее рассматривалось на уровне соответствия нормам предельно-допустимых концентраций (ПДК) загрязняющих веществ. Поэтому представляло интерес произвести экологическую оценку качества вод малых рек региона на основе комплексного подхода к этому анализу. При этом используемая «Методика комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям» [8] позволяет вывести как общую категорию качества, так и определить качество воды по отдельным параметрам. Экологическая классификация дает возможность характеризовать качество вод, что позволит оценить степень влияния человеческой деятельности на качество вод малых рек региона Севастополя, выявить определенные водоохранные регламенты и разработать мероприятия на уровне региональной программы по охране водных объектов.

Актуальность выбранной темы очевидна в связи с тем, что малые реки региона Севастополя относительно качества и состояния их вод мало изучены и оценка качества их вод еще никогда не осуществлялась.

Цель работы состояла в комплексной экологической оценке качества вод малых рек региона Севастополя (Кача, Бельбек, Черная).

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- провести анализ условий формирования гидрологического и гидрохимического режимов малых рек региона Севастополя;
- изучить динамику изменения качества вод малых рек региона Севастополя по главным ионам, соединениям азота и фосфора, органическим веществам и антропогенным загрязнителям;
- оценить качество рек Черная, Бельбек и Кача методом комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям.

Исследования основывались на данных многолетнего мониторинга (2012-2018 гг.) по определению гидрохимических параметров. Учитывая, что река Черная на всем своем течении (35 км) полностью принадлежит региону Севастополя, а другие две реки находятся в административных границах Севастополя только нижним течением (Бельбек-17 км, Кача-5,4 км) [10], то в общей сложности проанализированы

показатели 32 проб воды из р.Качи, свыше 200 проб – из р.Бельбек и р.Черная.

Описание исследования

Качественный состав вод малых рек региона Севастополя (Черная, Бельбек, Кача) представлен содержанием главных ионов и минерализации, соединениям азота разной степени окисленности (аммонийный азот, нитритный азот, нитратный азот), фосфатам, органическим соединениям (по $БПК_5$, ХПК) и параметрам, характеризующим антропогенное воздействие на речную систему (СПАВ, нефтепродукты).

На рисунке 1 приведена динамика изменения концентрации главных ионов по сезонам на реках региона Севастополя, что позволяет определить динамику изменения этих ионов во времени.

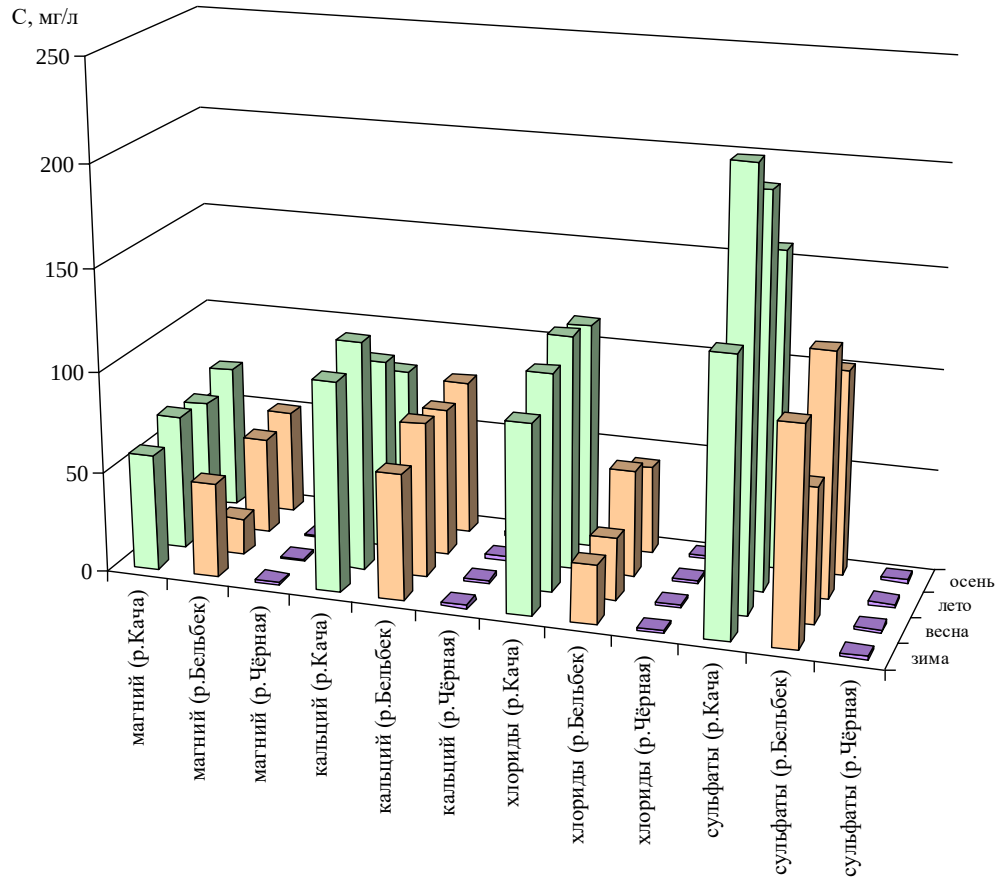

Рис. 1. Динамика изменения содержания главных ионов в водах малых рек Севастополя по сезонам

Анализируя график динамики изменения концентрации главных ионов по сезонам, можно сказать, что средние сезонные изменения содержания главных ионов выражены слабо.

Воды р.Черной и Бельбек относятся к водам средней минерализации. В среднем содержание растворенных солей составляет 281 мг/л и 423 мг/л, что позволяет отнести р.Черная и р.Кача к пресным гипогалинным водам. В минеральном составе р.Бельбек преобладают сульфат-ионы, они превышают в 1,7 раза содержание хлорид-ионов. Это соотношение сохраняется во все сезоны наблюдения.

В составе растворенных солей ионы кальция преобладают над ионами магния. В водах р.Черной это превышение достигает 5, а в р.Бельбек 1,7 раза. В целом же, в пределах определяемых параметров, в р.Черной и р.Бельбек преобладают ионы кальция и сульфат-ионы. Их содержание превышает сумму ионов магния и хлорид ионов в 2,5 и 2,1 раза соответственно, что позволяет их отнести к сульфатно-кальциевому типу.

Воды р.Кача более минерализованы, чем в р.Черная и р.Бельбек. Сухой остаток достигает здесь в среднем 700 мг/л. За период с 2012 г. до 2015 г. отмечалось четко выраженная тенденция в сторону повышения минерализации воды в Каче. В водах р. Кача преобладают анионы: сульфаты и хлориды, поэтому по критериям ионного состава воды, они относятся к олигогалинным.

Изменение концентрации главных ионов в зависимости от сезона связано с уровенным режимом реки и сезонными изменениями стока ее притоков.

Изменение концентраций главных ионов в р.Черная и р.Кача выражено слабо. Так содержание ионов магния и хлор-ионов остается практически неизменным: 26 и 12 мг/л соответственно. Содержание сульфатов колеблется с 29 до 39 мг/л; кальция – с 55 до 65 мг/л.

В р.Кача содержание хлорид-ионов, и катионов магния практически не изменяется. Содержание хлоридов варьирует в пределах от 90 до 110 мг/л, магния – 50-60 мг/л. Весной наблюдается резкое уменьшение концентрации сульфат-ионов с 220 до 160 мг/л а также катионов кальция с 110 до 78 мг/л. Этот процесс продолжается вплоть начала зимы.

Более наглядную картину дает график изменения концентрации главных ионов в р. Бельбек по сезонам. В осенне-зимний период преобладает дождевое питание. В этот период наблюдается понижение содержания катионов и анионов. Весной и летом, в связи с переходом реки на питание подземными водами, минерализация резко возрастает. Это обусловлено выходом на поверхность в районе от с. Верхнесадового до помологической станции, дренажных вод, где исторически отмечается высокое стояние подземных вод.

Дренажные воды, питающие Бельбек, характеризуются высокой концентрацией ионов кальция, который в 4 раза превышает концентрацию ионов магния, а также наличием хлоридов и сульфатов, средняя концентрация каждого из которых в дренажных водах достигает 130,0 мг/л.

Следует учитывать, что водность реки на протяжении года изменяется в границах 50% и в значительной мере связана с объемом отбора воды на потребности мелиорации, которая, в среднем, составляет в год для р.Бельбек 27,6 млн. куб.м и сбросом дренажных вод.

Подводя итог анализу динамики изменения главных ионов в пределах рассматриваемых параметров, следует отметить, что содержание главных ионов в реках региона Севастополя не превышает ПДК.

Содержание органических веществ в реках региона Севастополя определялось по биологическому потреблению кислорода за 5 суток ($БПК_5$) и по ХПК (рисунок 2).

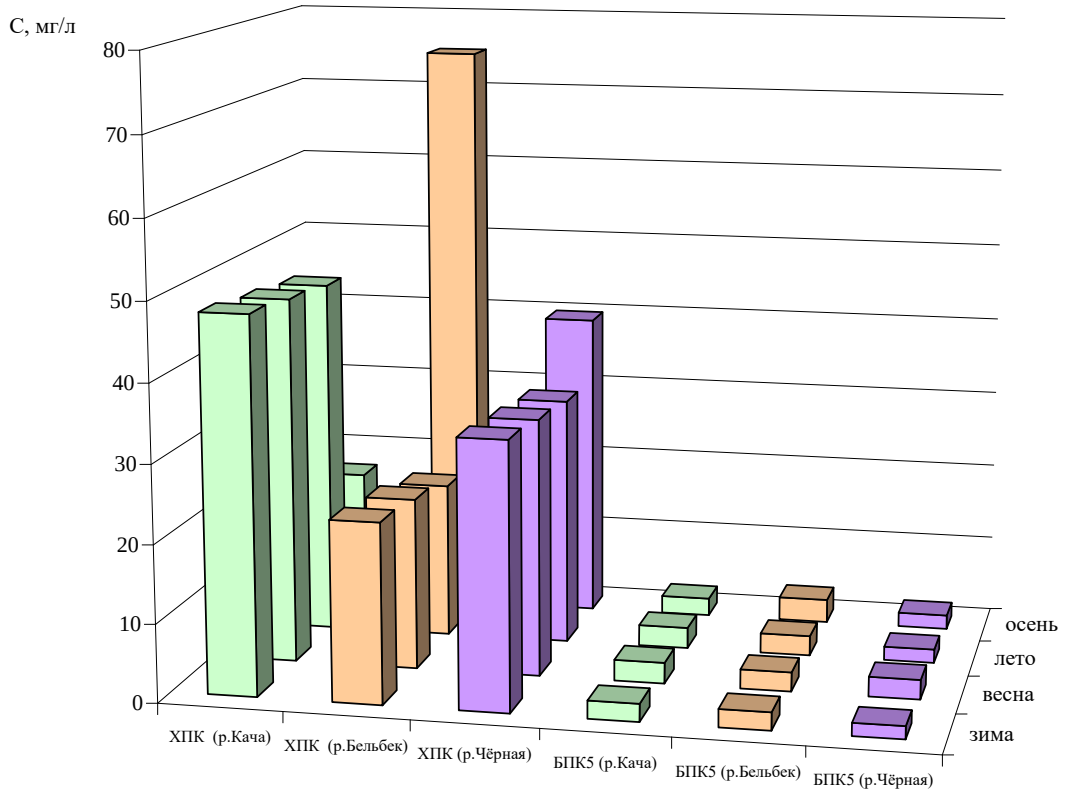

Рис. 2. Динамика изменения $БПК_5$ и ХПК в водах малых рек Севастополя по сезонам.

БПК, то есть использование кислорода на биохимическое окисление органических веществ при участии микроорганизмов, является одним из важнейших показателей степени загрязнения воды. Максимально допустимая концентрация $БПК_5$ составляет 3 мгO_2/л. Как известно, в незагрязненных водах $БПК_5$ обычно составляет 0,5-1 мгO_2/л. Количество органических веществ, судя по данным определения БПК и ХПК в р.Черной составляет 1,94 и 35,875 мгO_2/л соответственно. По сезонам содержание органики изменяется незначительно. Значения ХПК в водах р.Черной во все сезоны превышали ПДК (30 мгO_2/л) и в среднем составляли 35 мгO_2/л.

По течению р.Черной содержание органических веществ увеличивается после впадения в нее основного притока – р.Байдарки и после сброса сточных вод поселка Сахарная Головка. Еще более наглядно прослеживается антропогенное происхождение органического вещества в р.Бельбек, когда после сброса в нее сточных вод с очистных сооружений с.Фронтового и очистных сооружений помологической станции потребление кислорода увеличилось. Средние значения ХПК в р.Бельбек составляли 56,4 мг O_2/л.

Значение $БПК_5$ и ХПК в р.Кача на определяемых двух створах значимо не различалось. По содержанию легкоусвояемой органики (по $БПК_5$) значительных колебаний в водах р.Кача не выявлено: от 2,3 до 2,8 мг/л, что же касается содержания других органических веществ (по ХПК), то средние их значения превышали допустимые для хозяйственно-бытового назначения в 1,2 раза, что составляет 37 мгO_2/л.

При этом колебания органических веществ по ХПК составляют от 48 мгO_2/л в осенне-зимний до 17 мгO_2/л в весенне-летний.

Таким образом, во всех рассматриваемых реках наблюдается превышение содержания ХПК.

Динамика изменения антропогенных загрязнителей представлена на рисунке 3.

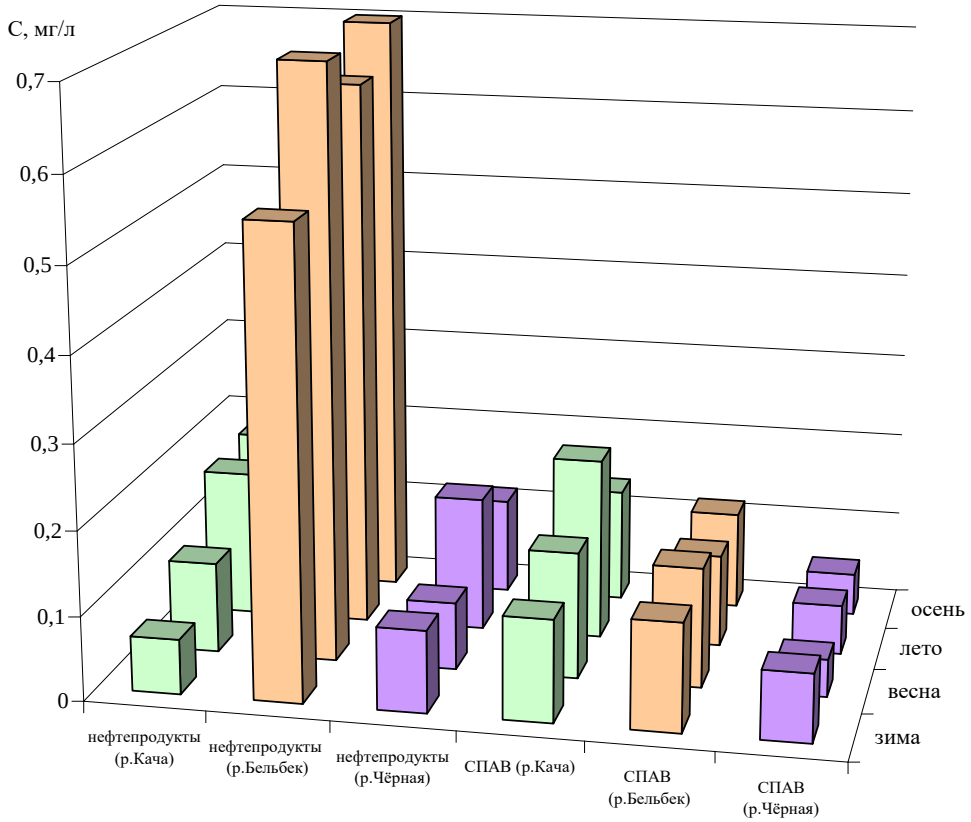

Рис. 3. Динамика изменения концентрации спав и нефтепродуктов по сезонам в водах малых рек региона Севастополя

В целом наиболее загрязненными нефтепродуктами являются воды р.Бельбек.

Среднее содержание нефтепродуктов в них составляет 0,65 мг/л, что превышает установленную ПДК в 2 раза. Наибольшее содержание нефтепродуктов в реке Бельбек наблюдается ниже сбросов канализационных очистных сооружений.

Река Черная – наиболее чистая из рассматриваемых по содержанию нефтепродуктов, средняя концентрация которых составляет 0,097 мг/л. Пробы, взятые по течению реки, свидетельствуют о непревышении содержания нефтепродуктов установленным ПДК. Наибольшее значение содержания нефтепродуктов (0,14 мг/л) зафиксировано после гидроузла №3.

На основании приведенных показателей можно проследить динамику каждого из них по сезонам, распределение их по течению. Однако, величины отдельных показателей не дают целостного представления о качестве воды.

Для экологической оценки качества вод малых рек региона была использована «Методика комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям», которая позволила однозначно скалярной величиной оценить загрязненность воды одновременно по широкому перечню ингредиентов и показателей качества воды и классифицировать воду по степени загрязненности.

Характеристика качества вод представлена на основании расчетов удельного комбинаторного индекса загрязненности воды, которая построена по принципу разделения вод на пять классов (таблица 1).

Химический анализ вод малых рек проводился по 16 ингредиентам перечня 1 методики [8], в который входит: растворенный в воде кислород; $БПК_5(O_2)$, ХПК, фенолы, нефтепродукты, нитрит-ионы (NO_2^-), нитрат-ионы (NO_3^-), аммоний ион (NH_4^+), железо общее, медь (Cu^{2+}), цинк (Zn^{2+}), никель (Ni^{2+}), марганец (Mn^{2+}), хлориды, сульфаты.

Таблица 1 *Классификация качества воды водотоков по значению удельного комбинаторного индекса загрязненности воды [4]*

Класс и разряд	Характеристика состояния загрязненности воды	Удельный комбинаторный индекс загрязненности воды					
		без учета числа КПЗ	в зависимости от числа учитываемых КПЗ				
			1 (k = 0,9)	2 (k = 0,8)	3 (k = 0,7)	4 (k = 0,6)	5 (k = 0,5)
1-й	Условно чистая	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5
2-й	Слабо загрязненная	(1; 2]	(0,9; 1,8]	(0,8; 1,6]	(0,7; 1,4]	(0,6; 1,2]	(0,5; 1,0]
3-й	Загрязненная	(2; 4]	(1,8; 3,6]	(1,6; 3,2]	(1,4; 2,8]	(1,2; 2,4]	(1,0; 2,0]
разряд «а»	загрязненная	(2; 3]	(1,8; 2,7]	(1,6; 2,4]	(1,4; 2,1]	(1,2; 1,8]	(1,0; 1,5]
разряд «б»	очень загрязненная	(3; 4]	(2,7; 3,6]	(2,4; 3,2]	(2,1; 2,8]	(1,8; 2,4]	(1,5; 2,0]
4-й	Грязная	(4; 11]	(3,6; 9,9]	(3,2; 8,8]	(2,8; 7,7]	(2,4; 6,6]	(2,0; 5,5]
разряд «а»	грязная	(4; 6]	(3,6; 5,4]	(3,2; 4,8]	(2,8; 4,2]	(2,4; 3,6]	(2,0; 3,0]
разряд «б»	грязная	(6; 8]	(5,4; 7,2]	(4,8; 6,4]	(4,2; 5,6]	(3,6; 4,8]	(3,0; 4,0]
разряд «в»	очень грязная	(8; 10]	(7,2; 9,0]	(6,4; 8,0]	(5,6; 7,0]	(4,8; 6,0]	(4,0; 5,0]
разряд «г»	очень грязная	(10; 11]	(9,0; 9,9]	(8,0; 8,8]	(7,0; 7,7]	(6,0; 6,6]	(5,0; 5,5]
5-й	Экстремально грязная	(11; ∞]	(9,9; ∞]	(8,8; ∞]	(7,7; ∞]	(6,6; ∞]	(5,5; ∞]

Вычисленные предварительным обследованием коэффициенты комплексности загрязненности вод для рек Черная, Бельбек и Кача позволяют сделать вывод о загрязнении этих рек по нескольким ингредиентам и показателям качества воды.

Результаты расчетов комбинаторного индекса загрязненности вод рек Черная, Бельбек и Кача представлены в таблицах 2-4, где C – концентрация вещества, *ПДК* – предельно-допустимая концентрация вещества, n_j - данные по числу определений, n_j' - данные по числу определений, превышающих ПДК.

Таблица 2. *Расчет комбинаторного индекса загрязненности воды реки Черная*

	C, мг/л	*ПДК, мг/л*	n_j	n_j'	a_i	S_{a_i}	$\sum \beta_i$	$\overline{\beta_i}$	S_{β_i}	S_i
Кислород	7,6-8,0	4	16	0	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0

	С, мг/л	*ПДК, мг/л*	n_j	n_j'	a_i	S_{a_i}	$\sum \beta_i$	$\overline{\beta}_i$	S_{β_i}	S_i
Сульфаты	30-40	350	16	0	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0
Хлориды	21-30	250	16	0	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0
ХПК	31-40	30	16	12	75,00	4	17,06	1,07	1,00	4
$БПК_5$	1-2	3	16	1	6,25	1	1,20	0,08	1,00	1
Азот аммонийный	0,1-0,2	0,5	16	0	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0
Нитриты	0,006-0,1	3	16	0	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0
Нитраты	1,01-2,5	40	16	0	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0
Фенолы	менее 0,001	0,001	16	0	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0
Железо	0,2-0,4	0,3	16	5	31,25	3	6,00	0,38	1,00	3
Медь	0,01-0,07	0,1	16	1	6,25	1	1,00	0,06	1,00	1
Цинк	0,09-0,03	1	16	0	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0
Марганец	менее 0,1	0,1	16	0	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0
Никель	менее 0,002	0,002	16	0	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0
Нефтепродукты	0,08-0,10	0,3	16	0	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0
СПАВ	0,05-0,08	0,5	16	0	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0

Таблица 3. *Расчет комбинаторного индекса загрязненности воды реки Бельбек*

	С, мг/л	*ПДК, мг/л*	n_j	n_j'	a_i	S_{a_i}	$\sum \beta_i$	$\overline{\beta}_i$	S_{β_i}	S_i
Кислород	7,9-9,9	4	16	0	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,0
Сульфаты	66-120	350	16	0	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,0
Хлориды	29-52	250	16	0	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,0
ХПК	21-57	30	16	12	75,00	4	25,00	1,56	1,50	6,0
$БПК_5$	2,2-3,1	3	16	5	31,25	3	2,00	0,13	1,00	3,0
Азот аммонийный	0,09-0,42	0,5	16	0	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,0
Нитриты	0,1-0,2	3	16	0	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,0
Нитраты	12-18	40	16	0	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,0
Фенолы	менее 0,001	0,001	16	0	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,0
Железо	0,7-1,2	0,3	16	16	100,00	1	58,00	3,63	2,70	2,7
Медь	0,015-0,022	0,1	16	0	0,00	1	0,00	0,00	0,00	0,0
Цинк	0,008-0,33	1	16	0	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,0
Марганец	менее 0,1	0,1	16	0	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,0
Никель	менее 0,002	0,002	16	0	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,0
Нефтепродукты	0,5-0,76	0,3	16	16	100,00	4	40,00	2,50	2,50	10,0
СПАВ	0,11-0,14	0,5	16	0	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,0

Таблица 4. *Расчет комбинаторного индекса загрязненности воды реки Кача*

	С, мг/л	*ПДК, мг/л*	n_j	n_j'	a_i	S_{a_i}	$\sum \beta_i$	$\overline{\beta}_i$	S_{β_i}	S_i
Кислород	9,0-10,0	4	16	16	100,00	4	36,00	2,25	0,00	0,00
Сульфаты	160-220	350	16	0	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00
Хлориды	90-110	250	16	0	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00

	С, мг/л	*ПДК, мг/л*	n_j	n_j'	a_i	S_{a_i}	$\sum \beta_i$	$\overline{\beta}_i$	S_{β_i}	S_i
ХПК	17-48	30	16	13	81,25	4	35,00	2,19	2,00	8,00
$БПК_5$	2,3-2,8	3	16	0	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00
Азот аммонийный	0,11-0,25	0,5	16	0	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00
Нитриты	0,09-0,18	3	16	0	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00
Нитраты	14-19	40	16	0	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00
Фенолы	менее 0,001	0,001	16	0	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00
Железо	0,07-0,9	0,3	16	14	42,00	3,7	58,00	3,63	2,80	10,36
Медь	0,002-0,025	0,1	16	0	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00
Цинк	0-0,045	1	16	0	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00
Марганец	менее 0,1	0,1	16	0	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00
Никель	менее 0,002	0,002	16	0	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00
Нефтепродукты	0,06-0,18	0,3	16	0	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00
СПАВ	0,12-0,22	0,5	16	0	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00

На основании данных второй и третьей граф определялась повторяемость случаев превышения ПДК *(a_i)*. По значениям повторяемости на основе справочных таблиц [8] был определен частный оценочный балл *(S_a)*. Рассчитана кратность превышения ПДК в тех результатах анализа, где оно имеет место *($\Sigma\beta_i$)*. Определено среднее значение кратности превышения ПДК только по тем пробам, где есть нарушение нормативов ($\overline{\beta}_i$).

По значениям средней кратности превышения ПДК на основе справочных таблиц методики [8] определен частный оценочный балл (S_{β_i}) и обобщенные оценочные баллы по каждому ингредиенту *(S_i)*. Значения комбинаторного индекса загрязненности воды определяли как сумму обобщенных оценочных баллов по каждому ингредиенту.

Затем вычисляли удельный комбинаторный индекс загрязненности воды.

Так как в воде реки Черная отсутствуют критические показатели загрязнения, то коэффициент запаса был равен 1.

В соответствии с классификацией качества воды водотоков по значению удельного комбинаторного индекса загрязненности (таблица 1) воды реки Черная относятся к условно чистым (класс 1).

К критическим показателям загрязнения вод реки Бельбек относят нефтепродукты, при этом коэффициент запаса равен 0,9.

В соответствии с классификацией качества воды водотоков по значению удельного комбинаторного индекса загрязненности воды реки Бельбек относятся к слабо загрязненным (класс 2).

К критическим показателям загрязнения вод реки Кача относят содержание железа, таким образом, коэффициент запаса равен 0,9.

В соответствии с таблицей 1 воды реки Кача относятся к слабо загрязненным (класс 2).

Заключение

Таким образом, в работе было оценено качество малых рек региона Севастополя (Черной, Качи и Бельбек) по «Методике комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям».

Качественный состав вод малых рек региона Севастополя определялся по динамике содержания главных ионов и минерализации, соединений азота разной степени окисленности, фосфатов, органических соединений (по БПК5, ХПК) и параметрам, характеризующим антропогенное воздействие на речную систему (СПАВ, нефтепродукты) по сезонам и по течению рек.

Было установлено, что воды р.Черная относятся к условно чистым (1 категория), р.Бельбек и р.Кача – слабо загрязненные (2 категория).

Использование полученных результатов целесообразно при необходимости однозначной оценки: для планирования водоохраной деятельности, разработки водоохранных мероприятий, осуществлении экологического и эколого-экономического районирования, экологического картографирования. Данные, полученные в работе, можно использовать для усовершенствования технологического процесса очистки сырой воды и доведения ее качества до требо-

ваний ГОСТ Р 51232-98 «Вода питьевая. Общие требования к организации и методам контроля качества».

Список литературы

1. Кочарян, А.Г. Загрязнение воды // Научно-популярная энциклопедия «Вода России». URL: http://water-rf.ru (дата обращения: 10.02.2019).
2. Зунтов, И. Чтобы спасти большие реки, нужно начать с малых // Русская планета. URL: http://rusplt.ru/our-people/our-people-1_165.html (дата обращения: 19.01.2019).
3. Кукалев, А.И. и др. Анализ качества рек водных объектов России при изучении экологии // Материалы IX международной студенческой научной конференции «Студенческий научный форум – 2017» М.: 2018. URL: https://scienceforum.ru/2017/article/2017038619 (дата обращения: 17.01.2019).
4. Олиферов, А.Н. Реки и озёра Крыма / А.Н. Олиферов, З.В. Тимченко // Симферополь: Доля, 2005. – 216 с.
5. Омельчук, Ю.А. *Гидрология* / Ю.А. Омельчук, Г.В. Кучерик, Е.В. Заблоцкая // Севастополь: СевГУ, 2018. – 152 с.
6. Боков, В.А. Трансформация водного баланса в Крыму в XX веке - начале XXI века. Симферополь: Крымский научный центр, 2011. – 227 с.
7. Кучер, М.И. Экология : учеб. пособие / под ред. проф. Е.Э. Френкеля. Вольск: ВВИМО, 2015. – 265 с.
8. РД 52.24.643-2002 Методические указания. Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям / Росгидромет. - СПб.: Гидрометеоиздат, 2003. – 38 с.
9. Позаченюк, Е.А. Современные ландшафты Крыма и сопредельных акваторий // Симферополь: Бизнес-Информ, 2009. – 672 с.
10. Схема комплексного использования и охраны Водных ресурсов бассейнов рек на территории Республики Крым // М., 2016. – 70 с.
11. Пояснительная записка к проекту нормативов допустимого воздействия на водные объекты, расположенные на территории республики Крым / Государственный комитет по водному хозяйству и мелиорации Республики Крым // Симферополь, 2017. – 101 с.

References

1. Kocharyan A.G. *Zagryaznenie vody* [Water Pollution] // Popular Encyclopedia "Water of Russia". URL: http://water-rf.ru (date of the application: 10.02.2019).
2. Zuntov I. *Chtoby spasti bol'shie reki, nuzhno nachat' s malyh* [To save big rivers, you need to start with small ones] // Russian Planet. URL: http://rusplt.ru/our-people/our-people-1_165.html (date of the application: 19.01.2019).
3. Kukalev A.I. et al. *Analiz kachestva rek vodnyh ob"ektov Rossii pri izuchenii ehkologii* [Analysis of the quality of rivers of water bodies of Russia in the study of ecology] // Materials of the IX International Student Scientific Conference "Student Scientific Forum - 2017". Moscow, 2018. URL: https://scienceforum.ru/2017/article/2017038619 (date of the application: 17.01.2019).
4. Oliferov A.N. *Reki i ozyora Kryma* [Rivers and Lakes of Crimea] / A.N. Oliferov, Z.V. Timchenko // Simferopol: Share, 2005. 216 p.
5. Omelchuk Yu.A. *Gidrologiya* [Hydrology] / Yu.A. Omelchuk, G.V. Kucherik, E.V. Zablotskaya // Sevastopol: SevSU, 2018, 152 p.
6. Bokov V.A. *Transformaciya vodnogo balansa v Krymu v XX veke - nachale XXI veka* [Transformation of water balance in the Crimea in the XX century - the beginning of the XXI century]. Simferopol: Crimean Scientific Center, 2011, 227 p.
7. Kucher M.I. *Ekologiya* [Ecology]: studies. manual / ed. prof. E.E. Frenkel. Vol'sk: VVIMO, 2015, 265 p.
8. GD 52.24.643-2002 *Metodicheskie ukazaniya. Metod kompleksnoj ocenki stepeni zagryaznennosti poverhnostnyh vod po gidrohimicheskim pokazatelyam* [Guidelines. The method of comprehensive assessment of the degree of contamination of surface waters by hydrochemical indicators] / Roshydromet. - SPb .: Gidrometeoizdat, 2003, 38 p.
9. Pozachenuk E.A. *Sovremennye landshafty Kryma i sopredel'nyh akvatorij* [Modern landscapes of the Crimea and adjacent waters] // Simferopol: Business-Inform, 2009, 672 p.
10. *Skhema kompleksnogo ispol'zovaniya i ohrany Vodnyh resursov bassejnov rek na territorii Respubliki Krym* [Scheme of integrated use and protection of water resources of river basins in the territory of the Republic of Crimea] // Moscow, 2016, 70 p.
11. *Skhema kompleksnogo ispol'zovaniya i ohrany Vodnyh resursov bassejnov rek na territorii Respubliki Krym* [Explanatory note to the draft standards for permissible impact on water bodies located in the territory of the Republic of Crimea] / State Committee on Water Management and Land Reclamation of the Republic of Crimea // Simferopol, 2017, 101 p.

ISSN 2413-5526

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
«ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ТЕХНОЛОГИИ»
Том 5 № 1

SCIENTIFIC MAGAZINE
«POWER PLANTS AND TECHNOLOGIES»
Vol. 5 No 1

Учредитель и издатель:
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»
ул. Университетская, 33. Севастополь, 299053, Российская Федерация

Адрес редколлегии:
ИЯЭиП, ул. Курчатова, 7. Севастополь, 299015, Российская Федерация
E-mail nauchnyyzhurnal@mail.ru
тел. +7(8692) 71-01-64.

Редакция не несет ответственности за нарушение авторами исключительных прав на результаты интеллектуальной деятельности третьих лиц. Мнения, высказываемые авторами в публикуемых статьях, не всегда совпадают с мнением редакции. При перепечатке материалов ссылка на научный журнал «Энергетические установки и технологии» обязательна.

Научный журнал «Энергетические установки и технологии» издается в авторской редакции.

Компьютерная верстка: *Е.А. Нестерова.*

Подписано к печати 20.03.2019. Изд. № 9/19. Зак. 14/19. Тираж 65 экз.
Объем 22 п.л. Усл. печ. л. 20,46. Уч.-изд. л. 21,56. Формат бумаги 60 х 84 1/8

РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»