ISSN 2413-5526

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал

Т. 6 № 2

Севастополь
2020

Э 651 ISSN 2413-5526
УДК 621.311

Э 651 **Энергетические установки и технологии: науч. журнал. – Севастополь: ФГАОУ ВО СевГУ, 2020. – Т. 6. - № 2. – 148 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», 2020

СОДЕРЖАНИЕ

Тепловые и ядерные энергетические установки **7**

Мирошниченко С.Т., Пухлий В.А., Глушкова Е.В., Пантель В.О., Корнеева А.К. К расчету конструкционных элементов ядерной энергетики в виде трапециевидных анизотропных оболочек 7

Нурзай В.А., Быковский Ю.М., Петула Т.Е., Белых Т.И. Определение максимальных расстояний видеосъемки для фиксации смещений механических объектов оптическим способом, при использовании отражающих голографических тест-объектов 19

Пухлий В.А., Коршунов Д.А., Пухлий К.В. К расчету на прочность закрылков вентиляторов главного проветривания рудников и шахт 25

Фролова М.А., Пономаренко П.А О средней плотности потока космических нейтронов по земному шару 36

Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии **40**

Кочетов И.А., Шайтор Н.М. Практика применения программно-вычислительных комплексов и программ для расчета оптимальных конфигураций электрических сетей 40

Кувшинов В.В., Какушина Е.Г., Каширин Д.А., Бордан Д.Ф., Восканян А.А. Функциональный блок контроля для солнечных батарей 45

Кувшинов В.В., Какушина Е.Г., Кулемина А.П., Куренкова А.В., Портнова Е.Р. Экспериментальные исследования плоских солнечных коллекторов, используемых для нужд автономных потребителей в южных регионах Российской Федерации 51

Чебоксаров В.В., Кочетов И.А. Выбор оборудования плавучих волновых энергоустановок 58

Якимович Б.А., Филькин Н.М., Музафаров Р.С., Кузнецов П.Н., Смокталь Н.Н. Анализ показателей надежности унифицированной машины технологического электротранспорта 64

Электротехнические комплексы и системы **71**

Кузнецов П.Н., Котельников Д.Ю., Воронин Д.Ю., Хомюк А.Г. Прогнозирование энергопотребления при использовании данных мониторинга электрических параметров 71

Майорова Ю.А., Пащук Е.В., Смокталь Н.Н. Способы снижения потребления топлива дизельными электростанциями 77

Смирнов В.В., Муртазаев И.А. Достоинства и недостатки «Умных сетей» в России 88

Химические технологии **92**

Акимов А.М., Котельникова С.А., Филатова В.Э. Пути совершенствования технологии переработки жидких радиоактивных отходов 92

Баранов Г.А., Дербасова Н.М., Гавриш О.П., Гавриш В.М., Турянский В.А. Исследования диоксида кремния микронного и субмикронного размера из отходов карьерного производства, полученного методом осаждения 98

Федорова С.А. Влияние нанопорошка диоксида кремния на электропроводность модельных сред, содержащих катионы Na^{+}, Mg^{2+},Fe^{3+} 105

Черкашина Н.И., Разина В.А., Тарасевич Д.В. Расчетно-экспериментальное исследование радиационно-защитных свойств тугоплавких композитных материалов 111

Экологическая безопасность **117**

Заблоцкая Е.В., Инвентаризация зелёных насаждений парка Института ядерной энергии и промышленности 117

Замыслова Т.Н., Магдыч Е.А., Набухотняя Т.С. Оценка миграции радионуклидов Pu-239 и Cs-137 через бентонитовый буферный слой пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов 122

Кулик К.А.,. Дербасова Н.М , Гавриш В.М.,.Гавриш О.П. Способ микробиологической деструкции стальных изделий марок Сталь-5, Сталь-20Х бактериальной культурой (Thiobacillus ferrooxidans) 130

Романенко А.А. Результаты радиологического обследования почв сельскохозяйственных угодий Брянской области 135

Фадова А.А., Кучерик Г.В., Заблоцкая Е.В. Оценка качества атмосферного воздуха района размещения основной площадки Акционерного общества «Интер РАО – Электрогенерация» 138

Для авторов **146**

CONTENTS

Thermal and nuclear power plant **7**

Miroshnichenko S.T., Pukhliy V.A., Glushkova E.V., Pantel V.O., Korneeva A.K. To the calculation of structural elements of nuclear energy in the form of trapezoidal anisotropic shells 7

Nurzai V.A., Bykovsky Yu.M., Petula T.E., Belykh T.I. Determination of the maximum distance of video recording for measuring the displacements of mechanical objects in an optical way, using reflective holographic test objects 19

Pukhliy V.A., Korshunov D.A., Pukliy K.V The stress-strain state of the working blades fans main ventilation of mines and pits 25

Frolova M.A., Ponomarenko P.A. On the average density of the cosmic neutron flux around the globe 36

Alternative and renewable energy sources **40**

Kochetov I.A., Shaytor N.M. Application practice complexes and programs for calculating optimal electrical network configurations 40

Kuvshjnov V.V., Kakyshina E.G., Kashirin D.A., Bordan D.F., Voskanyan A.A. Functional control unit for solar panels 45

Kuvshjnov V.V., Kakyshina E.G., Kylemina A.P., Kyrenkova A.V., Poptnova E.R. The experimental studies of flat solar collectors used for the needs of Autonomous consumers in the southern regions of the Russian Federation 51

Cheboxarov V.V., Kochetov I.A. Selection of equipment of floating wave power plants 58

Yakimovich B.A., Filkin N.M., Muzafarov R.S., Kuznetsov P.N., Smoktal N.N. Analysis of reliability indicators of a unified machine of technological electric transport 64

Electrotechnical complexes and systems **71**

Kuznetsov P.N., Kotelnikov D.Y., Voronin D.Y., Homyuk A.G. Energy prediction based on electrical parameters monitoring 71

Majorova Ju.A., Pashhuk E.V., Smoktal N.N. Ways to reduce fuel consumption diesel power plants 77

Smirnov V. V., Murtazaev I. A. Advantages and disadvantages of «Smart Grid» in Russia 88

Chemical technology of nuclear power plants **92**

Akimov A.M., Kotelnikova S.A.,.Filatova V.E. Ways to improve technology for processing liquid radioactive waste 92

Baranov G.A., Derbasova N.M., Gavrish O.P., Gavrish V.M., Turyansky V.A. Investigation of micron and submicron-sized silica from opencast mining waste 98

Fedorova S.A. The effect of silicon dioxide nanopowder on the electrical conductivity of model media containing cations Na^{+}, Mg^{2+}, Fe^{3+} 105

Cherkashina N.I., Rasina V.A., Tarasevich D.V. Computational-experimental study of radiation-protective properties of refractory composite materials 111

Environmental Safety **117**

Zablotskaya E.V., Inventory of green spaces in the Park of the Institute of nuclear energy and industry 117

Zamislova T.N., Magdych E.A., Nabukhotnyaya T.S. Valuation radionuclide migration Pu-239 and Cs-137 through bentonite buffer layer of Deep Radioactive Waste Disposal Point 122

Kulik K. A., Derbasova N M., Gavrish V.M., Gavrish O.P.. Method of microbiological destruction of steel products of grades Steel-5, Steel-20X bacterial culture (Thiobacillus ferrooxidans). 130

Romanenko A.A. Results of radiological survey of soils of agricultural lands of the Bryansk region 135

Fadova A.A., Kucherik G.V., Zablotskaya E.V. Assessment of air quality in the area of accommodation main site of the joint stock company «Inter RAO – Elektrogeneratsiya» 138

For cars **146**

ТЕПЛОВЫЕ И ЯДЕРНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

УДК 539.3

К расчету конструкционных элементов ядерной энергетики в виде трапециевидных анизотропных оболочек

С.Т. Мирошниченко, В.А. Пухлий, Е.В. Глушкова, В.О. Пантель, А.К. Корнеева

[1]*ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г.Севастополь, 299015, Россия, pu1611@rambler.ru*

Статья поступила 15.04.2020 г.; после доработки 17.04.2020 г.

Аннотация

Рассматривается математическая модель и алгоритм расчета трапециевидных оболочек на прочность. Учитывается анизотропия упругих характеристик материала. Исходная система дифференциальных уравнений в частных производных методом интегральных соотношений Дородницына приводится к системе обыкновенных дифференциальных уравнений. Переменность коэффициентов не позволяет получить точное решение задачи, в связи с чем интегрирование полученной системы уравнений осуществляется модифицированным методом последовательных приближений, разработанным проф. В.А.Пухлий.

Ключевые слова: конструкционные элементы ядерной энергетики, трапециевидные оболочки, анизотропия упругих свойств, сплайновые интерполяции, модифицированный метод последовательных приближений.

To the calculation of structural elements of nuclear energy in the form of trapezoidal anisotropic shells

S.T. Miroshnichenko, V.A. Pukhliy, E.V. Glushkova, V.O. Pantel, A.K. Korneeva

[1] *Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Sevastopol State University", Sevastopol, 299015, Russia, pu1611@rambler.ru*

Received 15.04.2020 y.; received in final form 17.04.2020 y.

Abstract

A mathematical model and an algorithm for calculating the trapezoidal shells for strength are considered. The anisotropy of the elastic characteristics of the material is taken into account. The original system of partial differential equations by the method of integral relations Dorodnitsyn reduced to a system of ordinary differential equations. Variability of the coefficients does not allow to obtain an exact solution to the problem, and therefore the integration of the resulting system of equations is carried out by the modified method of successive approximations developed by prof. V.A. Pukhliy.

Keywords: Structural elements of nuclear energy, trapezoidal shells, anisotropy of elastic properties, spline interpolations, modified method of successive approximations

Введение

При разработке высокопрочных и надежных конструкций многих отраслей промышленностей, в частности ядерной энергетики широкое применение находят изотропные и анизотропные оболочки сложной геометрии и переменной жесткости, работающие в условиях сложного нагружения и подвергающихся воздействию температурных полей. Для исследования прочности оболочек, используемых в качестве конструкцион-

ных элементов, требуется в первую очередь знание их напряженно-деформирован-ного состояния, что приводит к необходимости разработки эффективных методов решения краевых задач теории оболочек.

Особое место занимают оболочки открытого профиля, непрямоугольного очертания в плане. Многие традиционные методы расчета напряженно-деформированного состояния оболочек прямоугольной формы для них малоэффективны. Между тем косоугольные оболочки находят широкое применение в качестве конструктивных элементов ядерной энергетики, холодильной и криогенной техники, машин, летательных аппаратов, различных сооружений, элементов турбомашин, плит настилов мостов и др.

В настоящей работе проводится исследование напряженно-деформированного состояния однородных анизотропных оболочек переменной жесткости и сложной формы на основе аналитического подхода, разработанного проф. В.А.Пухлий [1-3].

Постановка цели и задач научного исследования

Целью данной работы является изучение проблемы напряженно-деформированного состояния конструкционных элементов современной техники, в частности, ядерной энергетики, представляющих собой трапециевидные анизотропные оболочки.

Для исследования данной проблемы предполагается использование аналитического подхода при решении краевых задач математический физики.

Анизотропные оболочки

Рассмотрим задачу о напряженно-деформированном состоянии трапециевидной цилиндрической анизотропной панели переменной жесткости. На рис. 1 приведена геометрия и система координат оболочки.

Для вывода уравнений используем техническую теорию анизотропных оболочек С.А.Амбарцумяна [4], которая наряду с гипотезой Кирхгофа-Лява о недеформируемой нормали базируется на следующих дополнительных предположениях:

а) в геометрических соотношениях для χ_{ij} сохраняются лишь слагаемые, содержащие нормальное перемещение

$$\varepsilon_{11} = u_{1,1};\quad \varepsilon_{22} = u_{2,2} + w/R;\quad \varepsilon_{12} = u_{1,2} + u_{2,1};\quad (1)$$

$$\chi_{11} = -w_{,11};\qquad \chi_{22} = -w_{,22};$$
$$\chi_{12} = -2w_{,12}. \qquad (2)$$

б) вместо соотношений упругости берутся более простые соотношения, удовлетворяющие шестому уравнению равновесия приближенно:

$$T_{11} = c_{11}\varepsilon_{11} + c_{12}\varepsilon_{22} + c_{16}\varepsilon_{12};$$
$$T_{22} = c_{12}\varepsilon_{11} + c_{22}\varepsilon_{22} + c_{26}\varepsilon_{12};$$
$$T_{12} = c_{16}\varepsilon_{11} + c_{26}\varepsilon_{22} + c_{66}\varepsilon_{12};$$
$$M_{11} = D_{11}\chi_{11} + D_{12}\chi_{22} + D_{16}\chi_{12};$$
$$M_{22} = D_{12}\chi_{11} + D_{22}\chi_{22} + D_{26}\chi_{12};$$
$$M_{12} = D_{16}\chi_{11} + D_{26}\chi_{22} + D_{66}\chi_{12}. \qquad (3)$$

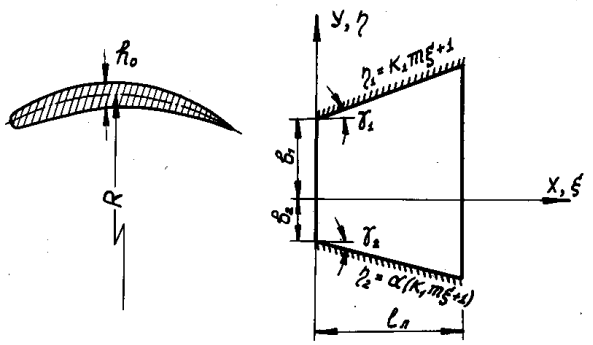


Рис.1. Геометрия и система координат для анизотропной трапециевидной оболочки.

Здесь перемещения u_1 и u_2 приняты вдоль оси y и x соответственно. Нижний индекс i, следующий после запятой, означает частное дифференцирование по координате x_i, при этом i = 1 соответствует дифференцированию по y, а i = 2 - по x. Для круговой цилиндрической оболочки запишем уравнения равновесия:

$$T_{11,1} + T_{12,2} = 0;\quad T_{22} - N_{11,1} - N_{22,2} = q;$$
$$T_{22,2} + M_{12,1} = -p;\quad M_{11,1} + M_{12,2} = N_{11};$$
$$M_{22,2} + M_{12,1} = N_{22}; \qquad (4)$$

Для внутренних сил и моментов запишем выражения в перемещениях:

$$T_{11} = \left(c_{11}u_{1,1} + c_{16}u_{1,2}\right) + \left(c_{16}u_{2,1} + c_{12}u_{2,2}\right) + c_{12}\frac{w}{R};$$
$$T_{22} = \left(c_{12}u_{1,1} + c_{26}u_{1,2}\right) + \left(c_{26}u_{2,1} + c_{22}u_{2,2}\right) + c_{22}\frac{w}{R};$$
$$T_{12} = \left(c_{16}u_{1,1} + c_{66}u_{1,2}\right) + \left(c_{66}u_{2,1} + c_{26}u_{2,2}\right) + c_{26}\frac{w}{R}; \qquad (5)$$

$$M_{11} = -\left(D_{11}w_{,11} + 2D_{16}w_{,12} + D_{12}w_{,22}\right);$$
$$M_{22} = -\left(D_{22}w_{,22} + 2D_{26}w_{,12} + D_{12}w_{,11}\right);$$
$$M_{12} = -\left(2D_{66}w_{,12} + D_{16}w_{,11} + D_{26}w_{,22}\right). \qquad (6)$$

Переходим к выводу уравнений. Подставляя значения моментов из (6) в последние два уравнения равновесия (4), получим для поперечных сил следующие выражения:

$$N_{11} = -E_1(D_{ik}); \quad N_{22} = -E_2(D_{ik}), \qquad (7)$$

где для линейных операторов третьего порядка имеем:

$$E_1(D_{ik}) = D_{11}w_{,111} + 3D_{16}w_{,112} + \left(D_{12} + 2D_{66}\right)\mathrm{w}_{,122} +$$
$$+ D_{26}w_{,222} + \left(D_{11,1} + D_{16,2}\right)\mathrm{w}_{,11} +$$
$$+ 2\left(D_{16,1} + D_{66,2}\right)\mathrm{w}_{,12} + \left(D_{12,1} + D_{26,2}\right)\mathrm{w}_{,22};$$

$$E_2(D_{ik}) = D_{16}w_{,111} + 3D_{26}w_{,122} + \left(D_{12} + 2D_{66}\right)\mathrm{w}_{,122} +$$
$$+ D_{22}w_{,222} + \left(D_{12,2} + D_{16,1}\right)\mathrm{w}_{,11} +$$
$$+ 2\left(D_{26,2} + D_{66,1}\right)\mathrm{w}_{,12} + \left(D_{22,2} + D_{26,1}\right)\mathrm{w}_{,22}. \qquad (8)$$

Исключая из уравнений равновесия (4) поперечные силы N_1 и N_2, получим:

$$T_{11,1} + T_{12,2} = 0; \quad T_{22,2} + T_{12,1} = -p;$$
$$T_2 - M_{11,11} - 2M_{12,12} - M_{22,22} = q - pw_{,1}. \qquad (9)$$

Подставляя в уравнения (9) выражения (5) и (6), получим разрешающую систему дифференциальных уравнений в перемещениях:

$$\left.\begin{array}{l} L_{11}(C_{ik})u_1 + L_{12}(C_{ik})u_2 + L_{13}(C_{ik})\mathrm{w} = 0 \\ L_{21}(C_{ik})u_1 + L_{22}(C_{ik})u_2 + L_{23}(C_{ik})\mathrm{w} = \text{-p} \\ L_{31}(C_{ik})\mathrm{u}_1 + L_{32}(C_{ik})\mathrm{u}_2 + L_{33}(C_{ik}, D_{ik})\mathrm{w} = \mathrm{q} \end{array}\right\} (10)$$

Здесь линейные операторы L_{ik} следующие:

$$L_{11}(C_{ik}) = \left[c_{11}\frac{\partial^2}{\partial y^2} + 2c_{16}\frac{\partial^2}{\partial x\partial y} + c_{66}\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \left(\frac{\partial c_{11}}{\partial y} + \frac{\partial c_{16}}{\partial x}\right)\frac{\partial}{\partial \mathrm{y}} + \left(\frac{\partial c_{16}}{\partial y} + \frac{\partial c_{66}}{\partial x}\right)\frac{\partial}{\partial \mathrm{x}}\right];$$

$$L_{12}(C_{ik}) = \left[c_{16}\frac{\partial^2}{\partial y^2} + \left(c_{12} + c_{66}\right)\frac{\partial^2}{\partial x\partial y} + c_{26}\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \left(\frac{\partial c_{16}}{\partial y} + \frac{\partial c_{66}}{\partial x}\right)\frac{\partial}{\partial y} + \left(\frac{\partial c_{12}}{\partial y} + \frac{\partial c_{26}}{\partial x}\right)\frac{\partial}{\partial x}\right];$$

$$L_{13}(C_{ik}) = \frac{1}{R}\left[c_{12}\frac{\partial}{\partial y} + c_{26}\frac{\partial}{\partial x} + \left(\frac{\partial c_{12}}{\partial y} + \frac{\partial c_{26}}{\partial x}\right)\right];$$

$$L_{21}(C_{ik}) = \left[c_{16}\frac{\partial^2}{\partial y^2} + \left(c_{12} + c_{66}\right)\frac{\partial^2}{\partial x\partial y} + c_{26}\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \left(\frac{\partial c_{12}}{\partial x} + \frac{\partial c_{16}}{\partial y}\right)\frac{\partial}{\partial y} + \left(\frac{\partial c_{26}}{\partial x} + \frac{\partial c_{65}}{\partial y}\right)\frac{\partial}{\partial \mathrm{x}}\right];$$

$$L_{22}(C_{ik}) = \left[c_{66}\frac{\partial^2}{\partial y^2} + 2c_{26}\frac{\partial^2}{\partial x\partial y} + c_{22}\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \left(\frac{\partial c_{26}}{\partial x} + \frac{\partial c_{66}}{\partial y}\right)\frac{\partial}{\partial \mathrm{y}} + \left(\frac{\partial c_{22}}{\partial x} + \frac{\partial c_{26}}{\partial y}\right)\frac{\partial}{\partial x}\right];$$

$$L_{23}(C_{ik}) = \frac{1}{R}\left[c_{22}\frac{\partial}{\partial x} + c_{26}\frac{\partial}{\partial y} + \left(\frac{\partial c_{22}}{\partial x} + \frac{\partial c_{26}}{\partial y}\right)\right]; \quad L_{31}(C_{ik}) = \frac{1}{R}\left(c_{12}\frac{\partial}{\partial y} + c_{26}\frac{\partial}{\partial x}\right);$$

$$L_{32}(C_{ik}) = \frac{1}{R}\left(c_{22}\frac{\partial}{\partial y} + c_{26}\frac{\partial}{\partial x}\right);$$

$$L_{33}(C_{ik,}D_{ik}) = D_{11}\frac{\partial^4}{\partial y^4} + 4D_{16}\frac{\partial^4}{\partial y^3\partial x} + 2\left(D_{12} + 2D_{66}\right)\frac{\partial^4}{\partial y^2\partial x^2} + 4D_{26}\frac{\partial^4}{\partial y\partial x^3} +$$
$$+ D_{22}\frac{\partial^4}{\partial x^4} + 2\left(\frac{\partial D_{11}}{\partial y} + \frac{\partial D_{16}}{\partial x}\right)\frac{\partial^3}{\partial y^3} + 2\left(3\frac{\partial D_{16}}{\partial y} + 2\frac{\partial D_{66}}{\partial x} + \frac{\partial D_{12}}{\partial x}\right)\frac{\partial^3}{\partial y^2\partial x} +$$
$$+ 2\left(3\frac{\partial D_{26}}{\partial x} + 2\frac{\partial D_{66}}{\partial y} + \frac{\partial D_{12}}{\partial y}\right)\frac{\partial^3}{\partial y\partial x^2} + 2\left(\frac{\partial D_{26}}{\partial y} + \frac{\partial D_{22}}{\partial x}\right)\frac{\partial^3}{\partial x^3} +$$
$$+ \left(\frac{\partial^2 D_{11}}{\partial x^2} + 2\frac{\partial^2 D_{16}}{\partial x\partial y} + \frac{\partial^2 D_{16}}{\partial x^2}\right)\frac{\partial^2}{\partial y^2} + 2\left(\frac{\partial^2 D_{16}}{\partial y^2} + 2\frac{\partial^2 D_{66}}{\partial x\partial y} + \frac{\partial^2 D_{26}}{\partial x^2}\right)\frac{\partial^2}{\partial x\partial y} +$$

$$+\left(\frac{\partial^2 D_{12}}{\partial y^2}+2\frac{\partial^2 D_{26}}{\partial x\partial y}+\frac{\partial^2 D_{22}}{\partial x^2}\right)\frac{\partial^2}{\partial x^2}+p\frac{\partial}{\partial x}+c_{22}R^{-2}.$$

В операторах L_{ik} выражения C_{ik} и D_{ik} имеют вид:

$$C_{ik}=hB_{ik};\ D_{ik}=\frac{h^3}{12}B_{ik}, \qquad (11)$$

где коэффициенты B_{ik} определяются соотношениями:

$$B_{11}=\frac{1}{\Delta}\left(a_{22}a_{66}-a_{26}^2\right);\ B_{22}=\frac{1}{\Delta}\left(a_{11}a_{66}-a_{16}^2\right);$$

$$B_{12}=\frac{1}{\Delta}\left(a_{16}a_{26}-a_{12}a_{66}\right);\ B_{66}=\frac{1}{\Delta}\left(a_{11}a_{22}-a_{12}^2\right);$$

$$B_{16}=\frac{1}{\Delta}\left(a_{12}a_{26}-a_{22}a_{16}\right);$$

$$B_{26}=\frac{1}{\Delta}\left(a_{12}a_{16}-a_{11}a_{26}\right);$$

$$\Delta=\left(a_{11}a_{22}-a_{12}^2\right)a_{66}+2a_{12}a_{16}a_{26}-a_{11}a_{26}^2-a_{22}a_{16}^2$$

Для ортотропного материала с главными осями упругой симметрии, повернутыми относительно осей x и y на угол φ имеем:

$$a_{11}=\frac{\cos^4\varphi}{E_1}+\left(\frac{1}{G}-\frac{2\nu_1}{E_1}\right)\sin^2\varphi\cos^2\varphi+\frac{\sin^4\varphi}{E_2};$$

$$a_{22}=\frac{\sin^4\varphi}{E_1}+\left(\frac{1}{G}-\frac{2\nu_2}{E_2}\right)\sin^2\varphi\cos^2\varphi+\frac{\cos^4\varphi}{E_2};$$

$$a_{12}=\left(\frac{1+\nu_1}{E_1}+\frac{1+\nu_2}{E_2}-\frac{1}{G}\right)\frac{\sin^2 2\varphi}{4}-\frac{\nu_1}{E_1};$$

$$a_{66}=\left(\frac{1+\nu_1}{E_1}+\frac{1+\nu_2}{E_2}-\frac{1}{G}\right)\sin^2 2\varphi+\frac{1}{G};$$

$$a_{16}=\left[\frac{\sin^2\varphi}{E_2}-\frac{\cos^2\varphi}{E_1}+\frac{1}{2}\left(\frac{1}{G}-\frac{2\nu_1}{E_1}\right)\cos 2\varphi\right]\sin 2\varphi;$$

$$a_{26}=\frac{\cos^2\varphi}{E_2}-\frac{\sin^2\varphi}{E_1}-\frac{1}{2}\left(\frac{1}{G}-\frac{2\nu_2}{E_2}\right)\cos 2\varphi\sin 2\varphi$$

.

Вводим безразмерные координаты ξ = x / l и η = y / b_1 и приведем уравнения (10) к безразмерной форме:

$$\left.\begin{aligned}&\overline{L}_{11}\overline{u}_1+\overline{L}_{12}\overline{u}_2+\overline{L}_{13}\overline{w}=0;\\&\overline{L}_{21}\overline{u}_1+\overline{L}_{22}\overline{u}_2+\overline{L}_{23}\overline{w}=-\frac{pl^2}{h_0c_{22}};\\&\overline{L}_{31}\overline{u}_1+\overline{L}_{32}\overline{u}_2+\overline{L}_{33}\overline{w}=\frac{ql^4}{D_{22}h},\end{aligned}\right\} \qquad (12)$$

где $\overline{u}_1=u_1/h_0;\ \overline{u}_2=u_2/h_0;\ \overline{w}=w/h_0$ – безразмерные функции перемещений, а h_0 – максимальная толщина оболочки.

Поскольку толщина оболочки h = h (ξ), то величины C_{ik} и D_{ik} (11) будут дифференцироваться только по координате ξ. С учетом этого безразмерные операторы $\overline{L}_{ik}$ в уравнениях (12) примут вид:

$$\overline{L}_{11}=\left[b_1\frac{\partial^2}{\partial\xi^2}+2m^2b_2\frac{\partial^2}{\partial\xi\partial\eta}+m^2b_3\frac{\partial^2}{\partial\eta^2}+mb_2f_1\frac{\partial}{\partial\eta}+b_1f_1\frac{\partial}{\partial\xi}\right];$$

$$\overline{L}_{12}=\left[b_4\frac{\partial^2}{\partial\xi^2}+(b_1+b_5)m\frac{\partial^2}{\partial\xi\partial\eta}+b_1m^2\frac{\partial^2}{\partial\eta^2}+\right.$$

$$\left.+mb_1f_1\frac{\partial}{\partial\eta}+b_4f_1\frac{\partial}{\partial\xi}\right];$$

$$\overline{L}_{13}=\frac{l}{R}\left[b_4\frac{\partial}{\partial\xi}+mb_5\frac{\partial}{\partial\eta}+b_4f_1\right];$$

$$\overline{L}_{21}=\left[b_4\frac{\partial^2}{\partial\xi^2}+(b_1+b_5)m\frac{\partial^2}{\partial\xi\partial\eta}+\right.$$

$$\left.+m^2b_2\frac{\partial^2}{\partial\eta^2}+mb_5f_1\frac{\partial}{\partial\eta}+b_4f_1\frac{\partial}{\partial\xi}\right];$$

$$\overline{L}_{22}=\left[\frac{\partial^2}{\partial\xi^2}+2mb_4\frac{\partial^2}{\partial\xi\partial\eta}+m^2b_1\frac{\partial^2}{\partial\eta^2}+\right.$$

$$\left.+mb_4f_1\frac{\partial}{\partial\eta}+f_1\frac{\partial}{\partial\xi}\right];$$

$$\overline{L}_{23}=\frac{l}{R}\left[\frac{\partial}{\partial\xi}+b_4m\frac{\partial}{\partial\eta}+f_1\right];$$

$$\overline{L}_{31}=12\frac{l^3}{Rh_0^2}f_4\left[b_4\frac{\partial}{\partial\xi}+mb_5\frac{\partial}{\partial\eta}\right];$$

$$\overline{L}_{32}=12\frac{l^3}{Rh_0^2}f_4\left[b_4\frac{\partial}{\partial\xi}+m\frac{\partial}{\partial\eta}\right];$$

$$\overline{L}_{33}=\frac{\partial^4}{\partial\xi^4}+4mb_4\frac{\partial^4}{\partial\eta\partial\xi^3}+$$

$$+2m^2(b_5+2b_1)\frac{\partial^4}{\partial\eta^2\partial\xi^2}+4b_2m^3\frac{\partial^4}{\partial\eta^3\partial\xi}-$$

$$-b_3m^4\frac{\partial^4}{\partial\eta^4}+2b_2m^3f_2\frac{\partial^3}{\partial\eta^3}+$$

$$+2m^2(b_5+2b_1)f_2\frac{\partial^3}{\partial\eta^2\partial\xi}+6b_1mf_2\frac{\partial^3}{\partial\eta\partial\xi^2}+$$

$$+2f_2\frac{\partial^3}{\partial\xi^3}+b_5m^2f_2\frac{\partial^2}{\partial\eta^2}+2b_4mf_3\frac{\partial^2}{\partial\xi\partial\eta}+$$
$$+f_3\frac{\partial^2}{\partial\xi^2}+\frac{pl^3}{D_{22}}\frac{\partial}{\partial\xi}+\frac{c_{22}l^4}{D_{22}R^2}. \qquad (13)$$

В выражениях (13) безразмерные жесткостные параметры оболочки b_i (i = 1, …, 5) имеют вид:

$$b_1=\frac{B_{66}}{B_{22}};\ b_2=\frac{B_{16}}{B_{22}};\ b_3=\frac{B_{11}}{B_{22}};\quad b_4=\frac{B_{26}}{B_{22}};$$
$$b_5=\frac{B_{12}}{B_{22}}.$$

Функции $f_i=f_i(\xi)(\mathrm{i}=1,2,3)$ зависят от способа задания профиля оболочки, поэтому рассмотрим закон изменения профиля оболочки. Изменение толщины оболочки, как правило, обычно задается таблично. Однако, при расчетах необходимо иметь закон изменения толщины в аналитическом виде. Следует заметить, что выбор удачного вида функциональной зависимости по данным таблицы зависит от многих факторов и каждый раз требует от исследователя тщательного анализа. Обычно функция изменения толщины профиля оболочки задается с помощью интерполяционных полиномов или рациональных дробей. Следует заметить, что рациональные дроби имеют существенные недостатки как аппарат приближения для функций с не слишком большой гладкостью. Основной недостаток применения рациональных дробей заключается в том, что их поведением в окрестности какой-либо точки определяется поведение в целом. Здесь для задания в аналитическом виде применяются сплайновые интерполяции, которые особенно эффективны при решении краевых задач для эллиптических уравнений в частных производных с гладкими коэффициентами [6]. При этом для интерполяции функции изменения толщины профиля используется интерполяция сплайном – многочленом n-й степени:

$$s(\xi)=\sum_{k=0}^{n}a_{ik}\xi^k,\qquad \xi_{\mathrm{i}-1}\le\xi\le\xi_i,$$

коэффициенты которого кусочно постоянны и который в узлах интерполяции принимает заданные значения и непрерывен вместе со своими n-1 производными. При нечетной степени многочлена n = 2r-1 сплайновая интерполяция эквивалентна лагранжевой интерполяции при дополнительном условии:

$$\int_0^1\left[s^r(\xi)\right]^2d\xi=\min.$$

В дальнейшем принимая n = 3, функцию изменения толщины профиля представим в виде:

$$h(\xi)=h_0\left[a_i+b_i(\xi-\xi_{i-1})+c_i(\xi-\xi_{i-1})^2+d_i(\xi-\xi_{i-1})^3\right], \qquad (14)$$

где коэффициенты сплайн-многочлена на каждом интервале определяются из условий в узлах, при этом для определения 4m (m – количество точек разбиения профиля) неизвестных коэффициентов используется метод исключения Гаусса. После задания функции изменения толщины оболочки в виде (14) функции f_i определяются следующим образом:

$$f_1=\frac{\left[b_i+2c_i(\xi-\xi_{i-1})+3d_i(\xi-\xi_{i-1})^2\right]}{[a_i+b_i(\xi-\xi_{i-1})+c_i(\xi-\xi_{i-1})^2+d_i(\xi-\xi_{i-1})^3]};$$
$$f_2=3f_1;$$
$$f_3=\frac{6\left\{\left[b_i+2c_i(\xi-\xi_{i-1})+3d_i(\xi-\xi_{i-1})^2\right]+\left[c_i+3d_i(\xi-\xi_{i-1})\right]\right\}}{[a_i+b_i(\xi-\xi_{i-1})+c_i(\xi-\xi_{i-1})^2+d_i(\xi-\xi_{i-1})^3]}.$$

Рассмотрим конкретную задачу. Граничные условия по косым краям оболочки (рис.1) $\eta_1=k_1m\xi+1$ и $\eta_2=\alpha(k_1m\xi+1)$ соответствуют жесткому защемлению:

$$\overline{w}=\overline{w}_{,n}=\overline{u}_1=\overline{u}_2=0. \qquad (15)$$

Граничные условия на параллельных краях оболочки соответствуют свободному краю, т.е.:

$$T_{22}=0;\qquad T_{12}+R^{-1}M_{12}=0;$$
$$N_{22}+M_{12,2}=0;\quad M_{22}=0. \qquad (16)$$

Учитывая выражения (5)-(7) условия (16) представим в функциях перемещений:

$$b_4\frac{\partial\overline{u}_1}{\partial\xi}+mb_5\frac{\partial\overline{u}_1}{\partial\eta}+\frac{\partial\overline{u}_2}{\partial\xi}+mb_4\frac{\partial\overline{u}_2}{\partial\eta}+\frac{l}{R}\overline{w}=0;$$
$$6\frac{b_1l^2f_4}{h_0^2}\frac{\partial\overline{u}_1}{\partial\xi}+6\frac{mb_2l^2f_4}{h_0^2}\frac{\partial\overline{u}_1}{\partial\eta}+6\frac{mb_1l^2f_4}{h_0^2}\frac{\partial\overline{u}_2}{\partial\eta}+$$
$$+6\frac{mb_4l^2f_4}{h_0^2}\frac{\partial\overline{u}_2}{\partial\xi}-\frac{b_4l}{R}\frac{\partial^2\overline{w}}{\partial\xi^2}-mb_1\frac{l}{R}\frac{\partial^2\overline{w}}{\partial\xi\partial\eta}-$$
$$-\frac{m^2b_2l}{R}\frac{\partial^2\overline{w}}{\partial\eta^2}+6\frac{b_4l^3f_4}{Rh_0^2}\overline{w}=0;$$

$$(1+b_4)\frac{\partial^3\overline{w}}{\partial\xi^3}+(2b_1+3b_4)m\frac{\partial^3\overline{w}}{\partial\eta\partial\xi^2}+$$

$$+(2b_1+b_2+b_5)m^2\frac{\partial^3\overline{w}}{\partial\eta^2\partial\xi}+b_2m^3\frac{\partial^3\overline{w}}{\partial\eta^3}+$$

$$+b_4f_2\frac{\partial^2\overline{w}}{\partial\xi^2}+2mb_1f_2\frac{\partial^2\overline{w}}{\partial\xi\partial\eta}+m^2b_2f_2\frac{\partial^2\overline{w}}{\partial\eta^2}=0;$$

$$\frac{\partial^2\overline{w}}{\partial\xi^2}+2mb_4\frac{\partial^2\overline{w}}{\partial\xi\partial\eta}+m^2b_5\frac{\partial^2\overline{w}}{\partial\eta^2}=0. \qquad (17)$$

Здесь

$$f_4=\frac{1}{[a_i+b_i(\xi-\xi_{i-1})+c_i(\xi-\xi_{i-1})^2+d_i(\xi-\xi_{i-1})^3]^2};$$

К решению краевой задачи, описываемой уравнениями (12) и граничными условиями (15), (17) применим метод интегральных соотношений.

В соответствии с методом представим систему (12) в дивергентной форме:

$$\frac{\partial\overline{X}}{\partial\xi}+\frac{\partial\overline{Y}}{\partial\eta}+\overline{L}=0; \qquad (18)$$

$$\overline{X}=\{X_i\}=\{\overline{u}_1,\overline{u}_2,\overline{w},z_1,z_2,z_3,z_4,z_5\};$$

$$\overline{Y}=B_0\overline{X}+B_1\frac{\partial\overline{X}}{\partial\eta}+B_2\frac{\partial^2\overline{X}}{\partial\eta^2}+B_3\frac{\partial^3\overline{X}}{\partial\eta^3};$$

$$\overline{L}=B\overline{X}+\overline{b}.$$

Через $z_1,...,z_5$ обозначены

$z_1=\overline{u}_{1,1}$; $z_2=\overline{u}_{2,1}$; $z_3=\overline{w}_{,1}$;

$z_4=\overline{w}_{,11}$; $z_5=\overline{w}_{,111}$.

Элементы матриц $B_r=\{b_{mn,r}\}$ и $B=\{b_{mn}\}$ (r = 0, 1, 2, 3; m = 1, 2, …, 8) принимают значения:

$$b_{14}^1=\frac{m^2(b_2b_4-b_3)}{b_4^2-b_1};\quad b_{14}^0=\frac{mf_1(b_4b_5-b_2)}{b_4^2-b_1};$$

$$b_{15}^1=\frac{m^2(b_3b_4-b_1b_2)}{b_4^2-b_1};\quad b_{15}^0=\frac{mf_1(b_2b_4-b_1b_5)}{b_4^2-b_1};$$

$$b_{18}^0=12\frac{b_5f_4ml^3}{Rh_0^2};\qquad b_{24}^1=\frac{b_1m^2(b_4-1)}{b_4^2-b_1};$$

$$b_{24}^0=mf_1;\quad b_{25}^1=\frac{b_1m^2(b_4-b_1)}{b_4^2-b_1};$$

$$b_{28}^0=12\frac{ml^3f_4}{Rh_0^2};\qquad b_{34}^0=\frac{ml(b_4^2-b_5)}{R(b_4^2-b_1)};$$

$$b_{35}^0=\frac{mlb_4(b_5-b_1)}{R(b_4^2-b_1)};\qquad b_{35}=\frac{lf_1}{R};$$

$$b_{38}^3=m^4b_3;\qquad b_{38}^2=2m^3b_2f_2;$$

$$b_{38}^1=m^2b_5f_3;\qquad b_{38}=12\frac{l^4}{R^2h^2};$$

$$b_{41}=-1;\qquad b_{44}^0=\frac{m(b_1b_4+b_4b_5-2b_2)}{b_4^2-b_1};$$

$$b_{44}=f_1;\qquad b_{48}=12\frac{b_4f_4l^3}{Rh_0^2};$$

$$b_{45}^0=\frac{m(2b_2b_4-b_1^2-b_1b_5)}{b_4^2-b_1};\qquad b_{52}=-1;$$

$$b_{55}^0=\frac{mb_4(b_5-b_1)}{b_4^2-b_1};\qquad b_{54}^0=\frac{m(2b_4^2-b_1-b_5)}{b_4^2-b_1};$$

$$b_{55}=f_1;\qquad b_{58}=12\frac{b_4f_4l^3}{Rh_0^2};\qquad b_{63}=-1;$$

$$b_{65}=\frac{l}{R};\qquad b_{68}^2=4b_2m^3;$$

$$b_{68}^1=2m^2f_2(b_5+2b_1);\qquad b_{68}^0=2mb_4f_3;$$

$$b_{68}=12\frac{pl^3}{B_{22}h^3};\qquad b_{76}=-1;$$

$$b_{78}^0=6mb_1f_2;\qquad b_{78}^1=2m^2(b_5+2b_1);$$

$$b_{78}=f_3;$$

$$b_{87}=-1;\quad b_{88}^0=4mb_4;\quad b_{88}=2f_2.$$

Остальные элементы равны нулю. Компоненты вектора $\overline{b}$ равны:

$$b_4=\frac{pb_4l^2}{(b_4^2-b_1)h_0(B_{22}h)};$$

$$b_5=-\frac{pb_1l^2}{(b_4^2-b_1)h_0(B_{22}h)};$$

$$b_8=-12\frac{ql^4}{h_0(B_{22}h^3)};$$

$$b_1=b_2=b_3=b_6=b_7=0.$$

Следуя методу интегральных соотношений ищем решение системы уравнений (18) в виде разложения:

$$X_i(\xi,\eta)=\begin{cases}\sum\limits_{j=1}^{n} X_{ij}(\xi)P_j(\xi,\eta) & (\mathrm{i}=3,6,7,8);\\ \sum\limits_{\mathrm{j}=1}^{\mathrm{n}} \mathrm{X_{ij}}(\xi)P_{j,2}(\xi,\eta) & (\mathrm{i}=1,2);\\ \sum\limits_{j=1}^{n} X_{ij}(\xi)P_{j,22}(\xi,\eta) & (\mathrm{i}=4,5).\end{cases}$$

(19)

Здесь ортогональные полиномы $P_j(\xi,\eta)$, удовлетворяющие граничным условиям и требованиям главы II, как и ранее, приняты в виде:

$$P_j(\xi,\eta)=\sum_{j=1}^{n} P_1(\xi,\eta)\left[\eta-\frac{(1+\alpha)r}{2}\right]^{j-1};$$

$$P_1(\xi,\eta)=\eta^4-2(1+\alpha)r\eta^3+\left(1+4\alpha+\alpha^2\right)r^2\eta^2-$$
$$-2\alpha(1+\alpha)r^3\eta+\alpha^2r^4;$$
$$r=1+k_1m\xi. \qquad (20)$$

Выбираем в качестве весовых функций также полиномы $P_j(\xi,\eta)$ и их первые производные:

$$P_j(\xi,\eta)=\begin{cases}\sum\limits_{j=1}^{n} P_j(\xi,\eta); & (\mathrm{i}=3,6,7,8)\\ \sum\limits_{j=1}^{n} P_{j,2}(\xi,\eta). & (\mathrm{i}=1,2,4,5)\end{cases}$$

(21)

Применяя затем процедуру метода интегральных соотношений к исходной системе уравнений (18), получим систему обыкновенных дифференциальных уравнений порядка 8n с переменными коэффициентами неэйлеровского типа:

$$X_{1,1}=-\frac{9}{2}\frac{km}{r}X_1+\frac{km(1+\alpha)}{4}X_2+X_7;$$

$$X_{2,1}=-11\frac{km(1+\alpha)}{r^2(1-\alpha)^2}X_1-\frac{11}{2}\frac{km}{r}X_2+X_8;$$

$$X_{3,1}=-\frac{9}{2}\frac{km}{r}X_3+\frac{km(1+\alpha)}{4}X_4+X_9;$$

$$X_{4,1}=-11\frac{km(1+\alpha)}{r^2(1-\alpha)^2}X_3-\frac{11}{2}\frac{km}{r}X_4+X_{10};$$

$$X_{5,1}=-\frac{9}{2}\frac{km}{r}X_5+\frac{km(1+\alpha)}{4}X_6+X_{11};$$

$$X_{6,1}=-11\frac{km(1+\alpha)}{r^2(1-\alpha)^2}X_5-\frac{11}{2}\frac{km}{r}X_6+X_{12};$$

$$X_{7,1}=12\frac{m^2(b_2b_4-b_3)}{r^2(1-\alpha)^2\left(b_4^2-b_1\right)}X_1-$$
$$-\frac{mf_1(b_4b_5-b_2)}{2\left(b_4^2-b_1\right)}X_2+12\frac{m^2b_1(b_4-1)}{r^2(1-\alpha)^2\left(b_4^2-b_1\right)}X_3-$$
$$-\frac{mf_1}{2}X_4-\frac{ml\left(b_4^2-b_5\right)}{2R\left(b_4^2-b_1\right)}X_6-\left(\frac{9}{2}\frac{km}{r}+f_1\right)X_7+$$
$$+\left[\frac{km(1+\alpha)}{4}-\frac{m(b_1b_4+b_4b_5-2b_2)}{2\left(b_4^2-b_1\right)}\right]X_8-$$
$$-\frac{m\left(b_4^2-b_5\right)}{b_4^2-b_1}X_9-\frac{m\left(2b_4^2-b_1-b_5\right)}{2\left(b_4^2-b_1\right)}X_{10}+$$
$$+\frac{21pb_4l^2}{r^4(1-\alpha)^4\left(b_4^2-b_1\right)h_0(B_{22}h)};$$

$$X_{8,1}=22\frac{mf_1(b_4b_5-b_2)}{r^2(1-\alpha)^2\left(b_4^2-b_1\right)}X_1+$$
$$+44\frac{m^2(b_2b_4-b_3)}{r^2(1-\alpha)^2\left(b_4^2-b_1\right)}X_2+12\frac{m^2b_1(b_4-b_1)}{r^2(1-\alpha)^2\left(b_4^2-b_1\right)}X_3-$$
$$-\frac{m^2\left(b_2b_4-b_1^2\right)}{b_4^2-b_1}X_4-\frac{lf_1}{R}X_5-\frac{mlb_4(b_5-b_1)}{2R\left(b_4^2-b_1\right)}X_6-$$
$$-\frac{m\left(2b_2b_4-b_1^2-b_1b_5\right)}{2\left(b_4^2-b_1\right)}X_8-\left(\frac{9}{2}\frac{km}{r}+f_1\right)X_9+$$
$$+\frac{m}{2}\left[\frac{k(1+\alpha)}{2}-\frac{b_4(b_5-b_1)}{b_4^2-b_1}\right]X_{10}+$$
$$+\frac{l}{R}X_{11}+\frac{21pb_1l^2}{r^4(1-\alpha)^4h_0\left(b_4^2-b_1\right)(B_{22}h)};$$

$$X_{10,1}=22\frac{m(b_2b_4f_1-b_1b_5f_1-mb_1b_2)}{r^2(1-\alpha)^2\left(b_4^2-b_1\right)}X_1+$$
$$+44\frac{m^2(b_3b_4-b_1b_2)}{r^2(1-\alpha)^2\left(b_4^2-b_1\right)}X_2+44\frac{m^2b_1(b_4-b_1)}{r^2(1-\alpha)^2\left(b_4^2-b_1\right)}X_4+$$
$$+22\frac{mlb_4(b_5-b_1)}{r^2(1-\alpha)^2R\left(b_4^2-b_1\right)}X_5-\frac{lf_1}{R}X_6+$$
$$+22\frac{m\left(2b_2b_4-b_1^2-b_1b_5\right)}{r^2(1-\alpha)^2\left(b_4^2-b_1\right)}X_7+$$
$$+11\frac{m}{r^2(1-\alpha)^2}\left[2\frac{b_4(b_5-b_1)}{b_4^2-b_1}-k(1+\alpha)\right]X_9-$$
$$-\left[\frac{11}{2}\frac{km}{r}+f_1\right]X_{10}-\frac{l}{R}X_{12}=0;$$

$$X_{11,1}=-\frac{9}{2}\frac{km}{r}X_{11}+\frac{km(1+\alpha)}{4}X_{12}+X_{13};$$

$$X_{12,1}=-11\frac{km(1+\alpha)}{r^2(1-\alpha)^2}X_{11}-\frac{11}{2}\frac{km}{r}X_{12}+X_{14};$$

$$X_{13,1}=-\frac{9}{2}\frac{km}{r}X_{13}+\frac{km(1+\alpha)}{4}X_{14}+X_{15};$$

$$X_{14,1}=-1\frac{km(1+\alpha)}{r^2(1-\alpha)^2}X_{13}-\frac{11}{2}\frac{km}{r}X_{14}+X_{16};$$

$$X_{15,1}=-6\frac{ml^3b_5f_4}{Rh_0^2}X_2-6\frac{ml^3f_4}{Rh_0^2}X_4+$$
$$+12\left[\frac{m^2b_5f_3}{r^2(1-\alpha)^2}-42\frac{m^4b_3}{r^4(1-\alpha)^4}-\frac{l^4}{R^2h_0^2}\right]X_5+$$
$$+36\frac{m^3b_2f_2}{r^2(1-\alpha)^2}X_6-12\frac{l^3b_4f_4}{Rh_0^2}X_7-$$
$$-12\frac{l^3b_4f_4}{Rh_0^2}X_9+12\left[4\frac{m^3b_2}{r^2(1-\alpha)^2}+\right.$$
$$\left.+2\frac{m^2(b_5f_2+2b_1f_2)}{r^2(1-\alpha)^2}-\frac{pl^3}{B_{22}h^3}\right]X_{11}-$$
$$-mb_4f_3X_{12}+\left[24\frac{m^2(b_5+2b_1)}{r^2(1-\alpha)^2}-f_3\right]X_{13}-$$
$$-3mb_1f_2X_{14}-\left[\frac{9}{2}\frac{km}{r}+2f_2\right]X_{15}+$$
$$+\left[\frac{km(1+\alpha)}{4}-2mb_4\right]X_{16}+252\frac{ql^4}{r^4(1-\alpha)^4h_0B_{22}h^3};$$

$$X_{16,1}=264\frac{ml^3b_5f_4}{(1-\alpha)^2r^2Rh_0^1}X_1+$$
$$+264\frac{ml^3f_4}{(1-\alpha)^2r^2Rh_0^2}X_3-792\frac{m^3b_2f_2}{r^2(1-\alpha)^2}X_5+$$
$$+\left[44\frac{m^2b_5f_3}{r^2(1-\alpha)^2}-3960\frac{m^4b_3}{r^2(1-\alpha)^2}-12\frac{l^4}{R^2h_0^2}\right]X_6-$$
$$-12\frac{l^3b_4f_4}{Rh_0^2}X_8-12\frac{l^3b_4f_4}{Rh_0^2}X_{10}+$$
$$+44\frac{mb_4f_3}{r^2(1-\alpha)^2}X_{11}+$$
$$+\left[176\frac{m^3b_2}{r^2(1-\alpha)^2}+88\frac{m^2(b_5f_2+2b_1f_2)}{r^2(1-\alpha)^2}-\right.$$
$$\left.-12\frac{pl^3}{B_{22}h}\right]X_{12}+132\frac{mb_1f_2}{r^2(1-\alpha)^2}X_{13}+$$
$$+\left[88\frac{m^2(b_5+2b_1)}{r^2(1-\alpha)^2}-f_3\right]X_{14}+$$
$$+11\frac{m}{r^2(1-\alpha)^2}[8b_4-k(1+\alpha)]X_{15}-$$
$$-\left[\frac{11}{2}\frac{km}{r}+2f_2\right]X_{16}; \qquad (22)$$

В соответствии с методом интегральных соотношений запишем граничные условия по параллельным сторонам оболочки для определения констант интегрирования c_μ:

$$22\frac{mb_5}{r^2(1-\alpha)^2}X_1+22\frac{mb_4}{r^2(1-\alpha)^2}X_3-$$
$$-\frac{l}{R}X_6-b_4X_8-X_{10}=0;$$
$$mb_5X_2+mb_4X_4+2\frac{l}{R}X_5+2b_4X_7+2X_9=0;$$
$$6mb_2\frac{l^2f_4}{h_0^2}X_2+6mb_1\frac{l^2f_4}{h_0^2}X_4+$$
$$+\left[12b_4f_4\frac{l^3}{Rh_0^2}+24\frac{m^2b_2l}{r^2(1-\alpha)^2R}\right]X_5+$$
$$+12\frac{b_1l^2f_4}{h_0^2}X_7+12\frac{b_4l^2f_4}{h_0^2}X_9-\frac{mb_1l}{R}X_{12}-$$
$$-2\frac{b_4l}{R}X_{13}=0;$$
$$132\frac{mb_2l^2f_4}{r^2(1-\alpha)^2h_0^2}X_1+132\frac{mb_1l^2f_4}{r^2(1-\alpha)^2h_0^2}X_3-$$
$$-6\frac{b_4l^2f_4}{h_0}X_{10}-22\frac{mb_1l}{r^2(1-\alpha)^2R}X_{11}+$$
$$+\frac{b_4l}{R}X_{14}=0;$$
$$12\frac{m^2b_2f_2}{r^2(1-\alpha)^2}X_5+18\frac{m^3b_2}{r^2(1-\alpha)^2}X_6+$$
$$+12\frac{m}{r^2(1-\alpha)^2}(b_5+2b_1+b_2)X_{11}-$$
$$-mb_1f_2X_{12}-b_4f_2X_{13}-m\left(b_1+\frac{3}{2}b_4\right)X_{14}-$$
$$-(1+b_4)X_{15}=0;$$
$$12\frac{m^2b_5}{r^2(1-\alpha)^2}X_5-mb_4X_{12}-X_{13}=0;$$
$$44\frac{m^2b_5}{r^2(1-\alpha)^2}X_6+44\frac{mb_4}{r^2(1-\alpha)^2}X_{11}-X_{14}=0;$$
$$792\frac{b_2m^3}{r^4(1-\alpha)^4}X_5-44\frac{m^2b_2f_2}{r^2(1-\alpha)^2}X_6-$$
$$-44\frac{mb_1f_2}{r^2(1-\alpha)^2}X_{11}-44\frac{m^2}{r^2(1-\alpha)^2}\times$$
$$\times(b_5+2b_1+b_2)X_{12}-22\frac{m}{r^2(1-\alpha)^2}(3b_4+2b_1)X_{13}+$$
$$+b_4f_2X_{14}+(1+b_4)X_{16}=0; \qquad (23)$$

В дальнейшем к решению системы обыкновенных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами (22) применяется модифицированный метод последовательных приближений в смещенных полиномах Чебышева [1-3]. Постоянные интегрирования C_μ, входящие в общее решение системы обыкновенных дифференциальных уравнений, определяются из граничных условий (23).

Запишем выражения для напряжений:

$$\overline{\sigma}_\xi = \frac{\sigma_x l^2 h_0}{D_{22}} =$$

$$= 12\frac{f_4 l}{h}\left[mb_5\frac{\partial\overline{u}_1}{\partial\eta} + b_4\frac{\partial\overline{u}_1}{\partial\xi} + mb_4\frac{\partial\overline{u}_2}{\partial\eta} + \frac{\partial\overline{u}_2}{\partial\xi} + \frac{l}{R}\overline{w}\right] -$$

$$- 6f_4\left[\frac{\partial^2\overline{w}}{\partial\xi^2} + 2mb_4\frac{\partial^2\overline{w}}{\partial\xi\partial\eta} + m^2 b_5\frac{\partial^2\overline{w}}{\partial\eta^2}\right];$$

$$\overline{\sigma}_\eta = \frac{\sigma_y l^2 h_0}{D_{22}} =$$

$$= 12\frac{f_4 l}{h}\left[mb_3\frac{\partial\overline{u}_1}{\partial\eta} + b_2\frac{\partial\overline{u}_1}{\partial\xi} + mb_2\frac{\partial\overline{u}_2}{\partial\eta} + b_5\frac{\partial\overline{u}_2}{\partial\xi} + \frac{b_5 l}{R}\overline{w}\right] -$$

$$- 6f_4\left[m^2 b_3\frac{\partial^2\overline{w}}{\partial\eta^2} + 2mb_2\frac{\partial^2\overline{w}}{\partial\xi\partial\eta} + b_5\frac{\partial^2\overline{w}}{\partial\xi^2}\right];$$

$$\overline{\sigma}_{\xi\eta} = \frac{\sigma_{xy} l^2 h_0}{D_{22}} =$$

$$= 12\frac{f_4 l}{h}\left[mb_2\frac{\partial\overline{u}_1}{\partial\eta} + b_1\frac{\partial\overline{u}_1}{\partial\xi} + mb_1\frac{\partial\overline{u}_2}{\partial\eta} + b_4\frac{\partial\overline{u}_2}{\partial\xi} + \frac{b_4 l}{R}\overline{w}\right] -$$

$$- 6f_4\left[2mb_1\frac{\partial^2\overline{w}}{\partial\xi\partial\eta} + m^2 b_2\frac{\partial^2\overline{w}}{\partial\eta^2} + b_4\frac{\partial^2\overline{w}}{\partial\xi^2}\right]; \qquad (24)$$

Пример расчета. В качестве примера изложенного алгоритма исследуем влияние ортотропии на напряженно-деформированное состояние цилиндрической панели переменной жесткости, подверженной действию равномерно распределенной нагрузки (рис.1). Панель по контуру жестко защемлена, при этом граничные условия имеют вид:

$$\overline{w} = \overline{w}_{,n} = \overline{u}_1 = \overline{u}_2 = 0\big|_{на\ s}.$$

Геометрические и физико-механические характеристики панели следующие:

$l = b_1 = 14$ см; $\gamma_1 = 10^\circ$; $\alpha = 0$; $h_0 = 0{,}2$ см;

$E_\xi = 8{,}1\times10^5$ кгс/см²; $E_\eta = 2{,}2\times10^5$ кгс/см²;

$G = 0{,}98\times10^5$ кгс/см²; $\nu_\xi = 0{,}37$; $\nu_\eta = 0{,}1$.

Таблица 1. *Значения безразмерных прогибов и моментов M_η для цилиндрической панели в сечении $\xi = 0{,}5$.*

η	$\overline{w} = w/h_0$		m_1	
	1	2	1	2
0	0	0	-104	-183,2
0,2	0,003	0,007	-36,4	-56,2
0,4	0,012	0,032	25,4	43,4
0,6	0,021	0,054	63,4	104,2
0,8	0,019	0,051	52,6	82,4
1,0	0,005	0,11	-22,2	-41,6
1,13	0	0	-148,4	-240,8

В таблице 1 приводятся значения безразмерных прогибов и моментов $M_\eta = m_1 ql^2$ в среднем сечении панели ($\xi = 0{,}5$), а в таблице 3.2 приводятся значения безразмерных моментов $M_\xi = m_2 ql^2$ в среднем сечении $\eta_3 = \frac{1+\alpha}{2}r$ цилиндрической панели. Значения, стоящие в столбце 1, соответствуют цилиндрической ортотропной панели, а в столбце 2 – изотропной панели. Значения для изотропной панели получены на основе решения уравнений (12), в которых операторы $\overline{L}_{ik}$ примут вид выражений (27), при этом для изотропной панели $E_\xi = E_\eta = 2{,}2\times10^5$ кгс/см².

Таблица 2. *Значения безразмерных моментов M_ξ для цилиндрической панели в сечении η_3.*

ξ	m_2		ξ	m_2	
	1	2		1	2
0	-268	-292	0,6	164	176
0,2	-42	-50	0,8	70	76
0,4	124	130	1,0	-252	-284

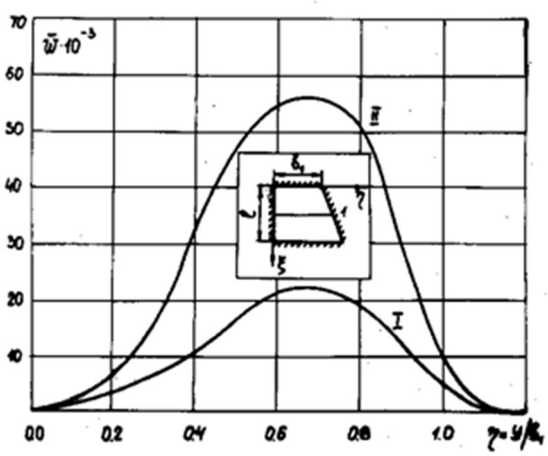


Рис.2. Эпюры распределения прогибов в трапециевидной панели: I – анизотропная панель; II – изотропная панель.

На рис. 2 показаны эпюры распределения безразмерных прогибов в сечении панели $\xi = 0{,}5$ (для анизотропной панели – кривая I и изотропной – кривая II). Эпюры безразмерных моментов M_η показаны на рис.3.

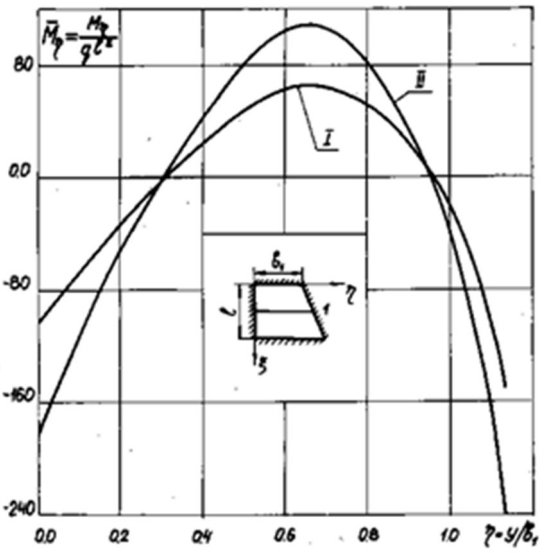


Рис.3. Эпюры безразмерных моментов $\overline{M}_\eta$ в сечении $\xi = 0{,}5$ трапециевидной панели: I – анизотропная панель; II – изотропная панель.

Как следует из анализа результатов расчетов величина максимальных прогибов вследствие ортотропии уменьшается в 2,5 раза, а величина максимального изгибающего момента M_η уменьшается в 1,7 раза, величина же изгибающего момента M_ξ изменяется незначительно. Таким образом, ортотропия существенным образом сказывается на напряженно-деформированном состоянии панели в направлении оси η и незначительным образом в направлении оси ξ.

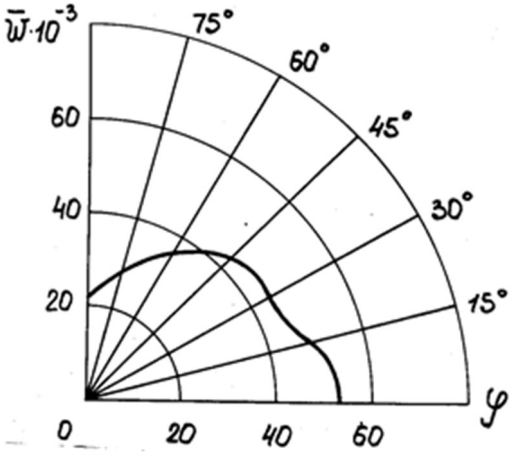


Рис. 4. Зависимость прогиба трапециевидной панели $\overline{w}$ от параметра φ

Исследовалось также влияние анизотропии, возникающей вследствие несовпадения главных осей упругости ортотропного материала с расчетными осями трапециевидной панели на величины прогибов и силовых факторов. На рис. 4 приведена зависимость безразмерных прогибов в среднем сечении панели ($\xi = 0{,}5$) при $\eta = 0{,}6$ от параметра φ. Как следует из графика, величины прогибов существенно зависят от этого параметра.

Следовательно, учет анизотропии, возникающей вследствие несовпадения главных осей упругости ортотропного материала с расчетными осями цилиндрических панелей, является обязательным.

Заключение

Предложены математическая модель и алгоритм расчета напряженно-деформированного состояния конструкционных элементов промышленных объектов, в том числе в ядерной энергетике, представляющих собой трапециевидные оболочки. Рассматривается анизотропия материала, при этом расчет изотропной оболочки следует как частный случай.

Приведена полная система исходных дифференциальных уравнений в частных производных. К решению полученной системы уравнений применяется процедура метода интегральных соотношений Дородницына.

Интегрирование краевой задачи в дальнейшем осуществляется модифицированным методом последовательных приближений, разработанного проф. В.А.Пухлий и изложенного им в академической печати.

Изложенный подход к решению краевых задач теории оболочек апробирован на решении ряда прикладных задач математической физики. Он изложен в трудах 12-го Всероссийского съезда по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики [12], а также на 25-м Международном Конгрессе по теоретической и прикладной механики (ISTEM-2020) в Милане (Италия), 2020.

Список литературы

1. Пухлий В.А. Метод аналитического решения двумерных краевых задач для систем эллиптических уравнений / Пухлий В.А. // Журн. вычислит. матем. и матем. физики, 1978, том 18, №5, с.1275-1282.
2. Пухлий В.А. Об одном подходе к решению краевых задач математической физики / Пухлий В.А. // Дифференциальные уравнения, 1979, том 15, №11, с.2039-2043.
3. Пухлий В.А. Решение начально-краевых задач математической физики модифицированным методом последовательных приближений / Пухлий В.А. // Обозрение прикладной и промышленной математики, 2017, том 24, вып. 1, с.37-48.
4. Амбарцумян С.А. Общая теория анизотропных оболочек / Амбарцумян С.А. // М.: Наука, 1974. – 446 с.
5. Диткин В.А. Операционное исчисление / Диткин В.А., Прудников А.П. // Высшая школа, 1966.
6. Алберг Дж. теория сплайнов и ее приложения / Алберг Дж., Нильсон Э., Уолш Дж. // Мир, 1972. – 318 с.
7. Дородницын А.А. Об одном методе численного решения некоторых нелинейных задач аэрогидродинамики / Дородницын А.А. // Труды 3-го Всес. матем. съезда, том III, Изд-во АН СССР, 1958, с.447-453.
8. Дородницын А.А. Об одном методе решения уравнений ламинарного пограничного слоя / Доородницын А.А. // ЖПМТФ, 1960, №3, с.111-118.
9. Ланцош К. Практические методы прикладного анализа / Ланцош К. // Физматгиз, 1961. – 524 с.
10. Luke Y.L. Mathematical function and their approximation / Luke Y.L. // New-York-London: Academic Proc. Inc., 1975. – 608 p.
11. Пухлий В.А. Аналитический метод решения краевых задач теории оболочек / Пухлий В.А. // Труды XIII Всес. конф. по теори пластин и оболочек, Часть V. Таллин, изд-во ТПИ, 1983, с.101-107.
12. Пухлий В.А. Термоупругость лопаток центробежных насосов ядерной энергетики при воздействии высокотемпературных и радиационных полей / Пухлий В.А. // Сб. трудов XII Всеросс. съезда по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. – Уфа, РАН, 19-24 августа 2019 г, том 3, с.1203-1205.
13. Pukhliy V.A. Thermoelasticity of working and nozzle blades of gas turbine engines and installations / Pukhliy V.A. // 25th International Congress of Theoretical and Applied mechanics (ISTAM-2020), Milan, Italy, 23-28 August, 2020

References

1. Pukhliy V.A. The method of analytical solution of two-dimensional boundary value problems for systems of elliptic equations / Pukhliy V.A. // Journal. will calculate. mate. and mate. Physics, 1978, Volume 18, No. 5, pp. 1275-1282.
2. Pukhly V.A. About one approach to solving boundary value problems of mathematical physics / V. Pukhliy // Differential equations, 1979, volume 15, No. 11, pp. 2039-2043.
3. Pukhliy V.A. The solution of initial boundary-value problems of mathematical physics by the modified method of successive approximations / VA Pukhliy // Review of Applied and Industrial Mathematics, 2017, Volume 24, no. 1, p. 37-48.
4. Hambardzumyan S.A. General Theory of Anisotropic Shells / Hambardzumyan S.A. // M .: Nauka, 1974.- 446 p.
5. Ditkin V.A. Operational calculus / Ditkin V.A., Prudnikov A.P. // Higher school, 1966.
6. Alberg J. Theory of splines and its applications / Alberg J., Nilson E., Walsh J. // Mir, 1972.- 318 p.
7. Dorodnitsyn A.A. About a method for the numerical solution of some nonlinear problems of aerohydrodynamics / A. Dorodnitsyn // Proceedings of the 3rd All. mate. Congress, Volume III, Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR, 1958, p. 477-453.
8. Dorodnitsyn A.A. On a method for solving the equations of a laminar boundary layer / A. A. Dorodnitsyn // ZhPMTF, 1960, No. 3, p.111-118.
9. Lantsosh K. Practical methods of applied analysis / Lantsosh K. // Fizmatgiz, 1961. - 524 p.
10. Luke Y.L. Mathematical function and their approximation / Luke Y.L. // New-York-London: Academic Proc. Inc., 1975. – 608 p.
11. Pukhliy V.A. An analytical method for solving boundary value problems of the theory of shells / Pukhliy V.A. // Proceedings of the XIII All. conf. on the theory of plates and shells, Part V. Tallinn, TPI Publishing House, 1983, pp. 101-107.
12. Pukhliy V.A. Thermoelasticity of centrifugal pump blades of nuclear power under the influence of high-temperature and radiation fields / V. Pukhliy // Sat Proceedings of the XII All-Russian. Congress on the fundamental problems of theoretical and applied

mechanics. - Ufa, Russian Academy of Sciences, August 19-24, 2019, vol. 3, p. 1203-1205.
13. Pukhliy V.A. Thermoelasticity of working and nozzle blades of gas turbine engines and installations / Pukhliy V.A. // 25th International Congress of Theoretical and Applied mechanics (ISTAM-2020), Milan, Italy, 23-28 August, 2020.

УДК 535.317.2:534.647

Определение максимальных расстояний видеосъемки для фиксации смещений механических объектов оптическим способом, при использовании отражающих голографических тест-объектов

В.А. Нурзай[1], Ю.М. Быковский[2], Т.Е. Петула[3], Т.И. Белых[4]
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33, г. Севастополь, 299053, Россия [1]Mengsk777@yandex.ru, [2]Bym-for@mail.ru , [3]amelitte236@gmail.com, [4]fibi1303@icloud.com

Статья поступила 22.05.2020 г.; после доработки 25.05.2020 г.

Аннотация

В статье рассматривается квазибесконтактный оптический способ измерения частоты вибраций механических объектов, с применением голографических тест-объектов. Основной задачей работы является нахождение сочетания оптимальных параметров освещенности, величины тест-объектов, настройки видеокамеры, при расстояниях от объектива до перемещающегося объекта близких к максимально возможным для фиксации перемещений рассматриваемым способом.

Ключевые слова: видеосъемка, фиксация смещений, голографические тест-объекты, отражающие поверхности, яркость, параметры освещённости.

Determination of the maximum distance of video recording for measuring the displacements of mechanical objects in an optical way, using reflective holographic test objects

V.A. Nurzai[1], Yu.M. Bykovsky[2], T.E. Petula[3], T.I. Belykh[4]
Sevastopol state university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, [1]Mengsk777@yandex.ru, [2]Bym-for@mail.ru , [3]amelitte236@gmail.com, [4]fibi1303@icloud.com

Received 22.05.2020 y.; received in final form 25.05.2020 y.

Abstract

The article discusses a quasi-contactless optical method for measuring the vibration frequency of mechanical objects using holographic test objects. The main objective of the work is to find a combination of the optimal illumination parameters, the size of the test objects, the settings of the video camera, at distances from the lens to the moving object close to the maximum possible for measuring movements in the considered way.

Keywords: video recording, displacement fixation, holographic test objects, reflecting surfaces, brightness, illumination parameters.

Введение

На любом производстве присутствуют вредные и опасные вибрационные воздействия. Как можно более раннее определение изменений в их характере, изменений частоты или размаха является актуальной задачей [1, 2]. Существует множество методов и устройств, способных детектировать данные изменения и выдавать аварийные и предупреждающие сигналы [3]. Оптическая техника является одним из направлений развития виброизмерений. В последнее время оптические методы приобретают широкое распространение, как в лабораторных измерениях, так и в

реальном производственном процессе. К ним относятся безлазерные фотометрические и лазерные методы и приборы. Последние имеют ряд недостатков: относительно большая стоимость оборудования [4] и невысокие пределы измерения размаха колебаний [5]. Фотометрические методы анализируют параметры оптического сигнала отраженного света, такие как яркость или цветность.

Данная работа посвящена апробации применения бесконтактного оптического фотометрического метода, основанного на применении отражающих голографических пленок в качестве тест-объектов. В качестве эксперимента они размещались на платформе, способной к плоскопараллельному и угловому перемещению. Фиксация смещений производилась камерой технического зрения. Особенностью данного метода является ограничение при фиксации минимальных смещений, нарастающее при увеличении расстояния от датчика до исследуемой поверхности. Рассматривается отдельное угловое и плоскопараллельное перемещение платформы вдоль оптической оси камеры. Для исследования возможностей применения метода необходимо выяснить предельное расстояние между фиксирующей камерой и платформой, при котором фиксируются смещения.

Цели работы

- Определить оптимальные условия освещенности и экспозиции камеры при фиксации смещений
- Опытным путем подобрать оптимальные размеры тест-объектов для фиксации смещений, с учетом расстояния до объекта
- Выяснить максимальное расстояние, при котором возможна фиксация углового перемещения
- Определить максимальное расстояние, при котором возможна фиксация плоскопараллельного перемещения

Для достижения поставленных целей проведен эксперимент по определению максимально возможного расстояния от объектива камеры, с фиксированным фокусным расстоянием, до механического перемещающегося объекта.

Эксперимент

В качестве регистратора оптической информации использовалась камера Basler acA 1440-220uc. Производилась серия фотоснимков при максимальном разрешении 1440*1080 пикселей, по три - четыре кадра до и после перемещения платформы на различных расстояниях.

В качестве тест-объектов использовались различные фракции голографической пленки [6]

Для имитации углового перемещения, поворотная платформа, находящаяся на неподвижной опоре, имела размах углового смещения в 5.3°, при этом ее плоскость изначально выставлялась перпендикулярно оптической оси камеры в центре кадра (рисунок 1). Плоскопараллельное перемещение осуществлялось посредством размещения поворотной платформы на двухкоординатном столике с ручной червячной передачей, ходом в 10 см и ценой деления шкалы лимба 1.5мм. Для измерения расстояния от камеры до контрольной плоскости с нанесенными тест-объектами, использовался дальномер – BOSCH GLM 50 C, также он использовался в качестве электронного уровня для измерения углов отклонения платформы. Люксметр – «ТКА-ПКМ»(09) служил для измерения параметров освещенности контролируемой поверхности.

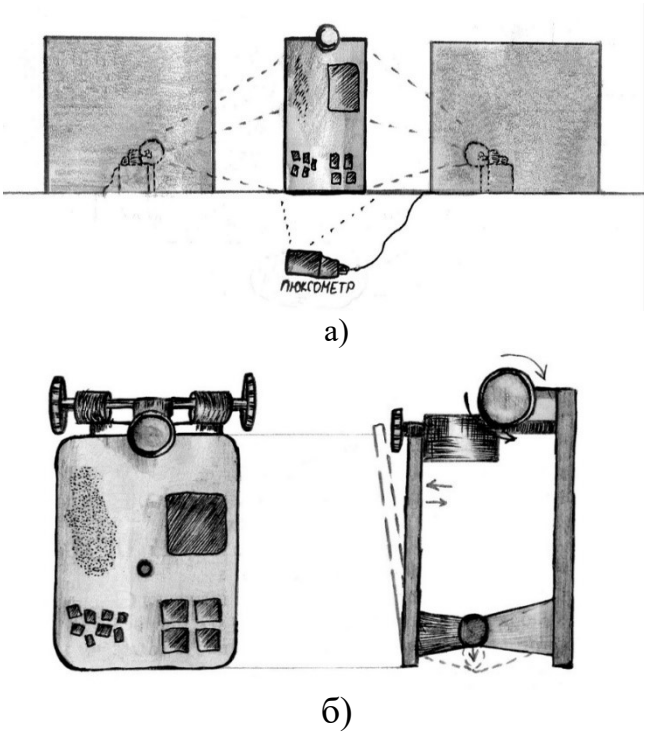


Рис. 1. а – Фото экспериментальной установки, б – принцип перемещения платформы.

Плоскопараллельные перемещения производились с шагом в полтора сантиметра.

На поворотной платформе были использованы четыре фракции голографических тест-объектов (пыль и квадратные фрагменты трех различных размеров). Освещение в помещении

было естественным через окна, и оставалось неизменным на протяжении эксперимента. Сцена съемки подсвечивалась локально двумя светодиодными немерцающими лампами. Сами лампы были закрыты от объектива камеры, чтобы не пересвечивать сцену. Для задания расстояния камера дискретно отдалялась от поворотной платформы, при этом расстояние измерялось лазерным дальномером.

Освещенность поверхности измерялась люксметром один раз в начале эксперимента и составила от 250 до 400 Лк в зависимости от близости к лампам. Лампы освещали поверхность под углом примерно 30 градусов, при этом было необходимо их выставить особым образом для получения наиболее информативной цветовой картины отражающих пленок. В иных случаях пленки могут отражать только в оттенках синего цвета, что не является оптимальным для наблюдения и не отражает возможных перемещений с достаточной точностью.

Экспозицию необходимо выставлять минимальную по длительности, иначе поверхность с пленками получается засвеченной и изменения цвета пленки не видно.

Разрешение фотографии - 1448*1084 максимальное для данной матрицы. Экспозиция камеры, подобранная экспериментально, составила 2345.0 мкс.

1. Рассмотрим часть эксперимента, посвященную определению углового перемещения поворотной платформы.

Съемка производилась с различных расстояний: 3,59 м, 4,77м, 6,83м, 10м, 12,67м, 15м, 20м, 25м.

Фотографии обрабатывались, самостоятельно разработанным, программным обеспечением, осуществляющим суммирование значений яркости пикселей выбранной прямоугольной области. Итоговые суммы по каждому фото, выраженные в битах яркости, сравнивались между собой, для выявления признаков перемещения. В качестве исследуемых областей кадра были взяты как вся поверхность платформы, так и отдельные фракции голографических наклеек.

При измерениях углового перемещения с расстояния 12,67 метра, при наблюдении за областью, охватывающей только голографические наклейки со стороной 5мм (физические размеры области 4*5 см, что составляет прямоугольник 5*6 пикселей кадра) получили следующие значения, отображенные на рисунке 2. Первые три точки графика соответствуют изначальному положению поворотной платформы, вторая тройка значений – крайнему положению (смещение на 5,3 градуса) и последняя тройка – возврат платформы в изначальное положение.

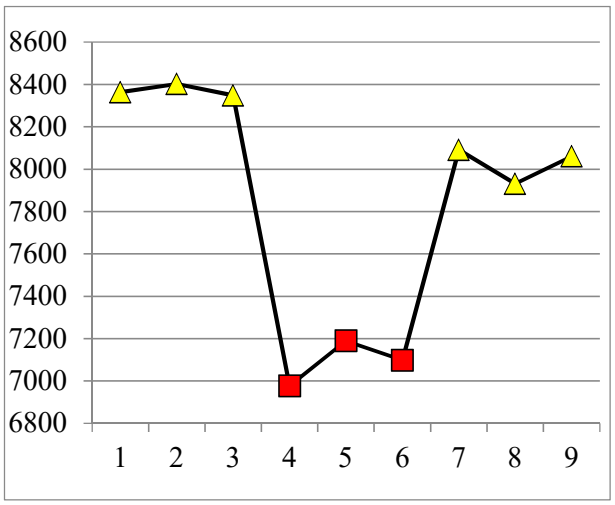


Рис. 2. – Фиксация угловых перемещений с расстояния 12,67 метра
Нумерация отсчетов: 1,2,3 – 0 градусов, 4,5,6 – 5,3 градуса, 7,8,9 – возврат в 0 градусов.

Наблюдается некое отклонение значений графика, при возврате платформы в изначальное положение. Это может быть вызвано общим изменением освещенности помещения, из-за того, что между фотографиями проходили отрезки в несколько минут.

При аналогичном измерении с расстояния 12,67 метров, области кадра, охватывающей всю платформу, 18*15 пикселей, наблюдали несколько худшее отображение переходов между кадрами.

Промежуточный вывод

Наблюдение за голографическими наклейками минимальной фракции дало лучшее отображение процесса углового смещения, наблюдались более четкие переходы на графике. Чем меньше наблюдаемая область кадра, тем меньший объем информации требуется обработать, соответственно увеличивается скорость измерений.

В зависимости от различной пространственной установки освещения, можно добиться максимальной цветовой разницы при физическом смещении наблюдаемого объекта. Для области с большим количеством, произвольным образом, наклеенных голографических меток этого добиться проще.

При съемке с максимального расстояния в 25 метров рассматривали различные области

кадра. Первая область – 5*4 пикселей, отображающая цельный квадрат голографической пленки со стороной 7 см.

Результат обработки представлен на рисунке 3.

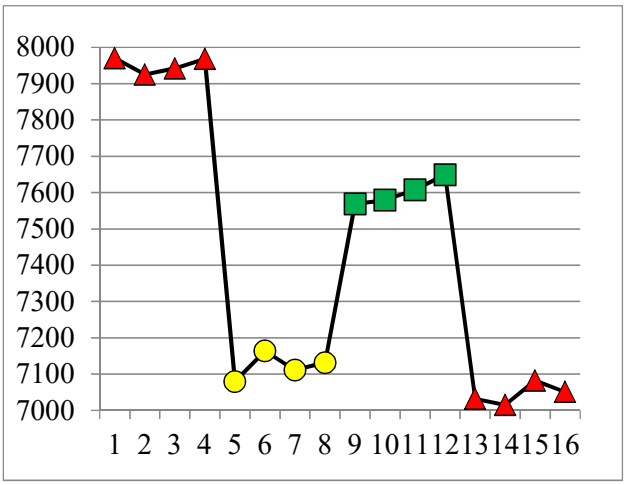


Рис. 3. – Фиксация угловых перемещений с расстояния 25 метров (область 5*4)
1,2,3,4 – 0 градусов, 5,6,7,8 – 3 градуса, 9,10,11,12 – 5,3 градуса, 13,14,15,16 – возврат в 0 градусов.

Из рис. 3. видно, что возврат в изначальное положение на графике не отображается, пиксели области имеют абсолютно другую суммарную яркость. Вероятнее всего это можно объяснить тем, что произошло перерегулирование.

Следует пояснить, что максимальная разница в суммарной яркости области из 20 пикселей, составляет для этого графика порядка 900 Бит. В то время как один пиксель может иметь значения от 0 до 765 Бит.

Также не стоит исключать влияние общей освещенности помещения.

Рассмотрим меньшие области, пространственно они также находятся на цельном квадрате голографической пленки и визуально имеют наибольший перепад цветности, 2*2 пикселя и 1*1 пиксель.

Результат обработки области 2*2 пикселя представлен на рисунке 4.

Как видно из графика, наблюдаются более четкие, выраженные переходы между состояниями платформы. Возврат в нулевую точку наблюдается, но конечный уровень яркости отличается от изначального, в среднем на 240 Бит при 4 пиксельной области.

График, соответствующий области из 1 пикселя представлен на рисунке 5

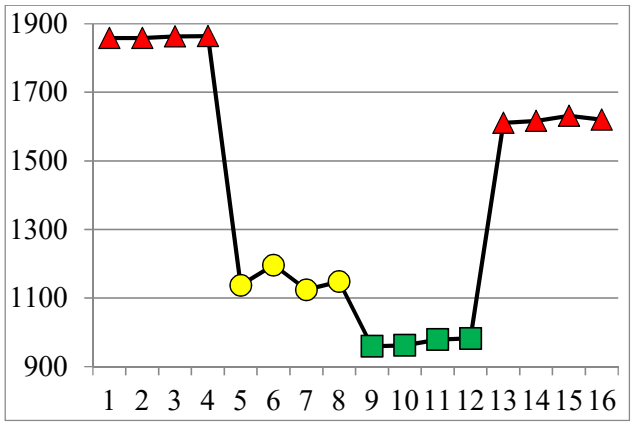


Рис. 4. – Фиксация угловых перемещений с расстояния 25 метров (область 2*2).

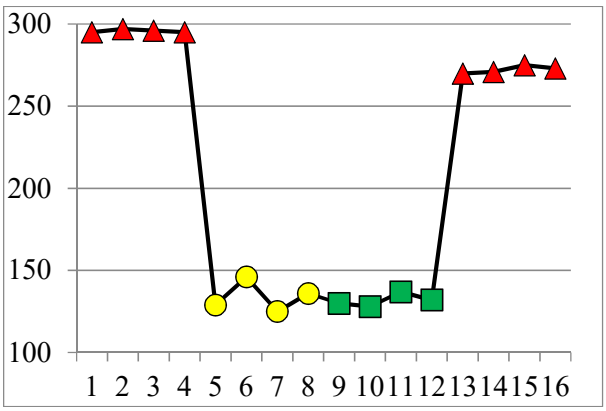


Рис. 5. – Фиксация угловых перемещений с расстояния 25 метров (область 1*1).

При рассмотрении области в один пиксель, явно теряется чувствительность к малым перемещениям, положения платформы в 3 и 5,3 градусов имеют одинаковый уровень. Однако, возврат в изначальное положение, по яркости наиболее близок и составляет 23 Бита.

Промежуточный вывод

Таким образом, можно обрабатывать достаточно малую область кадра. Информация, полученная при обработке больших областей, может быть неправильно интерпретирована.

2. Рассмотрим часть эксперимента, посвященную определению плоскопараллельного перемещения поворотной платформы

Перемещение платформы производилось на поворотном столике, ось перемещения совпадала с оптической осью камеры.

Наблюдали поверхность с размещенными голографическими тест-объектами на различных расстояниях: 12,67 метров и 25 метров, переме-

щение производилось на 1,5см и 3 см с возвратом в изначальную точку, регулируя отдаление по лимбу столика. Для наблюдения выбрана только область с 1 квадратом голографической пленки со стороной 7 см, т.к. он показал наибольшее изменение цветности и яркости. При измерении параметров яркости с расстояния 12,67 метра, выбранная область образовала квадрат со стороной в 9 пикселей. Результат обработки представлен на рисунке 6.

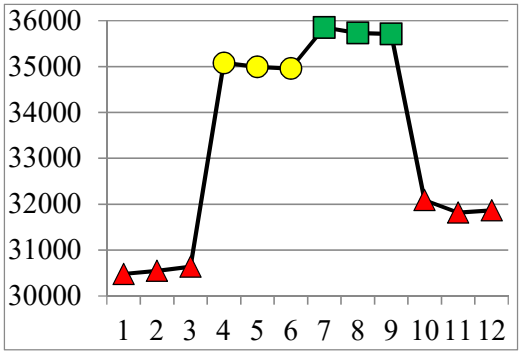


Рис. 6. – Фиксация плоскопараллельных перемещений с расстояния 12,67 метра
1,2,3 – 0 см (начальная точка), 4,5,6 – 1.5 см (отдаление от камеры), 7,8,9 – 3 см (отдаление), 10,11,12 – возврат в 0 (начальная точка).

При одинаковом приращении в 1,5 см перепад яркости отличался более чем в 4 раза, что говорит о неоднородности изменения яркости в зависимости от пространственного положения источников освещения и перемещаемой плоскости. С расстояния 25 метров наблюдали одну область, отображающую только большой квадрат голографической пленки со стороной в 7 см. Результат обработки представлен на рисунке 7.

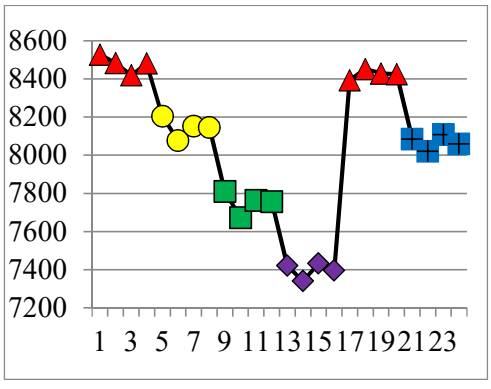


Рис. 7. – Фиксация плоскопараллельных перемещений с расстояния 25 метров 1,2,3,4 – 0 см (начальная точка), 5,6,7,8 – 1,5 см (отдаление от камеры), 9,10,11,12 – 3 см (отдаление), 13, 14, 15,16 – 4,2 см (отдаление), 17,18,19,20 – возврат в 0 (начальная точка), 21,22,23,24 – 1,5 см (приближение к камере).

Единственной аномалией из графика является соответствие яркости пикселей области при отдалении от изначальной точки на 1,5 см и при приближении от нее к камере на 1,5 см.

Это объясняется сменой интерференционных максимумов отражающей решетки, которую собой представляет голографическая пленка.

Выводы

1. Область с малыми квадратами голографической пленки со стороной около 0,5 см была более информативной на дистанциях до 20 метров, в связи с тем, что сами кусочки пленки были наклеены под произвольными разными углами и давали наиболее цветную яркую картину. На больших расстояниях, картинка от отдельных кусочков пленки сливается и усредняется попиксельно.
2. С увеличением расстояния от камеры до поворотной платформы чувствительность к определению минимальных перемещений снижается.
3. Предельное расстояние съемки, при котором было зафиксировано перемещения объекта в данном эксперименте – 25 м.
4. Оптимальные условия освещенности при фиксации смещений – небольшой уровень естественного освещения, либо его полное отсутствие, дополнительная подсветка установки немерцающими лампами.

Определены дальнейшие перспективы:

1. Расстояние съемки можно увеличить, при использовании длиннофокусных или вариофокальных объективов, более светосильной оптики и ПЗС-матриц с большим размером пикселя.
2. Необходимо в каждом конкретном случае, при установке подобных систем измерения, иметь наперед известные параметры колебаний, в этом случае система поможет следить за их границами. Требуется индивидуальная настройка освещенности.
3. При малых областях съемки, которые занимают объекты в кадре на больших расстояниях, критическую роль играют помехи и ошибки в передаче пиксельной информации. Следовательно, необходимо более детально разобраться в их природе и способах нивелирования их влияния.

Данная работа выполнена в рамках и при финансовой поддержке РФФИ и города Севастополь (проект № 18-42-920002 р_а).

Список литературы

1. Нурзай В.А., Быковский Ю.М., Халина А.А. Поиск движения для оптической системы измерения вибрации // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика 2019, №6, стр. 09-15. DOI: 10.25791/pribor.06.2019.690
2. Нурзай В.А., Быковский Ю. М., Халина А.А. Анализ влияния цвета объекта и спектрального состава его освещения на шумы ПЗС-матрицы видеокамеры системы технического зрения // Инженерный вестник Дона, 2019, №1 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2019/5724
3. Предприятие «Электронные технологии и метрологические системы» [электронный ресурс] URL: https://zetlab.com/ (дата обращения 27.03.2020)
4. Polytec company [электронный ресурс] URL: https://www.polytec.com/int/ (дата обращения 27.03.2020)
5. Портативный лазерный виброметр PDV-100 URL: http://alphatechgroup.ru/wp-content/uploads/2019/01/Portativnyy-lazernyy-vibrometr-PDV-100_2019.pdf (дата обращения 27.03.2020)
6. Нурзай В.А., Быковский Ю.М., Халина А.А. Оптическая система измерения параметров вибрации на производстве // Материалы конференции ЭПЭБ-2019, Севастополь, 2019.

References

1. Nurzaj V.A., Bykovskij YU. M., Halina A.A. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika* 2019, №6, pp. 09-15. DOI: 10.25791/pribor.06.2019.690
2. Nurzaj V.A., Bykovskij YU. M., Halina A.A. *Inzhenernyj vestnik Dona*. 2019. №1 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2019/5724
3. *Predpriyatie «Elektronnye tekhnologii i metrologicheskie sistemy»* [Enterprise "Electronic Technologies and Metrological Systems"]. URL: https://zetlab.com/ (*data obrashcheniya* 27.03.2020)
4. Polytec company URL: https://www.polytec.com/int/ (*data obrashcheniya* 27.03.2020)
5. *Portativnyj lazernyj vibrometr* PDV-100 [Portable laser vibrometer PDV-100]. URL: http://alphatechgroup.ru/wp-content/uploads/2019/01/Portativnyy-lazernyy-vibrometr-PDV-100_2019.pdf (*data obrashcheniya* 27.03.2020).
6. Nurzaj V.A., Bykovskij YU. M., Halina A.A *Opticheskaya sistema izmereniya parametrov vibracii na proizvodstve* [Optical system for measuring vibration parameters in the workplace]. Conference proceedings EIES-2019, Sevastopol, 2019.

УДК 539.3:536.46

К расчету на прочность закрылков вентиляторов главного проветривания рудников и шахт

В.А. Пухлий[1], Д.А. Коршунов[2], К. В. Пухлий[3]
[1]*Севастопольский государственный университет, г.Севастополь, 299053, Россия, pu1611@rambler.ru*
[2]*ПАО «Норникель», АО «Кольская ГМК», рудник «Северный», г.Заполярный, Россия, den-truba@yandex.ru*
[3]*АО «Аэротекс», Москва, 127349, Россия, fqd2d@mail.ru*

Статья поступила 20.04.2020 г.; после доработки 22.04.2020 г.

Аннотация

Разработаны математическая модель и алгоритм расчета НДС закрылков вентиляторов главного проветривания рудников и шахт. При расчете НДС закрылок вентилятора схематизируется как трехслойная консольная изотропная оболочка переменной жесткости с изотропным заполнителем, приведенные упругие параметры которого определяются по методике, изложенной в справочной литературе. Исходная задача Дирихле для системы дифференциальных уравнений в частных производных эллиптического типа 12-го порядка методом интегральных соотношений Дородницына приводится к системе обыкновенных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами. Переменность коэффициентов не позволяет получить точное решение задачи. Разработан аналитический метод интегрирования таких систем уравнений.

Ключевые слова: закрылки вентиляторов, трехслойные изотропные оболочки, модифицированный метод последовательных приближений.

The stress-strain state of the working blades fans main ventilation of mines and pits

V.A. Pukhliy[1], D.A. Korshunov[2], K.V. Pukliy[3]
[1] *Sevastopol State University, Sevastopol, 299053, Russia, pu1611@rambler.ru*
[2]*PJSC Nornickel, JSC Kola MMC, Severny mine, Zapolyarny, Russia, den-truba@yandex.ru*
[3]*JSC Aerotex, Moscow, 127349, Russia, fqd2d@mail.ru*

Received 20.04.2020 y.; received in final form 22.04.2020 y.

Abstract

A mathematical model and an algorithm for calculating the VAT of the flaps of the main ventilation fans of mines and mines are developed. When calculating the VAT, the fan flap is schematized as a three-layer cantilever isotropic shell of variable stiffness with an isotropic filler, the reduced elastic parameters of which are determined by the method described in the reference literature. The original Dirichlet problem for a 12th-order elliptic type partial differential equation system is reduced to a system of ordinary differential equations with variable coefficients using the Dorodnitsyn integral relations method. Variability of the coefficients does not allow to obtain an exact solution to the problem. An analytical method for integrating such systems of equations based on the developed prof. V.A. Pukhli modified method of successive approximations...

Keywords: Fan flaps, three-layer isotropic shells, a modified method of successive approximations

Введение

Современные вентиляторы большой мощности для регулирования режима работы изготавливают с поворотными закрылками. На рис.1 показано рабочее колесо шахтного вентилятора главного проветривания ВЦЗ-32. Закрылок представляет собой консольную трехслойную пологую

оболочку переменной жесткости с несущими слоями постоянной толщины и легким заполнителем типа пенополиуретана.

Ранее на основе теории трехслойных ортотропных оболочек рассматривалась задача о расчете рабочих лопаток вентиляторов главного проветривания рудников и шахт [1]. Лопатка вентилятора рассматривалась как трехслойная оболочка переменной жесткости с несущими слоями постоянной толщины и ортотропного заполнителя, моделирующего подкрепляющие ребра.

Ниже излагается методика расчета на прочность закрылков центробежных вентиляторов главного проветривания. Конструкции такого типа также находят широкое применение в самолетостроении. Практически все виды самолетов оборудуются закрылками, регулирующими режим взлета и посадки самолетов.

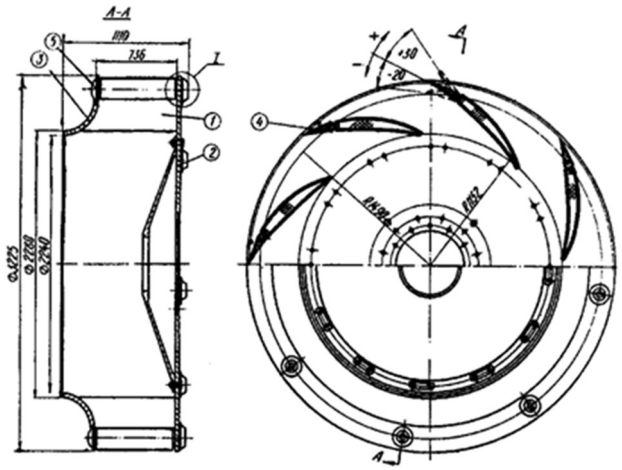


Рис.1. Рабочее колесо шахтного вентилятора ВЦЗ-32: 1 – лопатки; 2 – коренной диск; 3 – покрывающий диск; 4 – закрылок лопатки.

Постановка цели и задачи научного исследования

Целью данной работы является изучение НДС закрылков вентиляторов главного проветривания рудников и шахт. Задачей научного исследования является разработка математической модели и алгоритма исследования НДС закрылков.

Формулировка задачи

На рис.2 приведена геометрия и система координат закрылка центробежного вентилятора главного проветривания.

При построении теории примем следующие гипотезы: а) несущие слои и заполнитель выполнены из разных изотропных материалов;

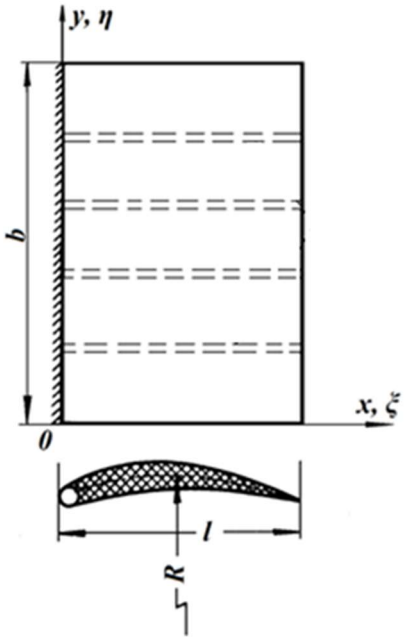


Рис.2. Геометрия и система координат закрылка.

б) коэффициент Пуассона для всех слоев одинаков и равен приведенному; в) заполнитель и несущие слои жестко соединены по всей поверхности соприкосновения; г) к несущим слоям применима гипотеза Кирхгофа-Лява о прямой нормали; д) заполнитель несжимаем в поперечном направлении и трансверсально изотропен; е) деформации поперечного сдвига по толщине заполнителя распределены по известному закону.

Положительную нормальную координату z будем отсчитывать в сторону внешней нормали к исходной поверхности. Называя несущий слой, расположенный со стороны внешней нормали, первым, со стороны внутренней нормали – вторым, а заполнитель – третьим, введем следующие обозначения (рис.6.2): $h = h(x, y)$ – толщина закрылка; $h_k = h_k(x, y)$ – толщины слоев; E_k и ν_k – модуль упругости и коэффициент Пуассона слоев; G – модуль поперечного сдвига заполнителя; $\alpha_i(df/dz)$ – закон распределения поперечных сдвигов по толщине заполнителя. В дальнейшем при выводе уравнений будем использовать соотношения общей теории трехслойных оболочек [2].

Рассматривая заполнитель как трехмерное тело, на основании формулы для деформации поперечного сдвига

$$\varepsilon_{iz}^3 = \partial u_i^z \big/ \partial z + w_{,i} = \alpha_i df/dz\,, \qquad (1)$$

получим:

$$u_i^z = u_i + \alpha_i f(z) - z w_{,i} \quad (-c \le z \le c)\,. \qquad (2)$$

В формулах (1) и (2) нижний индекс i, следующий после запятой, означает частное дифференцирование по координате x_i.

Тангенциальные перемещения поверхностей соприкосновения заполнителя с первым и вторым слоями (рис.3) запишутся так:

$$u_i^1 = u_i + ct_+\alpha_i - cw_{,i} \qquad (z = c),$$
$$u_i^2 = u_i - ct_-\alpha_i + cw_{,i} \qquad (z = -c). \qquad (3)$$

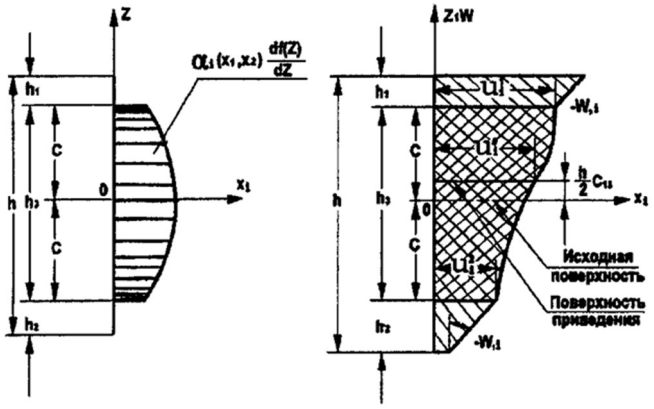


Рис.3. К расчету трехслойных закрылков на прочность: а) распределение сдвигов по толщине закрылка; б) тангенциальные перемещения поверхностей соприкосновения заполнителя с внешними слоями.

Тангенциальные перемещения несущих слоев представим в виде:

$$u_i^{1z} = u_i + ct_+\alpha_i - cw_{,i} - (z-c)w_{,i} \quad (c \le z \le c + h_1);$$
$$u_i^{2z} = u_i - ct_-\alpha_i + cw_{,i} - (z+c)w_{,i} \quad (-c - h_2 \le z \le c). \qquad (4)$$

Определим деформации слоев:

$$\varepsilon_{ij}^1 = e_{ij} + ct_+\alpha_{ij} + c\chi_{ij} + (z-c)\chi_{ij};$$
$$\varepsilon_{ij}^2 = e_{ij} - ct_-\alpha_{ij} - c\chi_{ij} + (z+c)\chi_{ij}. \qquad (5)$$

$$\varepsilon_{ij}^3 = e_{ij} + f(z)\alpha_{ij} + z\chi_{ij};$$
$$\varepsilon_{iz}^3 = \alpha_i df/dz;$$
$$e_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) + k_{ij}w + \frac{1}{2}w_{,i}w_{,j};$$
$$\alpha_{ij} = \frac{1}{2}(\alpha_{i,j} + \alpha_{j,i}); \qquad \chi_{ij} = -w_{ij}. \qquad (6)$$

На основе закона Гука запишем напряжения в слоях (δ_{ij} – символ Кронекера):

$$\sigma_{ij}^k = \frac{E_k}{1-\nu_k^2}\left[(1-\nu)\varepsilon_{ij}^k + \nu\delta_{ij}\left(\varepsilon_{11}^k + \varepsilon_{22}^k\right)\right],$$
$$\sigma_{iz}^3 = G\alpha_i\frac{df}{dz}. \qquad (7)$$

Вывод исходных уравнений проведем на основе вариационного принципа Лагранжа, согласно которому имеем:

$$-\delta\Pi + \delta A_1 + \delta A_2 = 0, \qquad (8)$$

где δП – вариация работы внутренних сил, δA_1 – вариация работы внешней нагрузки, приложенной к поверхности закрылка, δA_2 – вариация внешних контурных усилий.

Выражения для вариации работы внутренних сил упругости закрылка с учетом сдвига в заполнителе будут иметь вид:

$$\delta\Pi = \iint_\Omega \left[\int_c^{c+h_1}\sum_{i,j}\sigma_{ij}^1\delta\varepsilon_{ij}^1 dz + \int_{-c-h_2}^{-c}\sum_{i,j}\sigma_{ij}^2\delta\varepsilon_{ij}^2 dz + \int_{-c}^{c}\left(\sum_{i,j}\sigma_{ij}^3\delta\varepsilon_{ij}^3 + \sum_i\sigma_{iz}^3\delta\varepsilon_{iz}^3\right)dz\right]\mathrm{d}x_1dx_2 =$$
$$= \iint_\Omega\left(\sum_{i,j}N_{ij}\delta\varepsilon_{ij} + \sum_{i,j}H_{ij}\delta\alpha_{ij} + \sum_{i,j}M_{ij}\delta\chi_{ij} + \sum_i Q_i^0\delta\alpha_1\right)dx_1dx_2. \qquad (9)$$

Проинтегрировав выражение (9) по частям, получим:

$$\delta\Pi = -\iint_\Omega\left\{\sum_i\left(N_{1i,1} + N_{2i,2}\right)\delta u_i - \sum_i\left(H_{1i,1} + H_{2i,2} - Q_i^0\right)\delta\alpha_i + \right.$$
$$+\left[M_{11,11} + 2M_{12,12} + M_{22,22} - k_{11}N_{11} - 2k_{12}N_{12} - k_{22}N_{22} + (w_{,1}N_{11})_{,1} + \right.$$
$$\left.\left. + (w_{,1}N_{12})_{,2} + (\mathrm{w}_{,2}\mathrm{N}_{12})_{,1} + (\mathrm{w}_{,2}\mathrm{N}_{22})_{,2}\right]\delta\mathrm{w}\right\}\mathrm{d}x_1dx_2 + \int_0^{l_1}\left[\sum_i\mathrm{N}_{12}\delta u_1 + \sum_i H_{i2}\delta\alpha_i\right.$$
$$\left. - M_{22}\delta w_{,2} + \left(M_{22,2} + 2M_{12,1} + w_{,1}N_{12} + w_{,2}N_{22}\right)\right]dx_1\Big|_0^{l_2} + \int_0^{l_2}\left[\sum_i N_{i1}\delta u_i + \right.$$

$$+\sum_i H_{i1}\delta\alpha_i - M_{11}\delta w_{,1} + \left(M_{11,1} + 2M_{12,2} + w_{,2}N_{12} + w_{,1}N_{11}\right)\Big] dx_2\Big|_0^{l_1} - 2M_{12}\delta\omega\Big|_0^{l_1}\Big|_0^{l_2}, \qquad (10)$$

где l_i – размеры закрылка в направлении x_i.

Запишем выражение для вариации работы внешней поверхностной нагрузки, приведенной к срединной поверхности заполнителя:

$$\delta A_1 = \iint_\Omega \left(p_1\delta u_1 + p_2\delta u_2 + q\delta w\right) dx_1 dx_2 . \qquad (11)$$

Здесь p_1, p_2, q – компоненты поверхностной нагрузки в направлении осей x_1, x_2, z:

$$q = \omega^2 R_2 \cos\beta_2 \sum_{k=1}^{3} \rho_k h_k ;$$

$$p_1 = \omega^2 \left[R_2 \sin\beta_2 - \xi l\right] \sum_{k=1}^{3} \rho_k h_k , \qquad (12)$$

где $\rho_k = \gamma_k / g$ – удельная плотность материала k-го слоя (k = 1, 2, 3); R_2 – радиус колеса нагнетателя; β_2 – угол выхода потока. При этом тангенциальная нагрузка имеет потенциал:

$$p_1 = -\frac{1}{l}\psi_{,1}.$$

Из вариационного принципа Лагранжа и выражений (10) и (11) получим уравнения равновесия и естественные граничные условия. Выпишем уравнения равновесия:

$$\begin{aligned}
&\mathrm{N}_{11,1} + N_{12,2} + p_1 = 0;\\
&N_{22,2} + N_{21,1} + p_2 = 0;\\
&H_{11,1} + H_{12,2} - Q_1^0 = 0;\\
&H_{22,2} + H_{21,1} - Q_2^0 = 0;\\
&M_{11,11} + 2M_{12,12} + M_{22,22} - N_{11}(k_{11} + \chi_{11}) -\\
&- 2N_{12}(k_{12} + \chi_{12}) - N_{22}(k_{22} + \chi_{22}) +\\
&+ q - p_1 w_{,1} - p_2 w_{,2} = 0. \qquad (13)
\end{aligned}$$

Положим $u_i = u_i^0 + \frac{1}{2}h\xi_i$, где $\xi_i = c_{13}w_{,i} - c_{12}\alpha_i$. Кроме того, введем поверхность приведения, расположенную на расстоянии $\frac{1}{2}hc_{13}$ от срединной поверхности заполнителя.

Тогда выражения для усилий и моментов примут вид:

$$N_{ij} = \frac{Eh}{1-\nu^2}\left[(1-\nu)e_{ij}^0 + \delta_{ij}\nu e_{kk}^0\right] \qquad (14)$$

$$\begin{aligned}
&e_{ij}^0 = \frac{1}{2}\left(u_{i,j}^0 + u_{j,i}^0\right) + \frac{1}{2}w_{,i}w_{,j} + k_{ij}w;\\
&e_{kk}^0 = e_{11}^0 + e_{22}^0;\\
&H_{ij} = D\Big\{\eta_1\left[(1-\nu)\alpha_{ij} + \nu\delta_{ij}\alpha_{kk}\right] +\\
&+ \eta_2\left[(1-\nu)\chi_{ij} + \nu\delta_{ij}\chi_{kk}\right]\Big\}; \qquad (15)\\
&\alpha_{kk} = \alpha_{11} + \alpha_{22};\\
&\chi_{kk} = \chi_{11} + \chi_{22};
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&M_{ij} = D\Big\{\eta_2\left[(1-\nu)\alpha_{ij} + \nu\delta_{ij}\alpha_{kk}\right] +\\
&+ \eta_3\left[(1-\nu)\chi_{ij} + \nu\delta_{ij}\chi_{ij}\right]\Big\}. \qquad (16)
\end{aligned}$$

Подставляя в уравнения (13) выражения для усилий, моментов и перерезывающих сил (14)-(16), получим разрешающую систему пяти нелинейных уравнений 12-го порядка относительно функций $u_1^0, \mathrm{u}_2^0, \alpha_1, \alpha_2, w$, описывающую напряженно-деформированное состояние трехслойного закрылка переменной жесткости с изотропными внешними слоями и жестким трансверсально-изотропным заполнителем:

$$\begin{aligned}
&\frac{B}{1-\nu^2}\left[u_{1,11}^0 + k_{11}w_{,1} + w_{,1}w_{,11} + \frac{1+\nu}{2}\left(u_{2,12}^0 + w_{,12}w_{,2}\right) + \frac{1-\nu}{2}\left(u_{1,22}^0 + w_{,1}w_{,22}\right)\right] +\\
&+ \frac{1}{1-\nu^2}B_{,1}\left[u_{1,1}^0 + \nu u_{2,2}^0 + k_{11}w + \frac{1}{2}w_{,1}^2 + \frac{\nu}{2}w_{,2}^2\right] + \frac{1}{2(1+\nu)}B_{,2}\left[u_{1,2}^0 + u_{2,1}^0 + w_{,1}w_{,2}\right] = -p_1; \qquad (17)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&\frac{B}{1-\nu^2}\left[u_{2,22}^0 + \nu k_{11}w_{,2} + w_{,2}w_{,22} + \frac{1+\nu}{2}\left(u_{1,12}^0 + w_{,1}w_{,12}\right) + \frac{1-\nu}{2}\left(u_{2,11}^0 + w_{,11}w_{,2}\right)\right] +\\
&+ \frac{1}{2(1+\nu)}B_{,1}\left(u_{1,2}^0 + u_{2,1}^0 + w_{,1}w_{,2}\right) + \frac{1}{1-\nu^2}B_{,2}\left[u_{2,2}^0 + \nu u_{1,1}^0 + \frac{1}{2}w_{,2}^2 + \nu k_{11}w + + \frac{\nu}{2}w_{,1}^2\right] = -p^2; \qquad (18)
\end{aligned}$$

$$D\Big[\eta_1\Big(\alpha_{1,11}+\frac{1+\nu}{2}\alpha_{2,12}+\frac{1-\nu}{2}\alpha_{1,22}\Big)+\eta_{1,1}(\alpha_{1,1}+\nu\alpha_{2,2})+\frac{1-\nu}{2}\eta_{1,2}(\alpha_{1,2}+\alpha_{2,1})-$$
$$-\eta_2(\nabla^2 w)_{,1}-\eta_{2,1}(w_{,11}+\nu w_{,22})-\eta_{2,2}w_{,12}\Big]+D_{,1}\big[\eta_1(\alpha_{1,1}+\nu\alpha_{2,2})-\eta_2(w_{,11}+\nu w_{,22})\big]+$$
$$+(1-\nu)D_{,2}\Big[\frac{\eta_1}{2}(\alpha_{1,2}+\alpha_{2,1})-\eta_2 w_{,12}\Big]=Gh_3\tau_1\alpha_1; \qquad (19)$$

$$D\Big[\eta_1\Big(\alpha_{2,22}+\frac{1+\nu}{2}\alpha_{1,12}+\frac{1-\nu}{2}\alpha_{2,11}\Big)+\eta_{1,2}(\alpha_{2,2}+\nu\alpha_{1,1})+\frac{1-\nu}{2}\eta_{1,1}(\alpha_{1,2}+\alpha_{2,1})-$$
$$-(\nabla^2 w)_{,2}-\eta_{2,2}(w_{,22}+\nu w_{,11})-(1-\nu)\eta_{2,1}w_{,12}\Big]+(1-\nu)D_{,1}\Big[\frac{1}{2}\eta_1(\alpha_{1,2}+\alpha_{2,1})-\eta_2 w_{,12}\Big]+$$
$$+D_{,2}\big[\eta_1(\alpha_{2,2}+\nu\alpha_{1,1})-\eta_2(w_{,22}+\nu w_{,11})\big]=Gh_3\tau_1\alpha_2; \qquad (20)$$

$$D\Big[\eta_3\nabla^4 w+2\eta_{3,1}(\nabla^2 w)_{,1}+2\eta_{3,2}(\nabla^2 w)_{,2}+\nabla^2\eta_3\nabla^2 w-(1-\nu)L(\eta_3,w)\Big]+$$
$$+2D_{,1}\big[\eta_3(\nabla^2 w)_{,1}+\eta_{3,1}(w_{,11}+\nu w_{,22})-(1-\nu)\eta_{3,2}w_{,12}\big]+2D_{,2}\big[\eta_3(\nabla^2 w)_{,2}+$$
$$+\eta_{3,2}(w_{,22}+\nu w_{,11})+(1-\nu)\eta_{3,1}w_{,12}\big]+\eta_3\nabla^2 D\nabla^2 w-(1-\nu)\eta_3 L(D,w)-$$
$$-D\big\{\eta_2\big[(\nabla^2\alpha_1)_{,1}+(\nabla^2\alpha_2)_{,2}\big]+\eta_{2,1}\big[2\alpha_{1,11}+(1-\nu)\alpha_{1,22}+(1+\nu)\alpha_{2,12}\big]+$$
$$+\eta_{2,2}\big[2\alpha_{2,22}+(1-\nu)\alpha_{2,11}+(1+\nu)\alpha_{1,12}\big]+\alpha_{1,1}(\eta_{2,11}+\nu\eta_{2,22})+\alpha_{2,2}(\eta_{2,22}+\nu\eta_{2,11})+$$
$$+(1-\nu)\alpha_{1,22}+2\eta_{2,1}(\alpha_{1,1}+\nu\alpha_{2,2})+(1-\nu)\eta_{2,2}(\alpha_{1,2}+\alpha_{2,1})\big\}-D_{,2}\big\{\eta_2\big[2\alpha_{2,22}+$$
$$+(1+\nu)\alpha_{1,12}+(1-\nu)\alpha_{2,11}\big]+2\eta_{2,2}(\alpha_{2,2}+\nu\alpha_{1,1})+(1-\nu)\eta_{2,1}(\alpha_{1,2}+\alpha_{2,1})\big\}-D_{,11}\eta_2\times$$
$$\times(\alpha_{1,1}+\nu\alpha_{2,2})-D_{,22}\eta_2(\alpha_{2,2}+\nu\alpha_{1,1})-(1-\nu)\eta_2 D_{,12}(\alpha_{1,2}+\alpha_{2,1})+\frac{B}{1-\nu^2}\Big[u^0_{1,1}+$$
$$+\nu u^0_{2,2}+k_{11}w+\frac{1}{2}(w^2_{,1}+\nu w^2_{,2})\Big](k_{11}-w_{,11})-\frac{B}{1+\nu}\Big[u^0_{1,2}+u^0_{2,1}+w_{,1}w_{,2}\Big]w_{,12}-$$
$$-\frac{B}{1-\nu^2}\Big[u^0_{2,2}+\nu u^0_{1,1}+\nu k_{11}w+\frac{1}{2}(w^2_{,2}+\nu w^2_{,1})\Big]w_{,22}+p_1 w_{,1}+p_2 w_{,2}=q. \qquad (21)$$

Введем систему безразмерных координат $\xi=x_1/l$, $\eta=\mathrm{x}_2/\mathrm{b}$, $m=l/b_1$ и безразмерные функции перемещений $w_1=w/h_0$, $\mathrm{u}_1=u_1^0/h_0$, $u_2=u_2^0/h_0$, где h_0 – максимальная толщина закрылка.

Исследуем напряженно-деформированное состояние (НДС) трехслойного закрылка, представляющего собой консольную пологую оболочку (рис.1).

Внешние слои лопатки имеют одинаковую толщину, а заполнитель – переменную толщину в направлении координаты ξ ($h_1=h_2=const$, $h_3=h_3(\xi)$).

Выпишем граничные условия для краев закрылка.

Для края $\xi=0$ получим:

$$\overline{w}=\overline{w}_{,1}=u_1=u_2=\alpha_1=\alpha_2=0. \qquad (22)$$

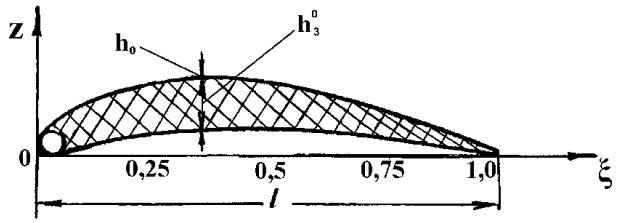
Для края $\xi=1$ получим:

$$N_{11}=N_{12}=M_{11}=H_{11}=H_{12}=Q_1+M_{12,2}=0. \qquad (23)$$

По краям $\eta=0$ и $\eta=1$ граничные условия соответствуют свободному краю:

$$N_{22}=N_{21}=M_{22}=H_2=H_{21}=Q_2+M_{21,1}. \qquad (24)$$

Изменение толщины профиля закрылка, как правило, задается таблично (рис.4). Однако при расчетах необходимо иметь закон изменения толщины закрылка в аналитическом виде. При этом функцию изменения толщины профиля можно задавать с помощью интерполяционных многочленов и рациональных дробей. Теория приближения функций многочленами была разработана в трудах П.Л.Чебышева [3], К.Вейерштрасса, Ш.Валле-Пуссена, С.Н.Бернштейна.



η	0	0,25	0,5	0,75	1,0
h/l	0,03	0,102	0,075	0,066	0,025
h_3^0/l	0,01	0,082	0,055	0,046	0,005

Рис.4. Табличный способ задания профиля закрылка.

Однако многочлены и рациональные дроби обладают рядом недостатков как аппарат приближения для функции с особенностями и для функции с не слишком большой гладкостью (именно последним свойством обладают функции изменения толщины крыловидных профилей радиальных и осевых турбомашин). Основной недостаток состоит в том, что их поведение в окрестности какой-либо точки определяют их поведение в целом. Предварительно проведенные расчеты с использованием интерполяционных многочленов Лагранжа, а также использование аппроксимации профиля по методу наименьших квадратов показали практическую непригодность таких подходов.

Здесь для задания таблицы изменения толщины профиля в аналитическом виде применяются полиномиальные сплайны, склеенные из кусков многочленов. Как известно, сплайновые интерполяции особенно эффективны при решении краевых задач для эллиптических уравнений в частных производных с гладкими коэффициентами [4]. При этом для интерполяции функции изменения толщины профиля используется интерполяция сплайном-многочленом n-й степени:

$$S(\xi)=\sum_{k=0}^{n}a_{ik}\xi^{k} \qquad \xi_{i-1}\le\xi\le\xi_i,$$

коэффициенты которого кусочно-постоянны и который в узлах интерполяции принимает заданные значения и непрерывен вместе со своими $n-1$ производными.

Функции изменения толщины закрылка h и толщины заполнителя h_3 задаются при помощи кубических сплайнов f_1 и f_2:

$$\begin{aligned}
&h=h_0\lambda_1 f_1=h_0\lambda_1[a_{1i}+a_{2i}(\xi-\xi_{i-1})+\\
&+a_{3i}(\xi-\xi_{i-1})^2+a_{4i}(\xi-\xi_{i-1})^3];\\
&h_3=h_3^0\lambda_2 f_2=h_3^0\lambda_2[b_{1i}+b_{2i}(\xi-\xi_{i-1})+\\
&+b_{3i}(\xi-\xi_{i-1})^2+b_{4i}(\xi-\xi_{i-1})^3].
\end{aligned} \tag{25}$$

где h_3^0 – характерная толщина заполнителя, $\lambda_1=l/h_0$ и $\lambda_2=l/h_3^0$ – безразмерные параметры закрылка.

Для данного случая запишем систему линейных уравнений задачи:

$$\frac{1}{1-\nu^2}u_{1,11}+\frac{m^2}{2(1-\nu)}u_{1,22}+\frac{s_1}{(1-\nu^2)}u_{1,1}+\frac{m}{2(1-\nu)}u_{2,12}+\frac{\nu m s_1}{(1-\nu^2)}u_{2,2}+$$
$$+\frac{l}{(1-\nu^2)R}w_{1,1}+\frac{ls_1}{(1-\nu^2)R}w_1=-\frac{p_1l^2}{bh_0}; \tag{26}$$

$$\frac{m}{2(1-\nu)}u_{1,12}+\frac{ms_1}{2(1+\nu)}u_{1,2}+\frac{1}{2(1+\nu)}u_{2,11}+\frac{m^2}{1-\nu^2}u_{2,22}+\frac{s_1}{2(1+\nu)}u_{2,1}+\frac{\nu ml}{(1-\nu^2)R}w_{1,2}=0; \tag{27}$$

$$\eta_1\left[\alpha_{1,11}+\frac{(1-\nu)m^2}{2}\alpha_{1,22}+\frac{(1-\nu)m}{2}\alpha_{2,12}\right]+(\eta_{1,1}+\eta_1 s_5)\left[\alpha_{1,1}+\nu m\alpha_{2,2}\right]-$$
$$-s_6\alpha_1-\eta_2\lambda_1^{-1}(\nabla_m^2 w_1)_{,1}-(\eta_{2,1}+\eta_2 s_5)\lambda_1^{-1}(w_{1,11}+\nu m^2 w_{1,22})=0; \tag{28}$$

$$\eta_1\left[m^2\alpha_{2,22}+\frac{1-\nu}{2}\alpha_{2,11}+\frac{(1+\nu)}{2}\alpha_{1,12}\right]+\frac{1-\nu}{2}(\eta_{1,1}+\eta_1 s_5)(\alpha_{2,1}+m\alpha_{1,2})-s_6\alpha_2-$$
$$-\lambda_1^{-1}m\eta_2(\nabla_m^2 w_1)_{,2}-(1-\nu)m\lambda_1^{-1}(\eta_{2,1}+\eta_2 s_5)w_{1,12}=0; \tag{29}$$

$$\eta_3\nabla_m^4 w_1+2(\eta_{3,1}+\eta_3 s_5)(\nabla_m^2 w_1)_{,1}+(\eta_{3,11}+2s_5\eta_{3,1}+s_3\eta_3)(w_{1,11}+\nu m^2 w_{1,22})+$$

$$+12\frac{(1-\nu^2)p_1 l}{bf_1^2}w_{1,1}+12\frac{l^2}{R^2 f_1^2}w_1-\lambda_1\eta_2[(\nabla_m^2\alpha_1)_{,1}+m(\nabla_m^2\alpha_2)_{,2}]-$$

$$-\lambda_1\eta_2 s_5[2\alpha_{1,11}+(1-\nu)m^2\alpha_{1,22}+(1+\nu)m\alpha_{2,12}]-\lambda_1\eta_{2,1}[2\alpha_{1,11}+(1-\nu)m^2\alpha_{1,22}+(1+\nu)m\alpha_{2,12}]-$$

$$-\lambda_1[\eta_2 s_3+2\eta_{2,1}s_5+\eta_{2,11}](\alpha_{1,1}+\nu m\alpha_{2,2})+12\frac{l}{Rf_1^2}u_{1,1}-12\frac{\nu ml}{Rf_1^2}u_{2,2}-12\frac{(1-\nu^2)q\lambda_1 l}{bf_1^2}=0. \quad (30)$$

В уравнениях (30) $b, \mathrm{s}_1, s_3, \mathrm{s}_5, \mathrm{s}_6$ – безразмерные параметры закрылка.

Заметим, что для исследования напряженно-деформированного состояния трехслойных закрылков могут использоваться также уравнения в смешанной форме.

Решение задачи Дирихле для систем уравнений в частных производных эллиптического типа

Для решения задачи Дирихле, описываемой системой уравнений (26)-(30) и граничными условиями (22) и (24), применим метод интегральных соотношений Дородницына [5, 6]. В соответствии с методом представим исходную систему уравнений (26)-(30) в дивергентной форме:

$$\frac{\partial\overline{X}}{\partial\xi}+\frac{\partial\overline{Y}}{\partial\eta}+\overline{L}=0;$$

$$\overline{X}=\{X_i\}=\{u_1,u_2,\alpha_1,\alpha_2,w_1,Z_1,Z_2,Z_3,Z_4,Z_5,Z_6,Z_7\}$$

$$\overline{Y}=B_0\overline{X}+B_1\frac{\partial\overline{X}}{\partial\eta}+B_2\frac{\partial^2\overline{X}}{\partial\eta^2}+B_3\frac{\partial^3\overline{X}}{\partial\eta^3};$$

$$\overline{L}=B\overline{X}+\overline{b}, \quad (31)$$

где $Z_1=u_{1,\xi}$, $Z_2=u_{2,\xi}$, $Z_3=\alpha_{1,\xi}$, $Z_4=\alpha_{2,\xi}$, $Z_5=w_{1,\xi}$, $Z_6=Z_{5,\xi}$, $Z_7=Z_{6,\xi}$; $B_r=\{b_{mn,r}\}$ и $B=\{b_{mn}\}$ (r = 0, 1, 2, 3; m, n = 1, 2, …, 12) являются матрицами преобразования; $\overline{b}$ – вектор свободных членов.

Согласно методу интегральных соотношений Дородницына представим неизвестные функции в (6.80) в виде конечного ряда:

$$\overline{X}(\xi,\eta)=\sum_{i=1}^{n}X_{ij}(\eta)P_i(\xi); \quad (32)$$

$$\overline{X}=\{X_j\}=\{u_1^0,u_2^0,\alpha_1,\alpha_2,w\}, \quad (33)$$

где $P_j(\xi)$ – система аппроксимирующих функций; $X_{ij}(\eta)$ – неизвестные функции, определяемые в результате решения системы обыкновенных дифференциальных уравнений. В качестве системы аппроксимирующих функций выбираем ортонормированные на интервале [0, 1] полиномы Якоби, подчиненные условиям жесткого закрепления закрылка при ξ = 0 [7, 8]:

$$P_1(\xi)=\sqrt{9}(28\xi^4-42\xi^3+15\xi^2);$$

$$P_2(\xi)=\sqrt{11}(120\xi^5-252\xi^4+168\xi^3-35\xi^2);$$

$$P_3(\xi)=\sqrt{13}(495\xi^6-1320\xi^5+1260\xi^4-504\xi^3+70\xi^2) \quad (34)$$

В качестве весовых функций выбираются эти же полиномы, ортогональные на интервале [0, 1] не производные от них:

$$R_j(\xi,\eta)=\begin{cases}\sum_{j=1}^{n}P_j(\xi) & (\mathrm{i}=3\div5;\ 8\div12);\\ \sum_{j=1}^{n}P_{j,1}(\xi) & (\mathrm{i}=1,2;\ 6,7).\end{cases} \quad (35)$$

Подставив ряды (32) в (9) и приведя двойной интеграл к повторному, запишем выражение (9) следующим образом:

$$\int_0^1\sum_k\left\{\int_0^1\left[L_1\left(\sum_i X_{ij}P_i\right)+p_1\right]+L_2\left(\sum_i X_{ij}P_i\right)+L_3\left(\sum_i X_{ij}P_i\right)+L_4\left(\sum_i X_{ij}P_i\right)+\right.$$

$$\left.+\left[L_5\left(\sum_i X_{ij}P_i\right)-q\right]\right\}P_k\,d\xi-J_2P_k\Big|_0^1\delta(X_{ij})_k\,d\eta-\int_0^1 J_1\left(\sum_i X_{ij}P_i\right)\mathrm{d}\xi=0. \quad (36)$$

Поскольку вариации $\delta(X_{ij})_k$ и $(\delta X'_{ij})_k$ (k = 1, 2, …, n) произвольны и независимы, на основании соответствующих теорем вариационного исчисления имеем равенства:

$$\int_0^1 \left\{ \left[L_1\left(\sum_i X_{ij}P_i\right) + p_1 \right] + L_2\left(\sum_i X_{ij}P_i\right) + L_3\left(\sum_i X_{ij}P_i\right) + L_4\left(\sum_i X_{ij}P_i\right) + \left[L_5\left(\sum_i X_{ij}P_i\right) - q \right] \right\} P_k d\xi -$$

$$- \left[(N_{11} + k_{11}M_{11})P_k + (N_{12} + 2k_{22}M_{12})P_k + + H_{11}P_k + H_{12}P_k - M_{11}P_{k,1} + \left(M_{11,1} + 2M_{12,2} + Q_1^0\right)P_k \right]\Big|^{\xi=1} = 0 . \quad (37)$$

$$\left.\begin{array}{l}
\int_0^1 (N_{12} + 2k_{11}M_{12})P_k d\xi \Big|_{\eta=0}^{\eta=1} = 0 ; \\
\int_0^1 (N_{22} + 2k_{22}M_{22})P_k d\xi \Big|_{\eta=0}^{\eta=1} = 0 ; \\
\int_0^1 H_{12}P_k d\xi \Big|_{\eta=0}^{\eta=1} = 0; \\
\int_0^1 H_{22}P_k d\xi \Big|_{\eta=0}^{\eta=1} = 0; \\
\int_0^1 M_{22}P_k d\xi \Big|_{\eta=0}^{\eta=1} = 0; \\
\int_0^1 \left(M_{22,2} + 2M_{12,1} + Q_2^0\right)P_k d\xi \Big|_{\eta=0}^{\eta=1} = 0.
\end{array}\right\} \quad (38)$$

Таким образом мы получили систему вариационных уравнений (6.85) для определения функций $X_{ij}(\eta)$ и необходимое количество граничных условий (38). Следует отметить, что точность решения задачи существенно зависит от выбора аппроксимирующих функций $P_i(\xi)$. Если последние точно удовлетворяют граничным условиям задачи, то внеинтегральные члены в уравнениях (37) опускаются. В записанном виде уравнения (37) соответствует обобщенному методу интегральных соотношений, который не требует от аппроксимирующих функций удовлетворения статическим граничным условиям.

С учетом (32) и (33) из выражения (37) получаем интегральные уравнения трехслойного закрылка переменной жесткости:

$$\int_0^1 \left[\frac{B}{1-\nu^2}u_{1,11}^0 + \frac{B}{2(1+\nu)}u_{1,22}^0 + \frac{1}{1-\nu^2}B_{,1}u_{1,1}^0 + \frac{B}{2(1-\nu)}u_{2,12}^0 + \frac{\nu}{1-\nu^2}B_{,1}u_{2,2}^0 + \frac{B}{1-\nu^2}k_{11}w_{,1} + \right.$$

$$\left. + \frac{1}{1-\nu^2}B_{,1}k_{11}w + p_1 \right] P_k d\xi - \left\{ \frac{B}{1-\nu^2}(u_{1,1}^0 + \nu u_{2,2}^0 + k_{11}w) + \right.$$

$$\left. + k_{11}D\left[\eta_2(\alpha_{1,1} + \nu\alpha_{2,2}) - \eta_3(w_{,11} + \nu w_{,22})\right] \right\}\Big|^{\xi=1} = 0 ; \quad (39)$$

$$\int_0^1 \left[\frac{B}{2(1-\nu)}u_{1,12}^0 + \frac{1}{2(1+\nu)}B_{,1}u_{1,2}^0 + \frac{B}{2(1+\nu)}u_{2,11}^0 + \frac{B}{1-\nu^2}u_{2,22}^0 + \frac{1}{2(1+\nu)}B_{,1}u_{2,1}^0 + \right.$$

$$\left. + \frac{\nu}{1-\nu^2}k_{11}Bw_{,2} \right] P_k d\xi - \frac{B}{2(1+\nu)}(u_{1,2}^0 + u_{2,1}^0) \Big|^{\xi=1} = 0 ; \quad (40)$$

$$\int_0^1 \left\{ D\eta_1 \left[(\alpha_{1,11} + \nu\alpha_{2,12}) + \frac{1-\nu}{2}(\alpha_{1,22} + \alpha_{2,12}) \right] + D\eta_{1,1}(\alpha_{1,1} + \nu\alpha_{2,2}) - \right.$$

$$- D\eta_2\left[(w_{,111} + w_{,122})\right] - D\eta_{2,1}\left[(w_{,11} + \nu w_{,22})\right] + D_{,1}\left[\eta_1(\alpha_{1,1} + \nu\alpha_{2,2}) - \right.$$

$$\left. \left. - \eta_2(w_{,11} + \nu w_{,22})\right] - Gh_3\tau_1\alpha_1 \right\} \mathrm{P_k} d\xi - D\left[\eta_1(\alpha_{1,1} + \nu\alpha_{2,2}) - \eta_2(w_{,11} + \nu w_{,22})\right] \Big|^{\xi=1} = 0 ; \quad (41)$$

$$\int_0^1 \left\{ D\eta_1 \left[(\alpha_{2,22} + \nu\alpha_{1,12}) + \frac{1-\nu}{2}(\alpha_{1,12} + \alpha_{2,11}) \right] + \frac{1-\nu}{2}D\eta_{1,1}(\alpha_{1,2} + \alpha_{2,1}) - \right.$$

$$-\eta_2 D\left(\nabla^2 w\right)_{,2} - (1-\nu)D\eta_{2,1}w_{,12} + D_{,1}\left[\frac{1-\nu}{2}\eta_1\left(\alpha_{2,1}+\alpha_{1,2}\right) - (1-\nu)\eta_2 w_{,12}\right] -$$

$$-Gh_3\tau_1\alpha_2\Big\}P_k d\xi - (1-\nu)D\left[\frac{1}{2}\eta_1\left(\alpha_{1,2}+\alpha_{2,1}\right) - \eta_2 w_{,12}\right]\mathrm{P_k}\Big|^{\xi=1} = 0; \qquad (42)$$

$$\int_0^1 \Big\{D\eta_3\nabla^4 w + 2D\eta_{3,1}\left(\nabla^2 w\right)_{,1} + 2\eta_3 D_{,1}\left(\nabla^2 w\right)_{,1} + \left(D\eta_{3,11} + 2D_{,1}\eta_{3,1} + D_{,11}\eta_3\right)\left(w_{,11}+\nu w_{,22}\right) +$$

$$+ p_1 w_{,1} + \frac{B}{(1-\nu^2)R^2}w - D\eta_2\left[\left(\nabla^2\alpha_1\right)_{,1} + \left(\nabla^2\alpha_2\right)_{,2}\right] - \left(D_{,1}\eta_2 + D\eta_{2,1}\right)\left[2\alpha_{1,11} + (1-\nu)\alpha_{1,22} + (1+\nu)\alpha_{2,12}\right] -$$

$$-\left(D_{,11}\eta_2 + 2D_{,1}\eta_{2,1} + D\eta_{2,11}\right)\left(\alpha_{1,11}+\nu\alpha_{2,22}\right) + \frac{B}{1-\nu^2}k_{11}u^0_{1,1} - \frac{\nu}{1-\nu^2}k_{11}Bu^0_{2,2} - q\Big\}p_k d\xi +$$

$$+ \Big\{\left(Dp_{k,1} - D_{,1}p_k\right)\left[\eta_2\left(\alpha_{1,1}+\nu\alpha_{2,2}\right) - \eta_3\left(w_{,11}+\nu w_{,22}\right)\right] + D\left[\eta_{2,1}\left(\alpha_{1,1}+\nu\alpha_{2,2}\right) + \eta_2\left(\alpha_{1,11}+\nu\alpha_{2,12}\right) -$$

$$-\eta_{3,1}\left(w_{,11}+\nu w_{,22}\right) - \eta_3\left(\nabla^2 w\right)_{,1}\right]p_k - (1-\nu)D\left[\eta_2\left(\alpha_{1,22}+\alpha_{2,12}\right) - 2\eta_3 w_{,122}\right]p_k - Gh_3\tau_1\alpha_1 p_k\Big\}^{\xi=1} = 0. \qquad (43)$$

Удерживая два члена ряда в разложении (32), после применения процедуры метода интегральных соотношений к исходной системе уравнений (39)-(43), получим систему обыкновенных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами 24-го порядка, к решению которой применим модифицированный метод последовательных приближений, разработанный проф.В.А.Пухлий и изложенный им в академической печати [9-10].

С целью ускорения сходимости решения был использован метод телескопического сдвига степенного ряда Ланцоша в соответствии с которым ряды Мак-Лорена представлялись через смещенные полиномы Чебышева [11, 12].

Модифицированный метод последовательных приближений в смещенных полиномах Чебышева

Представим полученную систему обыкновенных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами (39)-(43) в виде системы уравнений 1-го порядка в нормальной форме Коши:

$$\frac{\mathrm{dX_m}}{\mathrm{d}\eta} = \sum_{v=1}^{S} B_{v,m}X_v + f_m \quad (m = 1, 2,.., s). \qquad (44)$$

В соответствии с методом переменные коэффициенты $\mathrm{B_{v,m}}$ и свободные члены f_m представим через смещенные полиномы Чебышева:

$$B_{v,m} = \sum_{r=0}^{q} b_{v,m,r} d_r^{-1} \sum_{k=0}^{r} a_k T_k^*(\eta);$$

$$f_m = \sum_{r=0}^{q} f_{m,r}\left(dr\cdot r!\right)^{-1} \sum_{k=0}^{k} a_k T_k^*(\eta). \qquad (45)$$

Здесь q – степень интерполяционного полинома; a_k – коэффициенты разложения η^r в ряд по многочленам Чебышева $\mathrm{T_k^*}(\eta)$. В выражениях (45) $\mathrm{d_r} = 1$ для $r = 0$ и $d_r = 2^{2r-1}$ для остальных r.

Общее решение системы уравнений (44) запишем следующим образом [11, 12]:

$$X_m = \sum_{\mu=1}^{S} C_\mu\left[d_0^{-1}a_0 T_0^*(\eta)\delta + \sum_{n=1}^{\infty} X_{m,\mu,n}\right] +$$

$$\sum_{j=0}^{q} t_{m,j,0}\left[d_{j+1}(j+1)!\right]^{-1}\sum_{k=0}^{j+1} a_k T_k^*(\eta) + \sum_{n=2}^{\infty} X_{m,n}. \qquad (46)$$

В выражении (46) $t_{m,j,0} = f_{m,r}$ при $j = r$; μ – номер фундаментальной функции; C_μ – постоянные интегрирования.

В решении (64) $\delta = 1$, если $\mathrm{m} = \mu$ и $\delta = 0$ для остальных μ.

Первое приближение $X_{m,\mu,1}$ получается из подстановки нулевого приближения: $\mathrm{d_0^{-1}}a_0 T_0^*(\eta)$ в правую часть однородной системы уравнений:

$$\frac{\mathrm{dX_m}}{\mathrm{d}\eta} = \sum_{v=1}^{S} B_{v,m}X_v.$$

Последующие приближения осуществляются по формулам:

$$X_{m,\mu,n} = \sum_{j=1}^{\beta} t_{m,\mu,n,j}\left[d_{n+j-1}(n+j-1)!\right]^{-1}\sum_{k=0}^{n+j-1} a_k T_k^*(\eta);$$

$$X_{m,n} = \sum_{j=1}^{\beta} t_{m,n,j}\left[d_{n+j-1}(n+j-1)!\right]^{-1} \sum_{k=0}^{n+j-1} a_k T_k^*(\eta),$$

где $\beta = n(q+3)-2$. (47)

Системы фундаментальных функций (65) являются равномерными сходящимися рядами, при этом коэффициенты $t_{m,\mu.n.j}$ и $t_{m,n,j}$ определяют через коэффициенты предыдущего приближения по рекуррентным формулам:

$$t_{m,\mu,n,j} = \sum_{v=1}^{S}\sum_{r=0}^{q} b_{v,m,r} \cdot t_{v,\mu,n-1,j-r}(n+j-1)^{-1} \prod_{\gamma=0}^{r}(n+j-1-\lambda);$$

$$t_{m,n,j} = \sum_{v=1}^{S}\sum_{r=0}^{q} b_{v,m,r} \cdot t_{v,n-1,j-r}(n+j)^{-1} \prod_{\gamma=0}^{r}(n+j-\gamma).$$

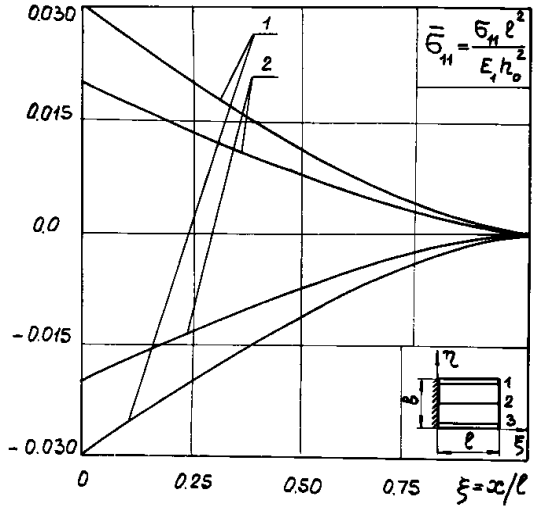


Рис.5. Эпюры нормальных напряжений $\bar{\sigma}_{11}^1$ и $\bar{\sigma}_{11}^2$ в закрылке шахтного вентилятора ВЦЗ-32.

Постоянные C_μ, входящие в общем решении (46) находятся из граничных условий (38) при $\eta = 0$ и $\eta = 1$.

Пример расчета

В соответствии с изложенным алгоритмом была составлена программа численной реализации разработанного аналитического решения на ЭВМ. Проводился расчет трехслойного закрылка вентилятора главного проветривания типа ВЦЗ-32 с легким заполнителем на основе армированного пенополиуретана. Исходные данные для расчета: для колеса: $R_2 = 1600$ см; z – количество лопаток, z = 8; n = 600 об/мин; для закрылка: l = 29 см; b = 73,4 см; R = 140 см; $h_1 = h_2 = 0{,}2$ см; $h_0 = 7{,}6$ см. Материал несущих слоев – сталь 20. Упругие параметры заполнителя определяли по методике, изложенной в [13]. Толщину профиля закрылка задавали табличным способом, при этом для интерполяции функций $h = h(\xi)$ и $h_3 = h_3(\xi)$ в аналитическом виде использовали кубические сплайны.

На рис.5 приведены эпюры нормальных напряжений $\bar{\sigma}_{11}$ в сечении II-II закрылка для верхнего и нижнего несущих слоев (кривые I) в сечениях I-I и III-III (кривые 2).

Заключение

1. Разработаны математическая модель и алгоритм решения задачи о напряженно-деформированном состоянии закрылка центробежного вентилятора главного проветривания рудников и шахт.

2. При построении модели закрылок схематизируется как консольная трехслойная оболочка переменной жесткости. Рассматривается заполнитель на основе армированного пенополиуретана.

3. Аналитическое решение задачи основано на применении метода интегральных соотношений Дородницына и модифицированного метода последовательных приближений в смещенных полиномах Чебышева.

4. Для ускорения сходимости предложенного решения использовался метод телескопического сдвига степенных рядов Ланцоша, при котором степенные ряды типа Мак-Лорена представляются через смещенные многочлены Чебышева.

Список литературы

1. Пухлий В.А., Коршунов Д.А., Пухлий К.В. Напряженно-деформированное состояние рабочих лопаток вентиляторов главного проветривания рудников и шахт. – Теория механизмов и машин (ТММ), том 18, №2(46), 2020 – Санкт-Петерб. политех. ун-т, с.
2. Пухлий В.А., Харченко А.Г. К теории трехслойных изотропных оболочек переменной жесткости. – Известия АН СССР, МТТ, 1982, №5, с.116-123.
3. Чебышев П.Л. О функциях мало удаляющихся от нуля при некоторых величинах переменной. - Полное собр. сочинений в 5-ти томах. – М., 1951, том 3, с.108-127.
4. Алберг Дж., Нильсон Э., Уолш Дж. Теория сплайнов и ее приложения. – М.: Мир, 1972. – 318 с.
5. Дородницын А.А. Об одном методе численного решения некоторых нелинейных задач аэрогидродинамики. – В кн.: Труды 3-го Всес. матем.

съезда, том III. – М.: Изд-во АН СССР, 1958, с.447-453.
6. Дородницын А.А. Об одном методе решения уравнений ламинарного пограничного слоя. – Журн. прикл. матем. и техн. физики, 1960, №3, с.111-118.
7. Ланцош К. Практические методы прикладного анализа. – М.: Физматгиз, 1961. – 524 с.
8. Люк Ю. Специальные математические функции и их аппроксимации. – М.: Изд-во «Мир», 1980. – 510 с.
9. Пухлий В.А. Метод аналитического решения двумерных краевых задач для систем эллиптических уравнений. – Журн. вычислит. матем. и матем. физики, 1978, том 18, №5, с.1275-1282.
10. Пухлий В.А. Об одном подходе к решению краевых задач математической физики. – Дифференциальные уравнения, 1979, том 15, №11, с.2039-2043.
11. 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.
12. Пухлий В.А. Практические методы прикладной и промышленной математики. – Обозрение прикладной и промышленной математики, 2019, том 26, вып.3, с.193-214.
13. Прочность, устойчивость, колебания. Справочник. Под ред. Н.А.Бергера и Я.Г.Пановко. – М.: Машиностроение, 1969, том 2, с.245-326.

References

1. Pukhliy V.A., Korshunov D.A., Pukhliy K.V. Stressed-deformed condition of working blades of fans of the main ventilation of mines and mines. - Theory of Mechanisms and Machines (TMM), Volume 18, No 2 (46), 2020 - St. Petersburg. Polytechn. un. p.
2. Pukhliy V.A. Three-layer orthotropic shells of variable stiffness. - Applied Mechanics, 1980, Volume 16, №. 9, pp. 48-55.
3. Chebyshev P.L. On functions that move little from zero for some values of a variable. - Complete sob. works in 5 volumes. - M., 1951, volume 3, pp. 108-127.
4. Alberg J., Nielson E., Walsh J. Theory of splines and its applications. - M .: Mir, 1972.- 318 p.
5. Dorodnitsyn A.A. About one method of numerical solution of some nonlinear problems of aerohydrodynamics. - In the book: Proceedings of the 3rd Vses. mate. Congress, Volume III. - M.: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR, 1958, p. 447-453.
6. Dorodnitsyn A.A. On a method for solving the equations of a laminar boundary layer. - Journal. adj. mate. and tech. Physics, 1960, №. 3, pp. 111-118.
7. Lantsosh K. Practical methods of applied analysis. - M .: Fizmatgiz, 1961 .-- 524 p.
8. Luke Yu. Special mathematical functions and their approximations. - M.: Mir Publishing House, 1980. - 510 p.
9. Pukhliy V.A. A method for the analytical solution of two-dimensional boundary value problems for systems of elliptic equations. - Journal. will calculate. mate. and mat. Physics, 1978, Volume 18, №. 5, pp. 1275-1282.
10. Pukhliy V.A. About one approach to solving boundary value problems of mathematical physics by the modified method of successive approximations. – Differential Equations, 1979, vol.15, №11, p.2039-2043.
11. Pukhliy V.A. The solution of initial-boundary value problems of mathematical physics by the modified method of successive approximations. - Review of Applied and Industrial Mathematics, 2017, Volume 24, Issue 1, pp. 37-48.
12. Pukhliy V.A. Practical methods of applied and industrial mathematics. - Review of Applied and Industrial Mathematics, 2019, Volume 26, Issue 3, p .93-214.
13. Strength, stability, fluctuations. Directory. Ed. I.A. Birgera and Ya.G. Panovko. - M.: Mechanical Engineering, 1969, Volume 2, p.245-326.

УДК 539.1

О средней плотности потока космических нейтронов по земному шару

М.А. Фролова, П.А. Пономаренко
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Институт ядерной энергии и промышленности, г. Севастополь, РФ, frolova-85@mail.ru

Статья поступила 06.05.2020 г.; после доработки 07.05.2020 г.

Аннотация

Статья посвящена оценке и анализу генерации нейтронов космического происхождения по земному шару, учитывая распределение нейтронов тепловых энергий по высоте атмосферы в пределах тридцати километров. Оценена создаваемая при этом мощности эквивалентной дозы, которая составила треть от годовой дозовой нагрузки на население.

Ключевые слова: нейтрон, космический нейтрон, плотность потока, энергия

On the average density of the cosmic neutron flux around the globe

M.A. Frolova, P.A. Ponomarenko
Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education Sevastopol State University, Sevastopol, Russia, frolova-85@mail.ru

Received 06.05.2020 y.; received in final form 07.05.2020 y.

Abstract

The article is devoted to the assessment and analysis of neutrons of cosmic origin on the globe. Estimates of the equivalent dose created at this power, which is one third of the annual dose burden on the population

Keywords: neutron, cosmic neutron, flux density, energy

Введение

Как известно, первичные космические лучи преобладают на высотах более 30 км. Плотность частиц космических лучей при этом близка к плотности равной ~ 4 част·см$^{-2}$·с$^{-1}$. Энергия данных частиц очень велика и встречаются частицы с энергией равной 10^{20} эВ.

В атмосфере Земли каждая космическая частица с энергией $E \geq 10^{14}$ эВ генерирует ~ 10^9 частиц и более вторичных космических лучей.

Поток вторичных частиц называется широким атмосферным ливнем. Почти все частицы из этого ливня короткоживущие, то есть период полураспада их составляет $T_{0,5}=10^{-19} \div 10^{-6}$ с. Сталкиваясь между собой и с ядрами элементов, составляющих атмосферы, они генерируют новые элементарные частицы: электроны, позитроны, протоны, нейтроны, γ-кванты, нейтрино и антинейтрино и др., которые являются космическими лучами.

Эти вторичные космические лучи делят на жёсткую и мягкую составляющие. К жёсткой составляющей относят μ-мезоны, которые проникают до глубины 1 км и более в атмосферу и океанскую воду. Мягкая (легкопоглощаемая) составляющая состоит из β^+, β^-, $_1{}^1$p, $^1{}_0$H, γ.

Особо активными в этой составляющей являются $_1{}^1$p и $^1{}_0$n. При их взаимодействии с ядрами элементов, составляющих атмосферы, рождаются космогенные радионуклиды: $^3{}_1$H, ^{7}Be, ^{10}Be, $^{14}{}_6$C, ^{22}Na, ^{24}Na и др [1]. По данным НКДАР на 1982 г. для средних широт над уровнем моря

мощность поглощенной дозы космического излучения на открытой местности на мягкие ткани без учета нейтронной составляющей была равной 0,28 мГр·год$^{-1}$. При коэффициенте качества нейтронной компоненты, равному 6 (шести), годовая эквивалентная доза на тот период от космического излучения составляла примерно 0,3 мЗв·год$^{-1}$. Недавние рекомендации МКРЗ предлагают дозовую нейтронную компоненту по коэффициенту качества увеличить вдвое и принять равной 0,042 мЗв·год$^{-1}$[2]. Одновременно предполагается ионизационную компоненту космических лучей принять равной 0,24 мЗв·год$^{-1}$. Нейтронная и протонная космическая составляющие оказывают основное влияние на качественный и количественный состав космогенных радионуклидов на Земле. Так, активность нейтронной составляющей зависит от энергии нейтронов.

Цель исследования – оценка средней по атмосфере Земли плотности потока космических нейтронов тепловой энергии и их биологической значимости.

Задачи исследования

1. Оценить среднюю плотность потока космических нейтронов тепловых энергий в атмосфере;
2. Оценить годовую эффективную эквивалентную дозу космических нейтронов тепловых энергий (0,005÷0,5 эВ).
3. Оценить годовую эффективную эквивалентную дозу космических нейтронов надтепловых энергий.

Материалы и методы

Известно, что скорость образования космогенного радиоуглерода составляет 2,5 атома за с на 1 см^2 поверхности Земли [2].

Физические модели образования радиоуглерода представлены в [3] и имеют вид:

$$\begin{matrix} {}^{13}_{6}\mathrm{C}\ (\mathrm{H},\gamma)\ {}^{14}_{6}\mathrm{C}, \\ {}^{14}_{7}\mathrm{N}\ (\mathrm{H},\mathrm{p})\ {}^{14}_{6}\mathrm{C} \\ {}^{17}_{8}\mathrm{O}\ (\mathrm{H},\alpha)\ {}^{14}_{6}\mathrm{C} \end{matrix} \quad (1)$$

Особенностью этих моделей является то, что они отображают образование радиоуглерода в поле тепловых космических нейтронов. Это значит, что модели справедливы для количества $^{13}_{6}$C, $^{14}_{7}$N и $^{17}_{8}$O в массе атмосферы Земли ниже 30 км. Общая масса атмосферы составляет $5{,}15\cdot10^{15}$ т. В зону атмосферы 30 км входит полностью тропосфера и 0,5 стратосферы. Общую массу атмосферы в тридцати километровой зоне предлагается оцениваться в $4{,}581\cdot10^{15}$ т. Если допустить, что в этом количестве атмосферы сохраняются численные значения процентного состава составляющих для всей атмосферы, то масса азота в ней будет $m_O^{30\ км} = 1{,}054\cdot\ 10^{15}$ т, а масса углерода $m_C^{30\ км} = 7{,}91\cdot10^{11}$ т.

В этих количествах азота, кислорода и углерода число ядер $^{14}_{7}$N, $^{17}_{8}$O и $^{13}_{6}$C, соответственно, будет равно: $N_{N\text{-}14}=1{,}48\cdot10^{44}$ ядер, $N_{O\text{-}17}=1{,}38\cdot10^{40}$ ядер, $N_{C\text{-}13}=4{,}03\cdot10^{38}$ ядер.

После количественной характеристики ядер представляется возможность оценить скорости образования $^{14}_{7}$C в атмосфере Земли, используя зависимость

$$\frac{dN_q}{dt} = \sigma_i \cdot N_i \cdot \overline{\varphi}$$

и данные [4], обработав их с использованием зависимости:

$$A_i = \lambda_i \cdot N_i, \quad (1)$$

где: $\frac{dN_q}{dt}$ – скорость образования дочернего нуклида, яд·с$^{-1}$; σ_i – эффективное микроскопическое сечение материнского ядра для нейтронов определенной энергии (в данном случае космических нейтронов тепловой энергии), см^2; $\overline{\varphi}$ – средняя плотность потока космических нейтронов теплового спектра в толще атмосферы 30 км над уровнем Земли, н·см$^{-2}$·с$^{-1}$; A_i – активность дочернего радионуклида, Бк; λ_i – постоянная распада радионуклида, с$^{-1}$; N_i – число радиоактивных ядер радионуклида.

В результате по трем приведенным ранее физическим моделям (1) получим три уравнения для скоростей реакций образования в тридцати километровой толще атмосферы углерода $^{14}_{6}$C в нейтронном поле космических нейтронов тепловых энергий:

$$\sigma^{тепл}_{C-13}\cdot N_{C-13}\cdot\overline{\varphi_{тепл}} = 1{,}37\cdot10^{10}\ яд/с, \quad (2)$$
$$\sigma^{тепл}_{N-14}\cdot N_{N-14}\cdot\overline{\varphi_{тепл}} = 1{,}25\cdot10^{19}\ яд/с, \quad (2.1)$$
$$\sigma^{тепл}_{O-17}\cdot N_{O-1}\ \cdot\overline{\varphi_{тепл}} = 2{,}88\cdot10^{14}\ яд/с \quad (2.2)$$

Подставляя в эти уравнения $\sigma_i^{тепл}$ [5] и определенные ранее N_i для углерода-13, азота-14 и кислорода-17 значения для числа ядер в тридцати километровой толще атмосферы, получим три значения средней плотности потока нейтронов тепловой энергии одного и того же поля

нейтронов космического происхождения:

$$\overline{\varphi_{\text{тепл}}^{\text{C}-13}} = 0{,}0378\ \text{н/см}^2\text{с} \quad (3)$$

$$\overline{\varphi_{\text{тепл}}^{\text{N}-14}} = 0{,}0482\ \text{н/см}^2\text{с} \quad (3.1)$$

$$\overline{\varphi_{\text{тепл}}^{\text{O}-17}} = 0{,}0435\ \text{н/см}^2\text{с} \quad (3.2)$$

Таким образом, средняя плотность потока космических нейтронов тепловой энергии в приземной атмосфере толщиной 30 км, определяется как среднеарифметическая величина по приведенным трем значениям $\overline{\varphi}$, будет равна:

$$\overline{\varphi_{\text{тепл}}^{\text{космич}}} = 0{,}0432\,\frac{\text{н}}{\text{см}^2\text{с}} \quad (4)$$

Эквивалентная годовая доза космических нейтронов тепловой энергии на поверхности Земли будет (см. значение удельной максимальной эквивалентной дозы hм бэр·см^2·н$^{-1}$ [6])

$$\text{P}_{\text{косм.H}_\text{т}} = \overline{\varphi_{\text{тепл}}^{\text{космич}}} \cdot \text{h}_{\text{тепл}} = 0{,}0432 \cdot \frac{\text{н}}{\text{см}^2\text{с}} \cdot 9 \cdot 10^{-10}\,\frac{\text{бэр·см}^2}{\text{н}} = 3{,}89 \cdot 10^{-11}\,\frac{\text{бэр}}{\text{с}} = 0{,}0122\,\frac{\text{мЗв}}{\text{год}} \quad (5)$$

Рекомендованная МКРЗ годовая эффективная эквивалентная доза космических нейтронов всех энергий составляет 0,042 мЗв·год$^{-1}$. Таким образом, эффективная годовая эквивалентная доза космических нейтронов надтепловых энергий составляет:

$$\text{P}_{\text{косм.н/т}} = 0{,}0298\ \frac{\text{мЗв}}{\text{год}} \quad (6)$$

Результаты и обсуждение

В результате проведенного анализа скорости образования космогенного радиоуглерода $^{14}_{6}$C оценена:

– средняя плотность потока космических нейтронов тепловых энергий в атмосфере:

$$\overline{\varphi_{\text{тепл}}^{\text{космич}}} = 0{,}0432\,\frac{\text{н}}{\text{см}^2\text{с}};$$

– годовая эффективная эквивалентная доза космических нейтронов тепловых энергий (0,005÷0,5 эВ) [7] составляет:

$$\text{P}_{\text{косм.H}_\text{т}} = 0{,}0122\ \frac{\text{мЗв}}{\text{год}};$$

– годовая эффективная эквивалентная доза космических нейтронов надтепловых энергий составляет:

$$\text{P}_{\text{косм.н/т}} = 0{,}0298\ \frac{\text{мЗв}}{\text{год}},$$

что составляет треть от годовой эквивалентной дозы облучения для населения.

Выводы

Таким образом, при оценке и анализе генерации нейтронов космического происхождения по земному шару была рассчитана средняя плотность потока тепловых нейтронов в тридцати километровой зоне атмосферы, которая составила 0,0432 н·см$^{-2}$·с$^{-1}$. При данной плотности потока тепловых нейтронов мощность эквивалентной дозы составляет одну треть от годовой допустимой дозы облучения для населения.

Список литературы

1. *Бекман, И. Н.* Радиоэкология и экологическая радиохимия : учебник для бакалавриата и магистратуры / И. Н. Бекман. - 2-е изд., испр. и доп. - Москва : Юрайт, 2016. - 407, [1] с. : ил., табл.
2. *Козлов В.Ф.* Справочник по радиационной безопасности / В.Ф.Козлов, 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1991 – 352 с.
3. *Филиппов, Е. М.* Радиационная экология / Е.М. Филиппов. – Севастополь, 2003 – 241 с.
4. *Филиппов, Е.М.* Возможности использования нейтронов космического фонда для изучения солесодержания морских вод / Е.М.Филиппов // 1984. Авторский оттиск «Атомная энергия» том 56.
5. *Саркисов, А.А.* Физические основы эксплуатации ядерных паропроизводящих установок /А.А.Саркисов, В.Н.Пучков. – М.: ЭАИ, 1989. – 504с.
6. *Гордеев, И.В.* Справочник по ядерно-физическим константам длярасчета реакторов / И.В Гордеев, Д.А. Кардашев, А.В.Малышев. – Москва.:Издательство государственного комитета совета министров СССР по использованию атомной энергии, - 1960г. – 278 с.
7. Справочник по ядерной физике / Перевод с английского под редакцией Л.А.Арцимовича. – М.: Гос.издат физико-математической литературы, 1963. – 632 с.

References

1. Bekman, I. N. Radioekologiya i ekologicheskaya radiohimiya : uchebnik dlya bakalavriata i magistratury / I. N. Bekman. - 2-e izd., ispr. i dop. - Moskva : YUrajt, 2016. – p. 407.
2. Kozlov V.F. Spravochnik po radiacionnoj bezopasnosti / V.F.Kozlov, 4-e izd., pererab. i dop. – M.: Energoatomizdat, 1991 – p. 352.

3. Filippov, E. M. Radiacionnaya ekologiya / E.M. Filippov. – Sevastopol', 2003 – p. 241.
4. Filippov, E.M. Vozmozhnosti ispol'zovaniya nejtronov kosmicheskogo fonda dlya izucheniya solesoderzhaniya morskih vod / E.M.Filippov // 1984. Avtorskij ottisk «Atomnaya energiya» tom 56.
5. Sarkisov, A.A. Fizicheskie osnovy ekspluatacii yadernyh paroproizvodyashchih ustanovok /A.A.Sarkisov, V.N.Puchkov. – M.: EAI, 1989. – p. 504.
6. Gordeev, I.V. Spravochnik po yaderno-fizicheskim konstantam dlyarascheta reaktorov / I.V Gordeev, D.A. Kardashev, A.V.Malyshev. – Moskva.:Izdatel'stvo gosudarstvennogo komiteta soveta ministrov SSSR po ispol'zovaniyu atomnoj energii, - 1960g. – p. 278.
7. Spravochnik po yadernoj fizike / Perevod s anglijskogo pod redakciej L.A.Arcimovicha. – M.: Gos.izdat fiziko-matematicheskoj literatury, 1963. – p.632.

НЕТРАДИЦИОННЫЕ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

УДК 621.311.1

Практика применения программно-вычислительных комплексов и программ для расчета оптимальных конфигураций электрических сетей

И.А. Кочетов[1], Н.М. Шайтор[2]
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская 33, г. Севастополь, 299053, Россия, [1]kochetov.vano@mail.ru, [2]Shaytor1950@mail.ru

Статья поступила 30.04.2020 г.; после доработки 06.05.2020 г.

Аннотация
Рассматриваются актуальные вопросы использования программно-вычислительных комплексов и программ для расчета оптимальных электрических сетей.

Ключевые слова: электроэнергетика, расчет электрических сетей оптимальная конфигурация сетей, компьютерные программы, программно-вычислительные комплексы.

Application practice complexes and programs for calculating optimal electrical network configurations

I.A. Kochetov[1], N.M. Shaytor[2]
Sevastopol, State University, 33 Vniversitetskaya str., Sevastopol, 299053, Russia.
[1]kochetov.vano@mail.ru, [2]Shaytor1950@mail.ru

Received 30.04.2020 y.; received in final form 06.05.2020 y.

Abstract
Topical issues of using software and computer systems and programs for calculating optimal electrical networks are considered.

Keywords: electric power industry, calculation of electric networks, optimal network configuration, computer programs, software and computer systems.

Ведение

В настоящее время существует достаточное количество математических моделей, компьютерных программ и программных вычислительных комплексов (ПВК), предназначенных для решения разнообразных задач, возникающих при проектировании и эксплуатации электросетевых комплексов и других объектов электроэнергетики и электротехники.

Вместе с тем при решении одних и тех же задач с использованием различного программного обеспечения невозможно получить строго одинаковые результаты.

Проблема заключается в неизбежности численных погрешностей и некотором разбросе результатов расчета при использовании различных компьютерных программ.

Цели

Целью исследований является определение степени отклонений численных результатов расчета оптимальной конфигурации проектируемой электрической сети при решении задачи оптимизации с помощью различных программ и ПВК, а также определение возможной точности расчетов.

Задачи

Оптимальный вариант конфигурации заданной электрической сети получают путем исследования потерь энергии для различных возможных конфигураций заданной сети.

При этом число решаемых задач по расчету электрических потерь соответствует числу возможных конфигураций электрических сетей.

Общая характеристика ПВК используемых для расчётов электрических параметров ЭЭС.

В настоящее время для расчета и моделирования установившихся, переходных и электромеханических режимов электроэнергетических систем (ЭЭС) применяется множество отечественных и зарубежных программ.

Электрические расчёты выполняются для определения электрических параметров сети во всех возможных режимах работы: нормальных, аварийных, послеаварийных, утяжелённых и т.д. Выполнение полного комплекса расчётов режимов позволяет правильно выполнить выбор силового оборудования, настройку уставок устройств РЗА и ПА, выбор измерительных комплексов, определить необходимые резервы мощности на электрических станциях, оптимизировать потери электрической энергии в сети и т.п.

Изначально для каждого типа режимов, отличающихся по времени протекания, контролируемым и рассчитываемым параметрам разрабатывались отдельные программно-вычислительные комплексы.

Однако, даже при создании первоначальных версий программ для компьютеров с весьма «скромными» ресурсами их авторы старались унифицировать программные комплексы, то есть создать наиболее практичные и удобные инструменты.

Повышение конкурентоспособности продуктов заставляет разработчиков постоянно развивать программные комплексы для расширения области их применения и унификации. Это дало толчок к развитию модульных программных продуктов, которые можно приобретать по частям (по модулям) для решения узкоспециализированных задач.

Расчет оптимальных режимов районных электрических сетей

Оптимизация режимов работы ЭЭС – это сложная многоуровневая задача. К ее решению необходимо подходить комплексно на всех иерархических уровнях ЭЭС.

Оптимальный режим энергосистемы – это режим, удовлетворяющий условиям надежности и качества электроэнергии, при котором обеспечивается минимум затрат при заданной нагрузке потребителей.

Оптимальное управление режимами достигается различными способами:

– путем выбора конфигурации электрических сетей;
– выбором состава включенного в работу оборудования;
– управлением параметрами режима энергосистемы.

Для решения поставленной задачи электроснабжения района города рассматривался кольцевой вариант проектируемой линии электропередачи (ЛЭП) 10 кВ, получающей электроснабжение от распределительного пункта РП-1 (Рис. 1).

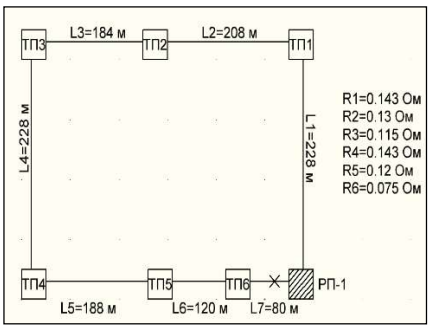


Рис. 1. Схема электроснабжения

При этом все другие возможные варианты заданной сети, исследуемой на предмет оптимальной конфигурации, были получены путем поочередного разрыва частей ЛЭП, концы которой подсоединены к двум соседним трансформаторным подстанциям (ТП). Нагрузка на подстанции ТП1–ТП6 получена расчетным путем для

проектируемого района города .

В ходе проектирования электроснабжения района города были выбраны сечения проводников ЛЭП, соединяющих трансформаторные подстанции, в зависимости от их нагрузок.

Аналогично выбраны сечения проводников, по которым рассчитаны электрические сопротивления ЛЭП.

Расчет проектируемой системы электроснабжения производился тремя способами:

1) классическим методом, с помощью программы MathCAD;
2) с помощью программы «Uer» инженера Козурмана;
3) с помощью ПВК RastrWin3.

Результаты расчета классическим методом, с помощью программы MathCAD.

Приведен расчёт от конца к началу линии, рассчитана сумма потерь всех участков (Рис. 2).

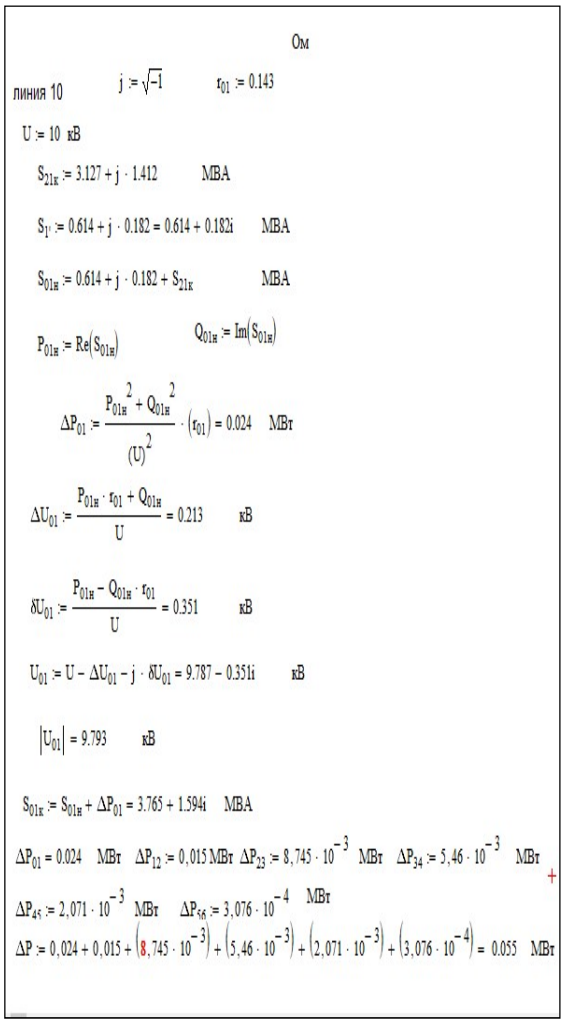


Рис. 2. Расчёт с помощью программы MathCAD

Результаты расчета программы «Uer» инженера Козурмана

Для расчета составлена схема электроснабжения (Рис. 3), проведен расчёт всех участков и определены их потери.

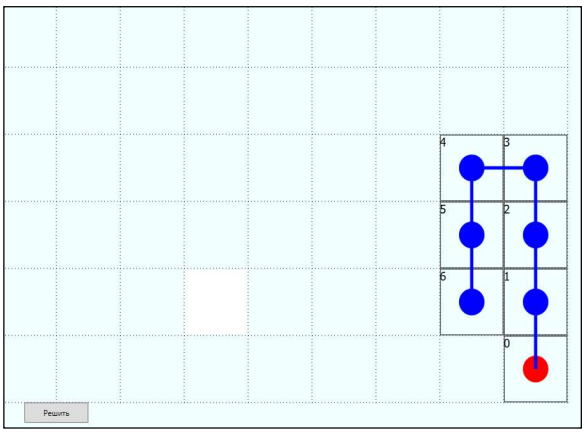


Рис. 3. Схема электроснабжения в программе «Uer» инженера Козурмана.

Результаты расчётов

Узлы схемы

Узел № 0 базисный Напряжение 10,000

Узел № 1 обычный Напряжение 9,946 Токи узла 0,036-0,011i Заданная нагрузка узла 0,614+0,182i Проводимость узла 0,000

Узел № 2 обычный Напряжение 9,905 Токи узла 0,037-0,014i Заданная нагрузка узла 0,627+0,248i Проводимость узла 0,000

Узел № 3 обычный Напряжение 9,877 Токи узла 0,036-0,011i Заданная нагрузка узла 0,614+0,182i Проводимость узла 0,000

Узел № 4 обычный Напряжение 9,850 Токи узла 0,036-0,011i Заданная нагрузка узла 0,614+0,182i Проводимость узла 0,000

Узел № 5 обычный Напряжение 9,835 Токи узла 0,037-0,015i Заданная нагрузка узла 0,627+0,248i Проводимость узла 0,000

Узел № 6 обычный Напряжение 9,830 Токи узла 0,036-0,011i Заданная нагрузка узла 0,614+0,182i Проводимость узла 0,000

Ветви схемы

Ветвь № 0 Узлы 0-->1 Сопротивление 0,143 Ток 0,228 Переток 3,757+1,240i Потери 0,022+0,000i

Ветвь № 1 Узлы 1-->2 Сопротивление 0,130 Ток 0,191 Переток 3,121+1,057i Потери 0,014+0,000i

Ветвь № 2 Узлы 2-->3 Сопротивление 0,115 Ток 0,152 Переток 2,481+0,807i Потери 0,008

Ветвь № 3 Узлы 3-->4 Сопротивление 0,143

Ток 0,115 Переток 1,860+0,622i Потери 0,006

Ветвь № 4 Узлы 4-->5 Сопротивление 0,120 Ток 0,077 Переток 1,241+0,437i Потери 0,0020,000i

Ветвь № 5 Узлы 5-->6 Сопротивление 0,075 Ток 0,038 Переток 0,613+0,186i Потери 0,000

Суммарные потери активной мощности: 0,053

Суммарные потери реактивной мощности: 0,00

Результаты расчета при поддержке ПВК RastrWin3

Для расчета составлена электрическая схема электроснабжения (Рис. 4).

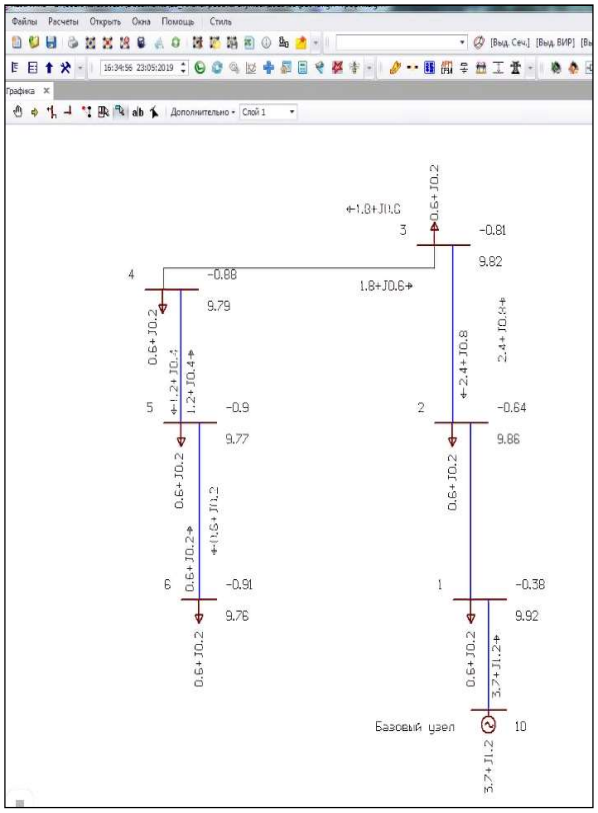


Рис. 4. Схема электроснабжения в программе RastrWin3.

Произведен расчёт всех участков, рассчитаны потери всех участков (Рис. 5)

В полученных результатах, приведенных на рисунках 3 – 6, существует расхождение. В качестве базового варианта, с которым произведено сравнение результатов на предмет их расходимости, использовано программное средство MATHCAD. При этом отклонения в расчётах потери активной мощности в ЛЭП от базового расчёта для RastrWin3 составило 7%, а для программы «Uer» -3,6%.

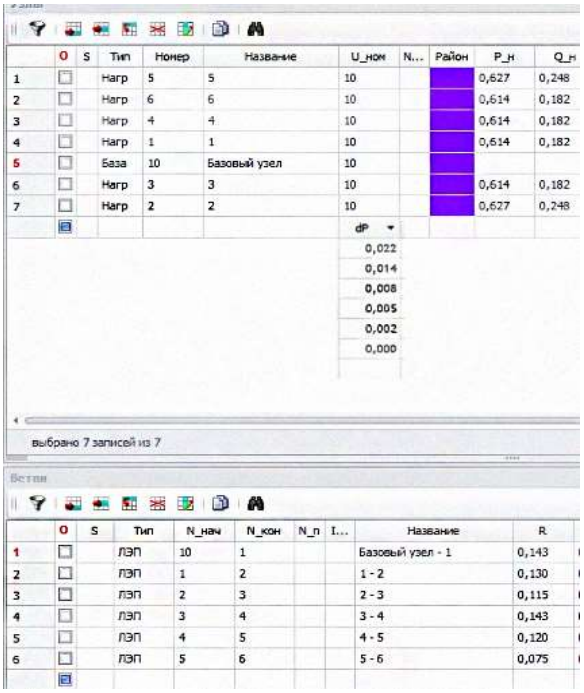


Рис. 5. Расчёт с помощью RastrWin3

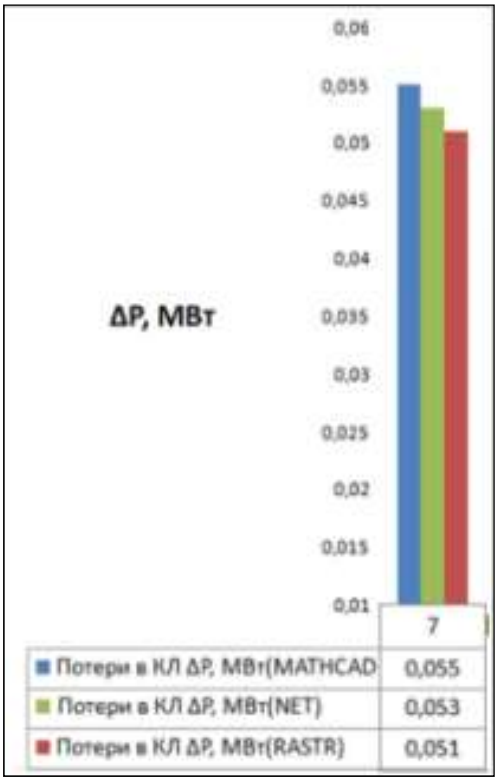


Рис. 6. Диаграмма активных потерь мощности в ЛЭП при различных схемах электроснабжения

Заключение

В настоящее время при проектировании ЭЭС обычной практикой стал переход от ручных механизмов расчета к расчету на ЭВМ, с помощью с помощью специальных программ и ПВК.

В ходе исследования проведен расчет оптимальных вариантов схем электроснабжения проектируемой сети 10 кВ аналитическим методом, с использованием программных средств MATHCAD, а так же с использованием программы Uer, и ПВК RastrWin3.

В качестве базового варианта, с которым произведено сравнение результатов на предмет их расходимости, использовано программное средство MATHCAD. При этом отклонения в расчётах потери активной мощности в ЛЭП от базового расчёта для RastrWin3 составило 7%, а для программы «Uer» -3,6%.

Объективность полученных результатов при проектировании сети электроснабжения и выбора оптимального варианта подтверждается сходимостью результатов при использовании трех различных программных средств.

Вместе с тем для решения относительно простых задач оптимизации с электрическими сетями, содержащими несколько десятков узлов, можно обойтись и без сложных ПВК. Для этого достаточно применение программы MATHCAD, или простой и удобной программы «Uer», разработанной инженером Козурманом. Результаты оптимизационных расчетов системы электроснабжения и практика использования программного обеспечения для решения оптимизационных задач ЛЭП могут быть использованы при проектировании системы электроснабжения микрорайона города.

Список литературы

1. Обухов С.Г. Математическое моделирование в системах электроснабжения - Издательство Томского политехнического университета 2014.
2. Казакул А.А. Промышленные программно-вычислительные комплексы в электроэнергетике - Издательство АмГУ 2013.
3. Баладян Н.П. Методы расчёта установившего режима электро-энергетической системы – Издательство Владимир 2016.
4. Королёв С. А., Волкова Е. И. Разработка методики оценки эффективности для комплекса типовых энергосберегающих мероприятий / Математическое и компьютерное моделирование технических и социально-экономических систем: Материалы Регион. научно-технич. конф. (Ижевск, 14 мая 2010 г.). – Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2010. – С. 27–29.
5. Коноплёв К.Г. Руководство по выполнению электрической части дипломных проектов по тематике «Электрообеспечение района города». – Севастополь, СНИЯЭиП, 2002. – 84 с.
6. Артемов М.А. Математическое моделирование и компьютерный эксперимент / М.А. Артемов, Е.Н. Коржов – Воронеж: ВГУ, 2001. – 64 с.
7. Курганов С.А. Схемно-алгебраическое моделирование и расчет линейных электрических цепей / С. А. Курганов, В. В. Филаретов: учебное пособие. - Ульяновск : УлГТУ, 2005. - 319 с.
8. Идельчик В.И. Расчеты и оптимизация режимов электрических сетей и систем. Москва: Энергоатомиздат, 1988.

References

1. Obukhov S. G. Mathematical modeling in power supply systems-Tomsk Polytechnic University Publishing house 2014.
2. Kazakul A. A. Industrial software and computer systems in the electric power industry-AMSU Publishing house 2013.
3. Baladyan N. P. Methods of calculating the established mode of the electric power system-Vladimir Publishing house 2016.
4. Korolev S. A., Volkova E. I. Development of methods for evaluating efficiency for a complex of typical energy-saving measures / Mathematical and computer modeling of technical and socio-economic systems: Materials of the Regi-on. scientific and technical. Conf. (Izhevsk, may 14, 2010). - Izhevsk: Izd-vo IzhSTU, 2010. - Pp. 27-29.
5. Konoplev K. G. Guide to the implementation of the electrical part of diploma projects on the topic "Electrical supply of the city district". – Sebastopol, Sniyaeip, 2002. - 84 p.
6. Artemov M. A. Mathematical modeling and computer experiment / M. A. Artemov, E. N. Korzhov-Voronezh: VSU, 2001. - 64 p.
7. Kurganov S. A. Schematic-algebraic modeling and calculation of linear electric circuits / S. A. Kurganov, V. V. Filaretov: textbook. - Ulyanovsk: UlSTU, 2005. - 319 p.
8. Idelchik V. I. Calculations and optimization of modes of electric networks and systems. Moscow: Energoatomizdat, 1988.

УДК 620.92

Функциональный блок контроля для солнечных батарей

В.В. Кувшинов[1], Е.Г. Какушина[2], Д.А. Каширин [3], Д.Ф. Бордан[4], А.А. Восканян[5]
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, [1]kuvshinov.vladimir@gmail.com, [2]littie@mail.ru, [3]jaens@bk.ru , [4]bordan@mail.ru, [5]voskanyan@gmail.com[19]

Статья поступила 15.05.2020 г.; после доработки 19.05.2020 г.

Аннотация

В работе предложены новые типы вспомогательного оборудования для системы солнечная электрогенерирующая установка – аккумуляторная батарея. Разработанный тип функционального блока повышает эффективность работы энергетической станции и способствует более долговечной работе всего оборудования.

Ключевые слова: блок контроля для солнечной установки, аккумуляторные батареи, возобновляемая энергетика, солнечные панели, экология, распределенная энергетика

Functional control unit for solar panels

V.V. Kuvshjnov[1], E.G. Kakyshina[2], D.A. Kashirin[3], D.F. Bordan[4], A.A. Voskanyan[5]
Sevastopol state university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia.
1kuvshinov. [1]kuvshinov.vladimir@gmail.com, [2]littie@mail.ru, [3]jaens@bk.ru , [4]bordan@mail.ru, [5]voskanyan@gmail.com

Received 15.05.2020 y.; received in final form 19.05.2020 y.

Abstract

The paper proposes new types of auxiliary equipment for the solar power generating system-battery battery. The developed type of functional block increases the efficiency of the power plant operation and contributes to a more durable operation of all equipment.

Keywords: control unit for solar installations, batteries, renewable energy, solar panels, ecology, distributed energy

Введение

На данный момент происходит рост в области использования альтернативных источников энергии. Основной задачей на современном этапе стоит возможность индивидуального снабжения электрической энергией потребителей, удалённых от централизованной инфраструктуры энергоснабжения. Также за счет увеличения автономных потребителей происходит снижение энергопотребления от общей энергосистемы.

Если рассмотреть глобальное внедрение возобновляемых источников энергии, следует отметить рост тенденции в данной области [1]. Во многих странах данные источники электроэнергии обеспечивают более 50% выработки электроэнергии, а в некоторые странах практически полностью осуществлен переход на альтернативные источники электропитания. В настоящее время одними из основных мировых проблем являются проблемы, связанные с экологией. Здания не только ухудшают природу, но и потребляют высокое количество энергии: 40 % энергии в мире расходуется на освещение, работу кондиционеров, отопление и т. д. При внедрении ряда инноваций по энергоэффективности можно улучшить экологическую ситуацию в мире.

Для эффективного использования микрогенерации фотоэлектрическими системами необходимо использовать комбинированные установки, в которых одним из основных компонентов будет являться аккумуляторная батарея

(АКБ). Из возможных видов систем распределенной генерации в данной работе будет рассмотрен автономный блок, увеличивающий КПД и срок хранения аккумуляторной батареи на солнечных электростанциях [3].

Постановка задачи и цели исследования

Солнечные батареи (далее – СБ) — это основной блок солнечной электростанции, который генерирует электроэнергию благодаря попаданию прямых или отраженных солнечных излучений на панель [2].

В данный момент времени эффективность кремниевых фотоэлементов считается достаточно высокой. Их КПД достигает 10—30%, а чем выше КПД, тем меньше нужна площадь солнечных батарей или их количество.

Используя энергию солнца, можно ежегодно экономить традиционные источники отопления:

— до 75% — для горячего водоснабжения в течение года;
— до 95% — для горячего водоснабжения при сезонном использовании;
— до 50% — с целью отопления;
— до 80% — с целью поочередного отопления.

Выбор количества устанавливаемых панелей зависит от суммарной потребляемой мощности энергопринимающих устройств в сутки. Оперируя тем фактом, что нормальная работа системы, потребление (дом) – генерация (СБ), зависит от равнозначной выработки и использования этой энергии, необходимо учесть тот факт, что существуют временные промежутки нестабильной выработки, а также малое потребление заряда [7,8].

Для решения задачи преизбыточной генерируемой энергии справляется аккумуляторная батарея (далее – АКБ). Благодаря её использованию реализуется возможность накопление заряда, и применение его в час повышенного энергопотребления. Для эффективной работы АКБ необходимо использовать контроллер заряда.

Контроллеры заряда-разряда (далее - КЗР) аккумуляторных батарей в солнечных фотоэлектрических установках контролируют уровни заряда и разряда. При необходимости отключают или пере подключают СБ с АКБ на нагрузку. КЗР в первую очередь необходимы для оптимизации и регулировки режимов заряда/разряда АКБ с целью продления их срока службы. Систематический перезаряд приводит к кипению электролита и вспучиванию герметичных АКБ. Глубокий же разряд опасен для АКБ тем, что ведет к сульфатации пластин и прекращению работоспособности АКБ. Особенно чувствительны к перезаряду и переразряду свинцово-кислотные АКБ.



Рис.1. Упрощенная структурная схема контроллера заряда.

Таким образом, КЗР выступает своеобразным связующим звеном между СБ и АКБ (рис. 1.). В его основные функциональные обязанности входит: автоматическое подключение СБ на заряд АКБ; многостадийный заряд АКБ; автоматическое отключение СБ при полном заряде АКБ; автоматическое отключение нагрузки при установленном уровне разряда АКБ; подключение нагрузки при достаточном заряде АКБ [4,5].

Наибольшее распространение в СБ получили КЗР двух типов:

1) КЗР с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ; PWM — Pulse-width modulation);

2) КЗР с алгоритмом поиска точки максимальной мощности (ТММ; MPPT — Maximum Power Point Tracking).

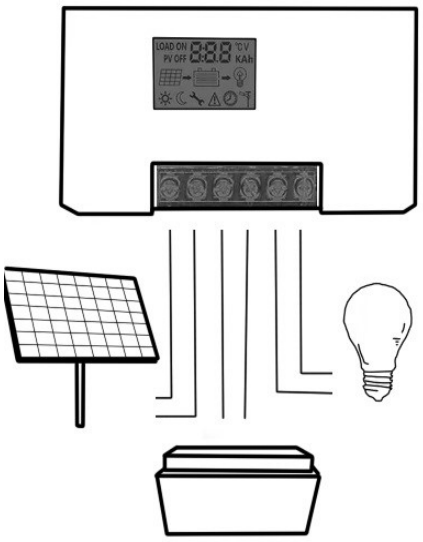


Рис. 2. Упрощенная схема подключения солнечной станции, что включает в себя: СБ, АКБ, Пользователя и КЗР.

Существенным недостатком котроллеров заряда заключается в том, что при заряде уровень подачи напряжения на АКБ вне зависимости от накопленного процента энергии, не меняется. Данная форма заряды приводит к уменьшению срока службы АКБ из-за деградации её элементов. Широтно-импульсная модуляция позволяет благодаря капельному току при определённых процентах накопленного заряда регулировать подающее напряжение на АКБ, а также поддерживать уровень заряда на максимальном уровне. Предотвращает быстрый выход аккумуляторной батареи из эксплуатации [4,5].

При слабой освещенности, когда напряжение на фотоэлектрических модулях ниже напряжения аккумуляторной батареи и как следствие отсутствие заряда, MPPT контроллеры повышают это напряжение и заряд все равно происходит. [6, 9]. MPPT контроллер все время следит за током и напряжением на фотомодулях, умножает их значение и определяет пару ток-напряжение, при которых мощность солнечной батареи максимальна. Процессор следит за стадией заряда, в которой находится аккумулятор (наполнение, насыщение, выравнивание, поддержка-ка) и на основании этого регулирует ток, подаваемый в АКБ.

Также процессор может давать индикацию параметров на табло (при наличии), хранить данные и т.п.

Применение MPPT контроллеров позволяет получать от солнечных батарей на 15 — 30% больше электроэнергии по сравнению с другими контроллерами [13, 14, 15].

Результаты исследований

Если рассмотреть стандартную вольтамперную характеристику фотоэлектрического модуля, можно отметить, что произведенная электроэнергия может быть увеличена, если контроллер заряда отследит точку максимальной мощности фотоэлектрического модуля. На рисунке 3 можно отметить ка изменяется напряжение при различных температурах.

Точка максимальной мощности может исчисляться различными способами. Как правило, контроллер последовательно снижает напряжение от точки холостого хода к напряжению на аккумуляторе. Точка максимальной мощности будет находиться где-то в промежутке между этими значениями.

Точка максимальной мощности может исчисляться различными способами. Как правило, контроллер последовательно снижает напряжение от точки холостого хода к напряжению на аккумуляторе. Точка максимальной мощности будет находиться где-то в промежутке между этими значениями.

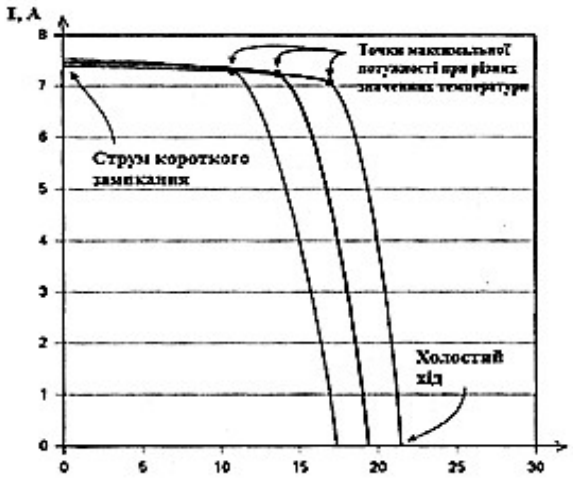


Рис. 3. Изменение напряжения в точке максимальной мощности при различных температурах модуля/

Задачи блоков структурной и функциональной схемы

На рисунке 2 предоставлен разрабатываемый контроллер заряда-разряда. Он содержит в себе достоинства PWM и MPPT контроллеров. Что позволяет устройству осуществлять поддержание точки максимальной мощности, а также проводить по заданному алгоритму заряд АКБ, для улучшения эффективности. [10,11].

Датчик напряжения необходим для масштабирования измеряемого напряжения.

Контроллер напряжения преобразовывает напряжения генерируемое солнечной панелью таким образом, чтоб обеспечивался режим работы солнечной панели в режиме наибольшего КПД, обеспечивая стабилизированное выходное напряжение.

Центральный блок управления учитывает напряжение и токи во всех ответственных узлах устройства. Осуществляет интеллектуальную функцию управления следующими блоками: контроллера напряжения, зарядного устройства и коммутационного блока

Зарядное устройство обеспечивает заряд и контроль состояния аккумуляторной батареи. Данный блок контролируется и управляется центральным блоком управления.

Аккумуляторная батарея служит резервуаром электрического тока накапливая энергию в

период избытка, а в период недостатка, при недостаточном освещении фотоэлементов или при кратковременном росте потребления тока, обеспечивает питание нагрузки [12].

Устройство ввода служит для ввода начальных и рабочих параметров для всего устройства.

Устройство вывода необходим для отображения параметров системы таких как: режим работы коммутационного блока, состояние аккумуляторной батареи, отдаваемая мощность в нагрузку и мощность, генерируемая солнечной панелью [16].

Солнечная панель источник альтернативной энергии, является одним из основных элементов данной системы.

Коммутационный блок обеспечивает необходимый режим коммутации под управлением центрального блока управления.

Блок нагрузки представляет собой потребитель постоянного тока.

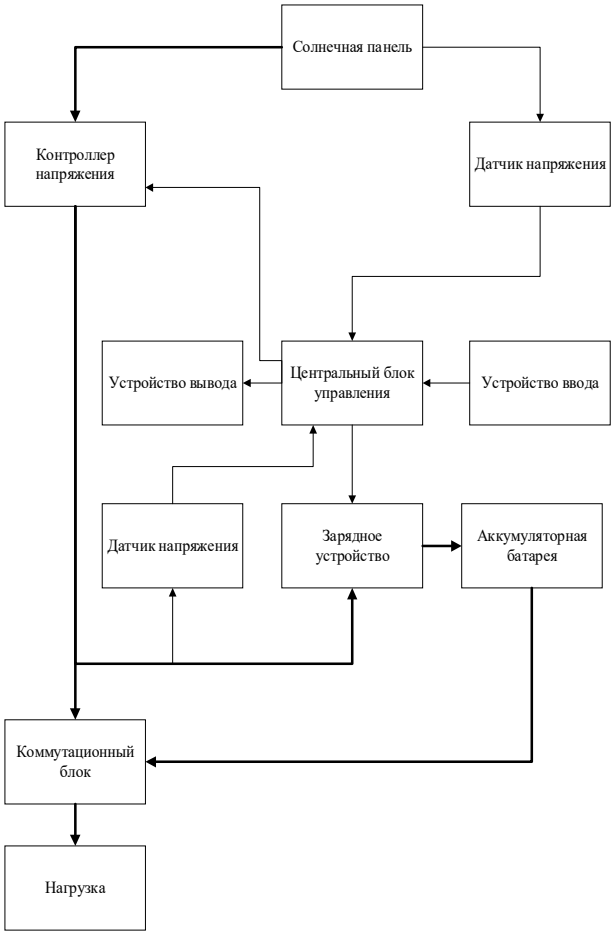


Рис. 4. Структурная схема контроллера заряда с питанием от солнечной батареи.

Алгоритм работы центрального блока управления

На рисунке 5 и 6 предоставлен алгоритм для центрального блока управления.

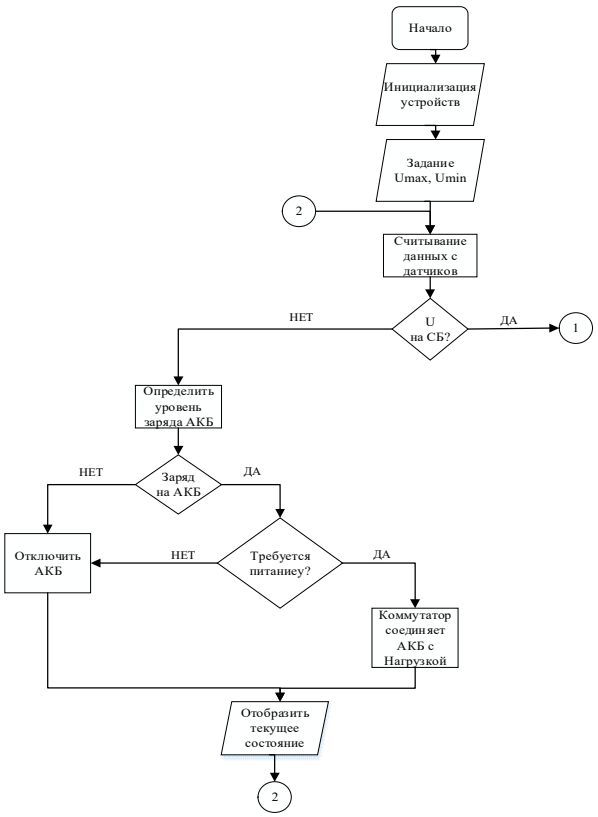


Рис. 5. Алгоритм программы, часть 1.

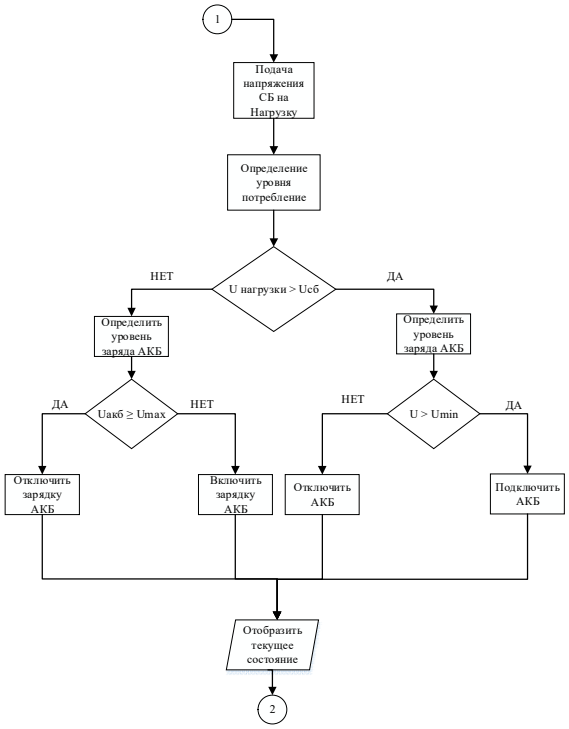


Рис. 6. Алгоритм программы, часть 2.

Предлагаемый контролер заряда-разряда несет в себе актуальное решение проблем для больших солнечных станций. Увеличивая выработку энергии, за счет поддержания точки максимально мощности, что увеличивает их КПД. А также используя ШИМ, как часть алгоритма заряда АКБ, увеличиваем срок их эксплуатации [4,5]. Следует учитывать тот факт, что данное устройство более применимо к большим солнечным электростанциям, и не является выигрышным в финансовой области для отдельных потребителей альтернативной солнечной энергии.

Выводы

При использовании новых типов вспомогательного оборудования, которым в частности, является контроллер заряда-разряда для солнечных электрогенерирующих установок, значительно повышается эффективность работы всей системы, а также повышается срок её эксплуатации.

Использование комбинированной системы солнечная батарея-АКБ для индивидуальных и промышленных потребителей позволяет сбалансировать потребляемую мощность и положительно влияет на общую работу энергокомплекса.

Альтернативная энергетика и её основная отрасль гелиотехника и фотовольтаика являются перспективными направлениями развития. Исследования новых систем комбинированной генерации и аккумулирования энергии в этих отраслях способствует быстрейшему внедрению предложенных установок для обеспечения потребителей электрической энергией.

Внедрение новейших разработок в энергетическом комплексе Российской Федерации способствует более эффективной работе всей энергосистемы государства [9].

Список литературы

1. Кремневые солнечные батареи: Учебное пособие / А.Я. Глиберман, А.К. Зайцева. - Госенергоатомиздат., 1961. — 74 с.
2. Кувшинов В.В. Использование термо-фотоэлектрических 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.
3. 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.
4. Кувшинов В.В. Использование солнечных электростанций для обеспечения энергетической безопасности Крымского региона. / Ф. М. Аль-Руфаи и другие// Appl. Sol. Энергия, 2019, Том. 55, №. 4, С. 252–255.
5. 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.
6. Кувшинов В.В. Система хранения для солнечных станций. /Коломийченко В.П., Какушина Е.Г. и другие// Appl. Sol. Энергия, 2019, Том. 55, №. 3, С. 153–158.
7. Кувшинов В.В. Исследование характеристик фотоэлектрической решетки с изменением поверхностной освещенности решетки. / АбдАли Л. М., Какушина, Е. Г., Крит, Б. Л., Морозова, Н. В., Кувшинова В. В.// Appl. Sol. Энергия, 2019, Том. 55, №. 4, С. 223–228.
8. Вологдин С.В. Анализ различных сценариев энергоснабжения Крыма с учетом режимов работы солнечной электростанции. /Якимович Б.А., Кувшинов В.В., АбдАли Л. М., Какушина, Е. Г. и другие // Appl. Sol. Энергия, 2019, Том 55, № 4, С. 229–234.
9. Гурьев В.В. Развитие возобновляемых источников электроэнергии в энергосистеме республики крым и г. Севастополя / Какушина Е.Г., Якимович Б.А., Кувшинов В.В.//Энергетические установки и технологии - 2019. Т. 5. № 2. С. 90-93.
10. Кувшинов В.В. Экспериментальное исследование энергетических характеристик солнечных установок в районе Севастополя. /Какушина Е.Г., Кувшинова В.В., Аджиев О.У., Бердышев К.Ю.// Энергетические установки и технологии - 2019. Т. 5. № 2. С. 104-110.
11. Зайченко В.М. Направления развития энергетики. /Чернявский А.А., Кувшинов В.В., Какушина Е.Г., Абейдулин С.А.//Энергетические установки и технологии. 2019 - Т. 5. № 3. С. 53-61.
12. Крит Б.Л. Изменение энергетических характеристик фотоэлектрических элементов путем модификации нанокластеров серебра приемной поверхности. / Федотикова М.В., Слепцов В.В., Кукушкин Д.Ю., Горожеев, М.Ю. Кувшинов В.В., Морозова Н.В.// Journal of Physics: Conference Series 1396(1),012024
13. Какушина Е.Г. Технико-экономический анализ эффективности ветро-солнечных установок на основе теории сложности. /Соломенникова С.И., Якимович Б.А.// В книге: Системы контроля окружающей среды - 2019 Тезисы докладов Международной научно-технической конференции. 2019. С. 74.
14. Андреев В.М. Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения/ Андреев В.М., Грилихес В.А., Румянцев В.Д. -

Л.: Наука, 1989. — 310 с.
15. Симон Ж. Молекулярные полупроводники, фотоэлектрические свойства солнечных элементов. / Ж. Симон, Ж.-Ж. Андре. — М.: Мир, 1988. — 344 с.
16. Ирвинг М.Г. Источники питания. Инверторы, конверторы, линейные и импульсные стабилизаторы / М.: Постмаркет, 2002. — 544 с.

References

1. Flint solar panels: Textbook / A. Ya. Gliberman, A. K. Zaitseva. - Gosenergoatom, 1961. - 74 p.
2. Kuvshinov V.V. The use of thermo-photovoltaic installations to provide thermal and electric energy to Sevastopol/ E.G. Kakushina, A.D. Vasiliev, A.A. Goretsky // Power plants and technologies - 2016. V. 2. No. 3. pp. 51-57.
3. Kuvshinov V.V. Possibilities of increasing the power characteristics of solar installations in the generation of heat and electric energy from one receiving surface / E.G. Kakushina // Power plants and technologies - 2016. V. 2. No. 3. pp. 45-50.
4. Kuvshinov V.V. The use of solar power plants to ensure energy security of the Crimean region. / F.M. Al-Rufai and others // Appl. Sol. Energy, 2019, Volume. 55, no. 4, pp. 252–255.
5. Kuvshinov V.V. Study of the seasonal operation of the industrial photovoltaic module PS 250 / E.G. Kakushina, D.D. Smirnova // Power plants and technologies - 2017. T. 3. No. 1. pp. 47-50.
6. Kuvshinov V.V. Storage system for solar stations. / Kolomiychenko V.P., Kakushina E.G. and others // Appl. Sol. Energy, 2019, Volume. 55, no. 3, pp. 153–158.
7. Kuvshinov V.V. Study of the characteristics of the photoelectric grating with a change in the surface illumination of the grating. / AbdAli L. M., Kakushina, E. G., Crete, B. L., Morozova, N.V., Kuvshinova V.V.// Appl. Sol. Energy, 2019, Volume. 55, no. 4, pp. 223–228.
8. Vologdin S.V. Analysis of various scenarios of Crimea's energy supply, taking into account the operating modes of the solar power station. / Yakimovich B.A., Kuvshinov V.V., AbdAli L.M., Kakushina, E.G. and others // Appl. Sol. Energy, 2019, Volume 55, No. 4, pp. 229–234.
9. Guryev V.V. Development of renewable energy sources in the energy system of the Republic of Crimea and the city of Sevastopol / Kakushina E.G., Yakimovich B.A., Kuvshinov V.V.// Power plants and technologies - 2019.V. 5. No. 2. pp. 90-93.
10. Kuvshinov V.V. An experimental study of the energy characteristics of solar plants in the region of Sevastopol. / Kakushina E.G., Kuvshinova V.V., Adzhiev O.U., Berdyshev K.Y..// Power Plants and Technologies - 2019.V. 5. No. 2. pp. 104-110.
11. Zaichenko V.M. Directions of energy development. / Chernyavsky A.A., Kuvshinov V.V., Kakushina E.G., Abeydulin S.A.// Power plants and technologies. 2019 - T. 5. No. 3. pp. 53-61.
12. Crete B.L. Changing the energy characteristics of photovoltaic cells by modifying the receiving silver nanoclusters. / Fedotikova M.V., Sleptsov V.V., Ku-Kushkin D.Yu., Gorozheev, M.Yu. Kuvshinov V.V., Morozova N.V. // Journal of Physics: Conference Se-ries 1396 (1), 012024
13. Kakushina EG Feasibility study of the efficiency of wind-solar installations based on the theory of complexity. / Solomennikova S.I., Yakimovich B.A. // In the book: Environmental Monitoring Systems - 2019 Abstracts of the International Scientific and Technical Conference. 2019. 74.p.
14. Andreev V. M. Photoelectric conversion of concentrated solar radiation/ V.M. Andreev, V.A. Grilikhes, V.D. Rumyantsev// L.: Nauka, 1989. 310 p.
15. Simon J. Molecular semiconductors, photovoltaic properties of solar cells. / J. Simon, J.-J. Andre// - Moscow: Mir, 1988. - 344 p.
16. Irving, M. G. Sources of power. Inverters, converters, linear and pulse stabilizers / Moscow: Postmarket, 2002. 544 p

УДК 620.92

Экспериментальные исследования плоских солнечных коллекторов, используемых для нужд автономных потребителей в южных регионах Российской Федерации

В.В. Кувшинов[1], Е.Г. Какушина[2], А.П. Кулемина[3], А.В. Куренкова[4], Е.Р. Портнова[5]

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия, [1]kuvshinov.vladimir@gmail.com, [2]littie@mail.ru, [3]kylemina@bk.ru , [4]kyrenkovaa@mail.ru, [5]portnovae@gmail.com

Статья поступила 24.04.2020 г.; после доработки 28.04.2020 г.

Аннотация

В данной работе приводятся результаты исследований плоских гелиоколлекторов, служащих для нагрева теплоносителя, используемого в основном для нужд горячего водоснабжения индивидуальных потребителей. Исследования показали, что более полно использовать возможности того или иного гелиоколлектора можно в зависимости от режима работы всей системы солнечного горячего водоснабжения (УСГВ). Гелиоустановки можно использовать в многих южных районах Российской Федерации, с их помощью возможно обеспечение автономных потребителей теплом и горячей водой, при этом происходит значительная экономия органического топлива и сокращение вредные выбросов в атмосферу.

Ключевые слова: плоский солнечный коллектор, фотоэлектрический модуль, установка солнечного горячего водоснабжения, тепловой абсорбер, система солнечного теплоснабжения, бак-аккумулятор/

The experimental studies of flat solar collectors used for the needs of Autonomous consumers in the southern regions of the Russian Federation

V.V. Kuvshjnov[1], E.G. Kakyshina[2], A.P. Kylemina[3], A.V. Kyrenkova[4], E.R. Poptnova[5]

Sevastopol state university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia. 1kuvshinov. [1]kuvshinov.vladimir@gmail.com, [2]littie@mail.ru, [3]kylemina@bk.ru , [4]kyrenkovaa@mail.ru, [5]portnovae@gmail.com

Received 24.04.2020 y.; received in final form 28.04.2020 y.

Abstract

This paper presents the results of studies of flat solar collectors used to heat a heat carrier, used mainly for the needs of hot water supply for individual consumers. Studies have shown that it is possible to make full use of the capabilities of a particular solar collector depending on the operating mode of the entire solar hot water supply system. Solar plants can be used in many southern regions of the Russian Federation, with their help it is possible to provide autonomous consumers with heat and hot water, while there is a significant saving of fossil fuels and reduction of harmful emissions into the atmosphere.

Keywords: flat solar collector, photovoltaic module, solar hot water installation, heat absorber, solar heat supply system, storage tank.

Введение

В настоящее время российские и зарубежные специалисты проявляют большой интерес к развитию нетрадиционной и возобновляемой энергетике.

В частности, проводиться исследование в

области гелиотехники и возможности использования солнечных водонагревательных установок [1].

Установки для прямого преобразования потока солнечной радиации в тепловую энергию значительно превосходят по своему коэффициенту полезного действия фотоэлектрические установки, служащие для преобразования солнечной энергии в электрическую.

Альтернативой могут служить только термфотоэлектрические установки для комбинированной выработки тепловой и электрической энергии [2,3].

Однако для нужд современных потребителей такие типы установок пока не используются в массовом порядке и в основном на данном этапе жилые и нежилые строения оснащаются отдельно фотоэлектрическими модулями и тепловыми гелиосистемами для электро и теплоснабжения.

При этом солнечные тепловые установки используются в большинстве случает для обеспечения потребителей горячей водой и меньшем количестве для нужд теплоснабжения [4, 5, 6].

В данной работе приводятся результаты исследований гелиоколлекторов, служащих для нагрева теплоносителя, используемого в основном для нужд горячего водоснабжения автономных индивидуальных потребителей [7].

На сегодняшний момент используются два основных типа установок использующие плоские или вакуумные солнечные коллекторы.

При этом плоские гелиоколлекторы имеют значительное разнообразие собственных конструкций и изготавливаются из различных материалов. В проводимых исследованиях использовались плоские солнечные коллекторы абсорбер которых изготавливался из различных материалов [8].

Предложенные установки производятся различными частными компаниями, при этом фирмы дают высокие значения характеристик своих устройств, что зачастую не совсем верно. Проведенные исследования позволяют более полно использовать возможности того или иного гелиоколлектора в зависимости от режима работы всей системы солнечного горячего водоснабжения (УСГВ) [9, 10].

Представленные исследования были проведены сотрудниками кафедры «Возобновляемые источники энергии и электрические системы и сети» Севастопольского государственного университета в Институте Ядерной энергии и промышленности, с целью определения возможностей повышения эффективности работы солнечных водонагревательных установок.

Постановка цели и задач научного исследования

Несмотря на схожесть всех гелиоустановок, они обладают рядом отличительных признаков. Гелиоколлектор, который был исследован в ходе работы, можно использовать как для систем горячего водоснабжения, так и для систем отопления зданий [11].

Кафедра «Возобновляемые источники энергии и электрические системы и сети» (ВИЭЭСС) поставила своей целью исследовать реальную эффективность работы и возможность солнечных установок для обеспечения теплом и горячей водой индивидуальных потребителей в условиях города Севастополя и Республики Крым. А также исследовать такой важный элемент гелиоколлектора, как абсорбер, и влияние его на характеристики работы водонагревательной установки [12].

Для исследований был выбран гелиоколлектор с абсорбером из зачерненного алюминия. Этот абсорбер имеет неселективное покрытие и изготовлен из нержавеющей стали и медных трубок.

Эти коллекторы имеют малый объем проточной части, за счёт небольшого количества трубок. Однако, за счёт хорошей теплопроводности меди и малого диаметра трубок (порядка 10 мм), хорошей теплоизоляции температура теплоносителя на выходе может достигать 70°С [13].

Исследования проводились на базе кафедры ВИЭЭСС на открытой территории. Теплоносителем в гелиоколлекторе являлась пресная вода. Главной целью данного исследования было получение зависимостей изменения выходной мощности и коэффициента преобразования гелиоколлектора от времени суток и температур теплоносителя на входе и выходе из системы [14].

Результаты исследований

Исследования проводились в ясные солнечные дни при максимальном значении прямой солнечной радиации (около 1000 Вт/м^2) в мае и июне.

Эти месяцы были выбраны не случайно: май является для Крыма месяцем с наибольшей солнечной активностью, то есть он характеризуется

большим количеством солнечных дней и повышенной солнечной радиацией. Июнь – месяц с наибольшим поступлением солнечного излучения в сутки на единицу площади (Вт/м^2), за счёт максимального времени светимости солнца (самые длинные дни и короткие ночи) [16].

Исследуя расход теплоносителя в зависимости от времени в период наблюдения, нами были установлены этапы выхода на номинальный режим работы солнечного коллектора. С 10:00 до 10:15 происходит первичный нагрев теплоносителя, а затем в течение часа с 10:15 до 11:15 устанавливается номинальный режим работы. То есть гелиоколлектор вышел на номинальный режим за 1 час 15 минут, что явилось хорошим показателем, даже для июня месяца. На графике (рис.1) приведена зависимость полезной мощности гелиоустановки от времени суток.

Мощность солнечной энергии, преобразованная гелиоколлектором, резко повысилась впервые 15 минут работы, а к 11 ч 15 мин вышла на пиковый режим.

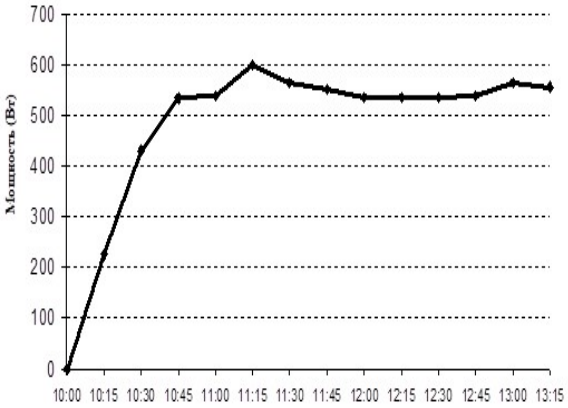


Рис. 1. Зависимость выходной мощности от времени.



Рис. 2. Зависимость выходной мощности от времени.

График на рисунке 2 – показывает зависимость коэффициента преобразования коллектора от времени. На нем мы ясно видим, что этот коэффициент у коллектора изменяется, так же, как и полезная мощность. Т.е. максимум приходиться на 11ч 15 мин, т.е. на время выхода коллектора на номинальный режим.

Из зависимостей температуры теплоносителя на входе и выходе из гелиоколлектора (таблица 1, показания 10-го и 9-го термодатчика), мы можем исследовать температурный режим работы системы, а также разность температур на входе и выходе.

Таблица 1. *Температуры на трубках солнечного коллектора (за период: 10.00-13.30)*

Время суток	Термодатчики									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10.00	4,3	3,8	3,4	3,8	4,6	3,9	4,1	5,2	3,6	3,8
10.15	0,7	9,3	8,1	8,3	8,8	7,8	7,9	9,2	8,1	3,6
10.30	7,9	2	0,6	0,7	0,3	9,7	9,7	7,1	1,3	3,8
10.45	5,6	5,6	4,3	4,9	6,6	5,6	5,5	8,6	2,8	4,2
11.00	0,1	6,3	5,6	6,3	7,6	6,9	7	0	4,4	5,3
11.15	0,9	7,4	7,1	8,1	9,1	9	9,2	33	6,5	9,1
11.30	1,1	0,3	0	1,1	2,3	2,5	2,8	7	9,8	4,5
11.45	1,8	4,2	4	4,9	6,2	6,5	6,4	0,8	3,8	0
12.00	4,7	8,1	7,6	0,6	0,3	0,6	2,8	2,1	7,7	5,4
12.15	7	9,4	9,1	3,3	1,6	2,1	5,4	1,9	9,3	7,1
12.30	3,6	8,7	8,2	7	1,5	2,3	0	2,1	9,5	8,2
12.45	7,2	9,3	9,2	9,6	2,1	3	1,4	2,9	9,8	8,2
13.00	0	0,3	2,1	6	2,7	5,3	0,4	5,2	4,4	9
13.15	1,6	2	6,2	9,6	2,7	8,4	1,8	7,8	5,8	1,3

Из анализа всех графиков и таблицы можно сделать вывод. Что для данного коллектора оптимальными температурами теплоносителя на выходе являются температуры в пределах 60-70оС, при этом разность температур (ΔТ) изменяется от 300С до 50оС [6].

При постоянном отборе теплоносителя снижение коэффициента преобразования (после 11 ч 15 мин на рис. 2 наблюдаться не будет. При этом выходная мощность коллектора может составлять 500-600 Вт (см. график на рис.1), а температура теплоносителя на выходе достигать

70ºС.

Также интересной является полученная нами зависимость распределения температур на трубках гелиоколлектора от времени (таблица 1 и рис. 3). Установка термодатчиков показана на рисунке 4. По измерениям температур можно судить о характеристиках абсорбера [15, 17].

На рисунке 4 мы видим внешний вид коллектора. Абсорбер выполнен из алюминия, трубки из меди. Вся конструкция представляет собой тип «труба в листе», площадь абсорбера 1,45 м^2.

Как было сказано выше, температура на выходе из коллектора составляет 60 – 70ºС, что делает возможным применение солнечных коллекторов данного типа для систем отопления индивидуальных потребителей, например, на южном берегу Крыма.

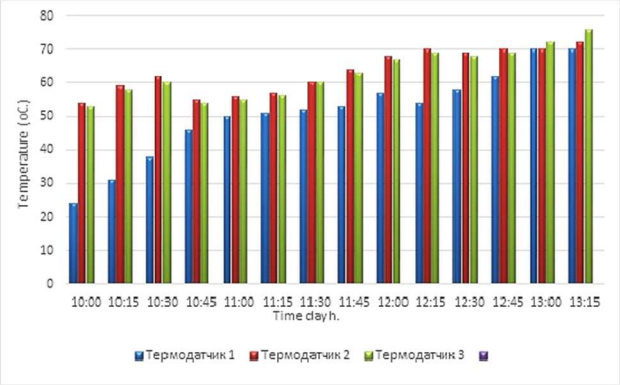


Рис. 3. Зависимость выходной мощности от времени.

Однако не очень удачным в конструкции коллектора (рис 6), является то, что теплоноситель в дальних трубках абсорбера (термодатчики 4 и 8) проходит больший путь, чем в ближних (термодатчики 2 и 5). Этим объясняется разность температур на трубках (см. диаграммы на рис.3, 4, 5.). Тем не менее, гелиоколлектор, который был описан выше, зарекомендовал себя как достаточно качественная установка, имеющая высокие показатели.

Проведенные исследования показали, что кроме горячего водоснабжения в осенне-весенний и летний период выше описанная система может использоваться и для отопления. Для этого надо увеличить приемную площадь солнечного коллектора.

Основой для гелиополя подобного типа могут служить описанные нами в статье гелиоколлекторы, которые производятся различными фирмами.

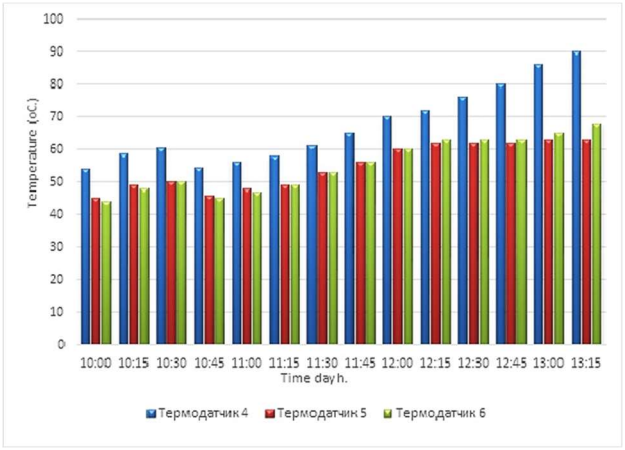


Рис. 4. Зависимость выходной мощности от времени.

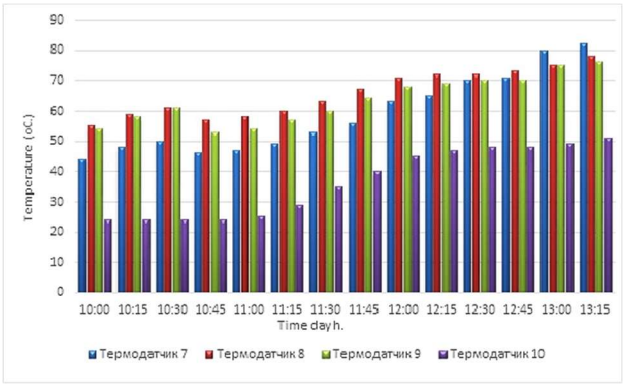


Рис. 5. Зависимость выходной мощности от времени.

Как было сказано выше, температура на выходе из коллектора составляет 60 – 70ºС, что делает возможным применение солнечных коллекторов данного типа для систем отопления индивидуальных потребителей, например, на южном берегу Крыма.

Приведенные экспериментальные исследования показали, что:

- системы, использующие солнечное излучение для нагрева воды в условиях Севастополя имеют реальный коэффициент преобразования около 40 % (при рекламируемых фирмами 60 %) и температуру на выходе из системы 70ºС (при рекламируемых 90ºС);

- эти системы способны преобразовывать за сутки с одного квадратного метра гелиополя до 20 тыс. кДж тепла летом, 6-8 тыс. кДж в весенне-осенний период и до 4 тыс. кДж зимой;

- системы позволяют при увеличении гелиополя до 100 м^2 за один месяц экономить до 800 кг условного топлива в весенний период и до 2000

кг у. т. летом.

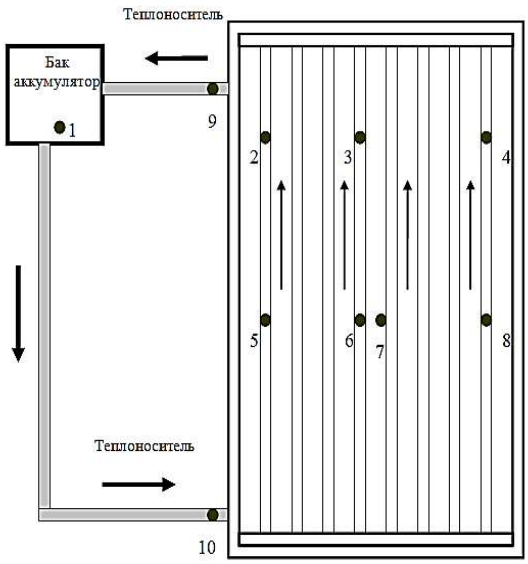


Рис 6. Солнечный коллектор. Схема расположения термодатчиков.

Причём абсорбер из зачернённого алюминия и медных трубок малого диаметра, является эффективной системой для нагрева воды в весенне-осенний период до достаточно высоких температур (порядка 60 – 70°С).

Использование описанных выше установок для теплообеспечения индивидуальных потребителей позволяет снизить использование природного газа и другого органического топлива, а также позволяет существенно сократить вредные выбросы в атмосферу, образующиеся в результате сгорания различных видов топлив.

При этом гелиоколлекторы могут иметь достаточно долгий срок службы (при хорошем качестве исполнения их срок службы сравним со сроком службы водяных труб и батарей системы отопления в индивидуальных жилых домах). Цены на сами коллектора также сравнительно небольшие. Все это позволяет сделать выше описанные системы конкурентоспособными на рынке теплооборудования [8].

Хотя реальные характеристики представленного гелиоколлектора при проведении натурных испытаний бывают обычно немного ниже заявляемых производителем, тем не менее они способствуют внедрению в нашу жизнь и в наш повседневный быт экологически чистых систем теплообеспечения, использующих в качестве источника энергии солнечное излучение, при этом они также значительно экономят органическое топливо.

Выводы

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие основные выводы:

1) Солнечные установки по прямому преобразованию потока излучения в тепловую энергию обладают значительным коэффициентом преобразования по сравнению с солнечными электрогенерирующими системами, потом для нужд теплоснабжения их применение оправданно, как с точки зрения энергетики, так и экономически;
2) Системы солнечного теплоснабжения используются у частных потребителей в большинстве случаев для нагрева горячей воды, при этом плоские солнечные коллектора позволяют получать температуру 50-60оС обладая значительной эффективностью работы, поэтому для УСГВ их применение обосновано и позволяет при определенных режимах иметь высокие энергетические показатели;
3) Гелиоустановки можно использовать в многих южных районах Российской Федерации, поэтому для обеспечения автономных потребителей горячей водой с их помощью возможно значительно сэкономить органическое топливо, сократить вредные выбросы и улучшить в целом экологическую обстановку в регионах;
4) В Крымском регионе, в связи с большим увеличением туристического потока в летний период, основная нагрузка на горячее водоснабжение в курортно-рекреационном хозяйстве приходится на май-сентябрь, при этом плоские солнечные коллекторы имеют в этот период наивысшую эффективность, что оправдывает их использование в системах солнечного горячего водоснабжения в течении весенне-летне-осеннего сезона.

Список литературы

1. Кувшинов В.В. Установки для солнечной энергетики. / Морозова Н.В., Кузнецов П.Н. //Монография. - М.: Издательство "Спутник +", 2017. 177 с.
2. Усков А. Е., Определение оптимальной группы потребителей для электроснабжения с использованием ветро-солнечных электростанций, Вестник Донского государственного технического университета, 2018. Том. 18, № 1, с. 118–123
3. Кувшинов В.В. Использование термо-фотоэлектрических 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.
4. 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.
5. Кувшинов В.В. Использование солнечных электростанций для обеспечения энергетической безопасности Крымского региона. / Ф. М. Аль-Руфаи и другие// Appl. Sol. Энергия, 2019, Том. 55, №. 4, С. 252–255.
6. 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.
7. Кувшинов В.В. Система хранения для солнечных станций. /Коломийченко В.П., Какушина Е.Г. и другие// Appl. Sol. Энергия, 2019, Том. 55, №. 3, С. 153–158.
8. Кувшинов В.В. Исследование характеристик фотоэлектрической решетки с изменением поверхностной освещенности решетки. / АбдАли Л. М., Какушина, Е. Г., Крит, Б. Л., Морозова, Н. В., Кувшинова В. В.// Appl. Sol. Энергия, 2019, Том. 55, №. 4, С. 223–228.
9. Вологдин С.В. Анализ различных сценариев энергоснабжения Крыма с учетом режимов работы солнечной электростанции. /Якимович Б.А., Кувшинов В.В., АбдАли Л. М., Какушина, Е. Г. и другие // Appl. Sol. Энергия, 2019, Том 55, № 4, С. 229–234.
10. Гурьев В.В. Развитие возобновляемых источников электроэнергии в энергосистеме республики крым и г. Севастополя / Какушина Е.Г., Якимович Б.А., Кувшинов В.В.//Энергетические установки и технологии - 2019. Т. 5. № 2. С. 90-93.
11. Кувшинов В.В. Экспериментальное исследование энергетических характеристик солнечных установок в районе Севастополя. /Какушина Е.Г., Кувшинова В.В., Аджиев О.У., Бердышев К.Ю.//
Энергетические установки и технологии - 2019. Т. 5. № 2. С. 104-110.
12. Зайченко В.М. Направления развития энергетики. /Чернявский А.А., Кувшинов В.В., Какушина Е.Г., Абейдулин С.А.//Энергетические установки и технологии. 2019 - Т. 5. № 3. С. 53-61.
13. Крит Б.Л. Изменение энергетических характеристик фотоэлектрических элементов путем модификации нанокластеров серебра приемной поверхности. / Федотикова М.В., Слепцов В.В., Кукушкин Д.Ю., Горожеев, М.Ю. Кувшинов В.В., Морозова Н.В.// Journal of Physics: Conference Series 1396(1),012024
14. Какушина Е.Г. Технико-экономический анализ эффективности ветро-солнечных установок на основе теории сложности. /Соломенникова С.И., Якимович Б.А.// В книге: Системы контроля окружающей среды - 2019 Тезисы докладов Международной научно-технической конференции. 2019. С. 74.
15. Андреев В.М. Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения/ Андреев В.М., Грилихес В.А., Румянцев В.Д. - Л.: Наука, 1989. — 310 с.
16. Симон Ж. Молекулярные полупроводники, фотоэлектрические свойства солнечных элементов. / Ж. Симон, Ж.-Ж. Андре. — М.: Мир, 1988. — 344 с.
17. Ирвинг М.Г. Источники питания. Инверторы, конверторы, линейные и импульсные стабилизаторы / М.: Постмаркет, 2002. — 544 с.

References

1. Kuvshinov V.V. Installations for solar energy. / Morozova N. V., Kuznetsov P. N. Monografiya. - M.: Izdatel'stvo "Sputnik +", 2017. 177 p.
2. Uskov A. Ye. Determination of optimal consumer group for electricity supply using solar-wind power plants. Vestnik of Don State Technical University, 2018. vol. 18, No 1. pp. 118–123.
3. Kuvshinov V.V. The use of thermo-photovoltaic installations to provide thermal and electric energy to Sevastopol/ E.G. Kakushina, A.D. Vasiliev, A.A. Goretsky // Power plants and technologies - 2016. V. 2. No. 3. pp. 51-57.
4. Kuvshinov V.V. Possibilities of increasing the power characteristics of solar installations in the generation of heat and electric energy from one receiving surface / E.G. Kakushina // Power plants and technologies - 2016. V. 2. No. 3. pp.. 45-50.
5. Kuvshinov V.V. The use of solar power plants to ensure energy security of the Crimean region. / F.M. Al-Rufai and others // Appl. Sol. Energy, 2019, Volume. 55, no. 4, pp. 252–255.
6. Kuvshinov V.V. Study of the seasonal operation of the industrial photovoltaic module PS 250 / E.G. Kakushina, D.D. Smirnova // Power plants and technologies - 2017. T. 3. No. 1. pp. 47-50.
7. Kuvshinov V.V. Storage system for solar stations. / Kolomiychenko V.P., Kakushina E.G. and others // Appl. Sol. Energy, 2019, Volume. 55, no. 3, pp. 153–158.
8. Kuvshinov V.V. Study of the characteristics of the photoelectric grating with a change in the surface illumination of the grating. / AbdAli L. M., Kakushina, E. G., Crete, B. L., Morozova, N.V., Kuvshinova V.V.// Appl. Sol. Energy, 2019, Volume. 55, no. 4, pp. 223–228.
9. Vologdin S.V. Analysis of various scenarios of Crimea's energy supply, taking into account the operating modes of the solar power station. / Yakimovich B.A., Kuvshinov V.V., AbdAli L.M., Kakushina, E.G. and others // Appl. Sol. Energy, 2019, Volume 55, No. 4, pp. 229–234.
10. Guryev V.V. Development of renewable energy

sources in the energy system of the Republic of Crimea and the city of Sevastopol / Kakushina E.G., Yakimovich B.A., Kuvshinov V.V.// Power plants and technologies - 2019.V. 5. No. 2. pp.. 90-93.
11. Kuvshinov V.V. An experimental study of the energy characteristics of solar plants in the region of Sevastopol. / Kakushina E.G., Kuvshinova V.V., Adzhiev O.U., Berdyshev K.Y..// Power Plants and Technologies - 2019.V. 5. No. 2. pp. 104-110.
12. Zaichenko V.M. Directions of energy development. / Chernyavsky A.A., Kuvshinov V.V., Kakushina E.G., Abeydulin S.A.// Power plants and technologies. 2019 - T. 5. No. 3. pp. 53-61.
13. Crete B.L. Changing the energy characteristics of photovoltaic cells by modifying the receiving silver nanoclusters. / Fedotikova M.V., Sleptsov V.V., Ku-Kushkin D.Yu., Gorozheev, M.Yu. Kuvshinov V.V., Morozova N.V. // Journal of Physics: Conference Se-ries 1396 (1), 012024
14. Kakushina EG Feasibility study of the efficiency of wind-solar installations based on the theory of complexity. / Solomennikova S.I., Yakimovich B.A. // In the book: Environmental Monitoring Systems - 2019 Abstracts of the International Scientific and Technical Conference. 2019. 74.p.
15. Andreev V. M. Photoelectric conversion of concentrated solar radiation/ V.M. Andreev, V.A. Grilikhes, V.D. Rumyantsev// L.: Nauka, 1989. 310 p.
16. Simon J. Molecular semiconductors, photovoltaic properties of solar cells. / J. Simon, J.-J. Andre// - Moscow: Mir, 1988. - 344 p.
17. Irving, M. G. Sources of power. Inverters, converters, linear and pulse stabilizers / Moscow: Postmarket, 2002. 544 p.

УДК 620.92

Выбор оборудования плавучих волновых энергоустановок

В.В. Чебоксаров[1], И.А. Кочетов[2]
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33, г. Севастополь, 299053, Россия. [1]vchebox@gmail.com, [2]kochetov.vano@mail.ru

Статья поступила 08.05.2020 г.; после доработки 13.05.2020 г.

Аннотация

Расширение использования энергии морских волн, обладающих значительным энергопотенциалом, важная задача по переходу к чистой электроэнергетике. В волновой энергетике наблюдается очень большое разнообразие технологий, обусловленное трудностью эффективного преобразования энергии сложного движения воды в волнах. Описана перспективная конструкция плавучего резонансного преобразователя волновой энергии. Приведена оценка номинальной мощности преобразователя. На базе разработок оффшорной ветроэнергетики предложен рациональный набор основных компонентов электрической части оборудования плавучей волновой энергоустановки.

Ключевые слова: преобразователь энергии волн, плавучая энергоустановка, маятник, кабель, асинхронный генератор с фазным ротором.

Selection of equipment of floating wave power plants

V.V.Cheboxarov[1], I.A. Kochetov[2]
FAEI HE «Sevastopol State University», 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia.[1] vchebox@gmail.com,[2] kochetov.vano@mail.ru

Received 08.05.2020; received in final form 13.05.2020.

Abstract

Extended utilization of sea wave energy having large power capacity is an important task in current transition to a clean power engineering. There is a wide variety of technologies of wave power engineering due to difficulty of efficient energy conversion for complicated water movement in waves. A new design of resonant floating wave energy converter is described. Its rated power capacity is estimated. Taking into account an experience of offshore wind power engineering, rational composition of basic components of electric equipment for a floating wave power plant is suggested.

Keywords: wave energy converter, floating power plant, pendulum, cable, DFIG.

Введение

Изменение климата и увеличение расходов на получение энергии является серьезной проблемой для специалистов, политиков и общественности. Эмиссия CO_2, обусловленная работой промышленных предприятий, транспорта и производством энергии, влечет за собой повышение глобальной температуры и связанные с ней последствия, в том числе оттаивание ледяных полярных шапок или расширение площадей, занимаемых пустынями. Эти процессы сопровождаются увеличением расходов на мазут, бензин и пищевые продукты при одновременном уменьшении запасов нефти и природного газа. Развитие и эффективное использование возобновляемых видов энергии и увеличение доли рекуперации энергии являются возможным выходом из сложившейся ситуации. В настоящее время среди возобновляемых источников энергии (ВИЭ) по установленной мощности лидирует ветроэнергетика. Однако плотность ветровой энергии значительно меньше, чем у энергии движения воды. Поэтому, например, морские

волновые энергоустановки могут быть значительно компактнее ветровых аналогичной мощности.

Океаны покрывают почти три четверти поверхности Земли, и в движении морской воды из-за ее относительно высокой плотности заключено большое количество кинетической энергии. Этот огромный источник обладает потенциалом удовлетворения существенной части спроса на экологически чистую электроэнергию для человечества. Так, суммарная мощность волн Мирового океана оценивается в 10 ТВт [3], что вполне достаточно для увеличения вдвое производства электроэнергии в мире. Начиная с 1970-х годов, после нефтяного кризиса, исследования в области ВИЭ получили большую поддержку, и это также повлияло на исследования в области волновой энергии. Так как большая часть поверхности Земли покрыта водой и многие страны располагают удобными шельфовыми зонами, то технологии использования энергии волн дадут им шанс обеспечения чистой энергией. Эти технологии отличаются универсальным применением и могут быть реализованы почти во всех странах мира, имеющих доступ к морю. Кроме того, в период экономического кризиса эффективное использование возобновляемой энергии создает дополнительные рабочие места в научных учреждениях и на производстве.

Поэтому преобразование энергии морских волн – довольно перспективное направление альтернативной электроэнергетики. Важно, что эффективность выработки электроэнергии при преобразовании энергии волн может быть значительно выше, чем при использовании других ВИЭ, например, на ветряных и солнечных электростанциях. Коэффициент использования установленной мощности в разы больше чем у фотоэлектрических станций.

На сегодняшний день было изобретено, разработано и испытано в небольших и крупномасштабных экспериментах множество типов преобразователей энергии волн. Так, известно про более чем 1000 патентов, полученных на изобретения в данной области [6]. Это очевидно во-многом является следствием трудности преобразования энергии весьма сложного пространственного движения воды при морском волнении. Если момент на валу генератора зависит и изменяется синхронно с движением волны, то амплитуда и частота напряжения, очевидно, будут резко меняться в течение каждого периода волны. Такие колебания несовместимы с электрической сетью, поскольку электроэнергия, подаваемая в сеть, должна иметь напряжение постоянной амплитуды и частоты. Поэтому определенные стратегии управления преобразованием энергии и накопление энергии играют значительную роль в волновых энергетических системах.

В настоящее время общеизвестно, что получение любых видов энергии в глубоководных районах - весьма сложная задача. Морская электроэнергетика пока реализуется в основном в виде многочисленных шельфовых ветропарков, нескольких приливных электростанций и установок на энергии течений в мелководных районах с номинальной скоростью течения 1,5 м/с ~ 3 м/с. Основные виды компонентов электрооборудования здесь в основном такие же, как и у мощных наземных ветроэнергетических установок, например, асинхронный генератор с фазным ротором (DFIG) и синхронные электрогенераторы с возбуждением на постоянных магнитах с прямым приводом. Технологический опыт генерации и передачи электроэнергии с существующих морских энергоустановок может быть использован при проектировании перспективных плавучих преобразователей энергии волн [1].

Постановка задачи

Целью данной работы является анализ перспективных решений по созданию эффективных энергоустановок, работающих только на ВИЭ, используя при этом энергию волн. В частности, ставится задача выбора типов оборудования электрической части для плавучих резонансных волновых электростанций нового типа.

Резонансные волновые энергоустановки

Как отмечено выше, типы преобразователей энергии волн весьма разнообразны. Однако их схемы можно сгруппировать по нескольким технологиям преобразования. Так, в книге [6] выявлено пять основных технологий:

- аттенюаторы (протяженные поверхностные мультисегментные шарнирные поглотители энергии волн);
- точечные поверхностные поглотители (заякоренные буи);
- осциллирующие преобразователи с продольным движением (в основном на базе перевернутого маятника);
- технология осциллирующего водяного столба (с воздушной турбиной);
- переливные устройства с низконапорными гидротурбинами.

Подобная классификация приведена также в работе [5], но, как и в обзоре [2], с акцентом на

технологии с осциллирующими телами – маятниками.

Маятниковые схемы уже применяются в преобразователях волновой энергии. Технология маломощной генерации с преобразователем энергии волн на основе маятников, качающихся в воздушной среде внутри буя, является достаточно популярной. Однако воздушная среда, обладающая многократно меньшим коэффициентом демпфирования в сравнении с водой, дает возможность создать и высокоэффективную резонансную маятниковую систему большой мощности, теоретически способную утилизировать максимальную часть энергии волнения [7].

Для работы в резонансном режиме, т.е. при совпадении собственной частоты маятника с максимумом спектральной плотности волнения, маятник оказывается относительно крупногабаритным. Но его изготовление и эксплуатация не представляет больших технических сложностей, так как, по оценкам автора, диапазон приведенной длины физического маятника составляет от 15 до 40 м. Тем не менее, существует важная проблема, которая заключается в обеспечении остойчивости плавучего преобразователя с относительно высокой опорой оси качания маятника. Остойчивость легче обеспечить при организации отбора мощности с маятника в его нижней точке, но она резко ухудшается при организации отбора мощности по оси качания крупногабаритного маятника.

Аналоги схем маятниковых преобразователей не смогли решить данную проблему с остойчивостью. Поэтому был предложен вариант маятникового волнового преобразователей по патенту [4], где установлена индукционная связь нижней части маятника с катушками на основании. В данном варианте возможны существенные потери полей рассеяния магнитного потока в неравномерном воздушном зазоре. Воздушный зазор как минимум в несколько десятков миллиметров необходим из-за больших габаритов нежесткого маятника.

Описанное в работе [7] новое устройство отбора мощности крупногабаритного маятника полностью расположено в нижней части преобразователя, на плавучем основании. Устройство выполнено в виде механизма с зубчатыми передачами, находящегося в зацеплении с зубьями на маятнике 5 (Рис.1).

Дадим оценку ожидаемой единичной мощности резонансной волновой энергоустановки для подбора ее электрооборудования. Среднегодовая удельная мощность волнения (приходящаяся на единицу длины фронта волны) для большинства районов шельфа находится в пределах 10…70 кВт/м.

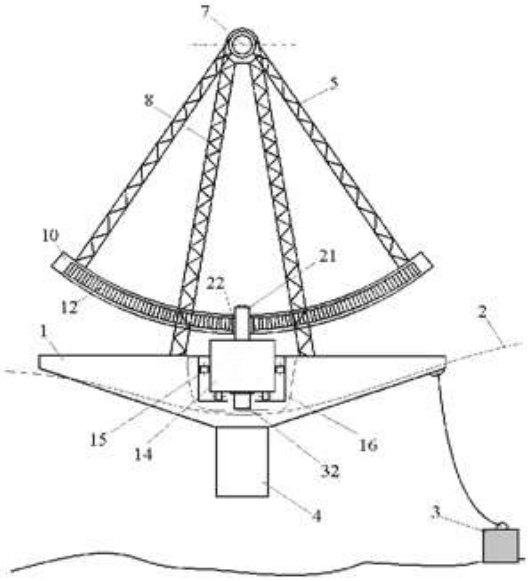


Рис. 1. Схема резонансного преобразователя энергии волн с крупногабаритным секторным маятником

Исходя из того, что в штилевых условиях энергоустановка работать не будет, суммарную продолжительность штилей в течение года следует исключить из расчета с соответствующим увеличением среднегодовой удельной мощности. Поэтому номинальный режим волновой энергоустановки и, следовательно, целесообразно выбрать ее конструктивные параметры основываясь на несколько больших значениям удельной мощности волнения, например, находящихся в диапазоне 70…80 кВт/м.

Определим характеристики волнения, обладающего такой мощностью. Прежде всего условно заменим нерегулярное волнение эквивалентной регулярной волной с частотой максимума спектра нерегулярного. Тогда для определения энергетических параметров можно воспользоваться линейной теорией волн, согласно которому плотность энергии $\overline{E}$ регулярной волны в Дж/м^2 определяется по следующей формуле [6]:

$$\overline{E} = \frac{\rho g h^2}{8}, \qquad (1)$$

где h – высота волны, м,

ρ - плотность морской воды, кг/м^3,

g – ускорение свободного падения, м/с^2.

Отсюда оценка удельной мощности волны

в Вт/м по формуле (2):

$$\overline{P} = \overline{E} \cdot v_g = \frac{\rho g h^2}{8} v_g, \qquad (2)$$

где v_g– групповая скорость волны (скорость переноса энергии), м/с.

Для глубокой воды *(d>>L)* имеем $v_g=c/2=L/2T$, где d – глубина в месте базирования установки, м; c – фазовая скорость волны, м/с; L– ее длина, м. Для мелкой воды ($d<<L$) в пределе $v_g=c=L/T$. Здесь фазовая скорость $c = \sqrt{\frac{gL}{2\pi}}$. Причём, длина волны L определяется из следующего соотношения [8]:

$$L = \frac{2\pi g}{\omega_m} th\left(\frac{2\pi d}{L}\right). \qquad (3)$$

Рассмотрим параметры волнения в 5 баллов: высота волны с обеспеченностью 3% (вероятность превышения) $h_{3\%}$ = 3,5 м; средний период волн $\overline{T}$ = 6 с.; угловая частота максимума спектра (для спектра Пирсона-Московица) ω_m = 0.75 c^{-1}.Тогда, например, при глубине акватории d = 15 м из соотношения (3) получаем длину волны L= 70 м.

Далее допустив, что $h = h_{3\%}$, из (2) рассчитываем оценку удельной мощности волны $\overline{P}$ = 78 кВт/м, что характерно для климата многих районов северо-восточной Атлантики и попадает в вышеуказанный диапазон среднегодовой удельной мощности волнения. При номинальной длине волны L = 70 м целесообразно изготовить плавучую платформу волнового преобразователя с размерами в плане (A x B) 30 x 15 м.

Механическую мощность резонансного преобразователя энергии волн посчитаем по формуле (4):

$$N = \overline{P} B \eta, \qquad (4)$$

где η – коэффициент использования энергии волн, который должен быть определен только экспериментально. Предварительно при достаточно высоких значениях добротности для плавучей платформы и маятникового резонатора примем η=0,6, тогда номинальная механическая мощность резонансного преобразователя энергии волн N = 700 кВт.

Электрооборудование плавучей волновой энергоустановки

Анализируя мощность и условия работы разрабатываемой волновой энергоустановки можно заключить, что они во многом соответствуют условиям работы других шельфовых энергетических установок и в особенности плавучих ветроустановок для глубокого шельфа. Так, волновой климат хоть и отличается несколько большей предсказуемостью и стабильностью, чем ветровой, но всё равно волнение изменчиво в тесной с ветром корреляции. Поэтому для стабилизации частоты и напряжения, вырабатываемых на волновых установках, целесообразно использовать соответствующие технические решения с морских ветроустановок. В частности, данную конструкцию можно оснастить в основном так же, как и наземные ветроустановки, например, используя асинхронный генератор с фазным ротором (англоязычная аббревиатура DFIG) или синхронный электрогенератор на постоянных магнитах с прямым приводом. Также необходимо проложить определенные кабельные линии для передачи электроэнергии на береговую сетевую подстанцию.

Выбор генератора DFIG обосновывается тем, что электрические асинхронные генераторы с фазным ротором похожи на электрические генераторы с короткозамкнутым ротором, но имеют дополнительные функции, которые позволяют им работать со скоростями, немного превышающими или ниже их естественной синхронной скорости. Один из подходов к разрешению изменения скорости турбины заключается в том, чтобы принимать любую частоту, производимую генератором, преобразовывать ее в постоянный ток, а затем преобразовывать ее в переменный ток на требуемой выходной частоте с помощью инвертора.

Таким образом, индукционная машина с асинхронным генератором с фазным ротором имеет ряд преимуществ перед индукционной машиной с короткозамкнутым ротором в областях как ветровой, так и волновой энергетики, где частота вращения входного вала генератора недостаточно стабильна.

Во-первых, поскольку схема ротора управляется силовым электронным преобразователем, асинхронный генератор способен как импортировать, так и экспортировать реактивную мощность. Это имеет важные последствия для стабильности энергосистемы и позволяет машине поддерживать сеть во время сильных возмущений напряжения (низковольтная проводка; LVRT).

Во-вторых, управление напряжениями и токами ротора позволяет асинхронной машине оставаться синхронизированной с сетью, в то время как скорость турбины изменяется. Турбина с переменной скоростью использует имеющийся водный ресурс более эффективно, чем

турбина с фиксированной скоростью, особенно в условиях слабых волн.

В-третьих, стоимость преобразователя низка по сравнению с другими решениями с переменной скоростью, поскольку только часть механической мощности, обычно 25-30%, подается в сеть через преобразователь, а остальная часть подается в сеть непосредственно от статора. Эффективность DFIG очень хороша по той же причине. Схема подключения генератора DFIG в ветроэнергетической установке показана на Рис. 2.

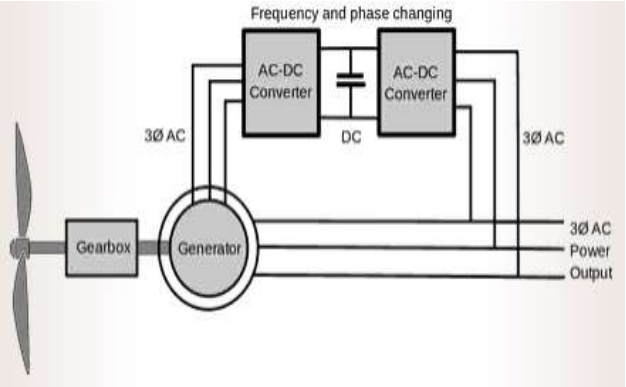


Рис. 2. Асинхронный генератор с фазным ротором и преобразователем в составе ветроэнергетической установки

По расчетам, полученным выше, предложен электрогенератор марки HW43/600 кВт производства компании «HEAG». Генератор разработан для эксплуатации в различных природных условиях в соответствии с классами IEC-I и IEC-III. Он был создан с применением ведущих мировых технологий и общепризнанных конструкторских решений в области ветроэнергетики, таких как конструкция ротора из трех лопастей, работа с наветренной стороны, ротор горизонтальной оси, трехступенчатая планетарная коробка передач (мультипликатор), асинхронный генератор двойного питания (DFIG). Технология двойного преобразования с широтноимпульсной модуляцией тока возбуждения обеспечивает регулирование потока мощности в обоих направлениях, чем обеспечивается стабильное качество выдаваемой мощности генератора в сеть потребителя.

В конструкции генератора реализуется концепция регулирования скорости с использованием других входных устройств. Это позволяет поддерживать производительность генератора на практически номинальном уровне во время сильных волн. Когда волны слабые, то организуется совместное функционирование входных систем регулирования скорости и электронного преобразователя токов возбуждения, направленное на оптимизацию производительности.

Выбор правильного типа кабелей заключается в эффективной передаче электрической энергии с минимальными потерями. Хорошо освоенные промышленностью подводные кабели могут работать при помощи технологий одножильных высоковольтных линий электропередач постоянного тока (HVDC) или одно-трехжильных высоковольтных линий электропередач переменного тока (HVAC) в зависимости от нескольких балансирующих факторов, в частности расстояния от энергоустановки до берега, общей генерируемой мощности станции, материальных и эксплуатационных затрат (Рис. 3). Видно, что при передаче на относительно близком расстоянии (до 60 -70 км) целесообразно использовать технологию HDAC, а при большем расстоянии передача энергии на постоянном токе обеспечивает меньшую стоимость.

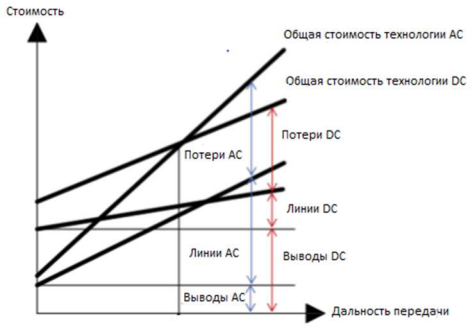


Рис. 3. Сравнение стоимости технологии прокладки кабелей линий высокого напряжения постоянного и переменного тока [10], где:
AC – переменный ток
DC – постоянный ток

Технология HVDC уменьшает количество кабелей, а также позволяет лучше справляться с возникновением сильных волн. Предположение о конструкции кабеля представляет собой пару одножильных кабелей HVDC (обычно изолированных из сшитого полиэтилена и с медным проводником) для каждой платформы преобразователя с высоким положительным и отрицательным напряжением относительно потенциала земляного провода. Прокладывают два кабеля каждой цепи HVDC и связанные с ними волоконно-оптические кабели. Кабели могут быть объединены в один блок и помещены в одной

подводной траншее до тех пор, пока они не приблизятся к месту выхода на сушу. Кроме того, они могут быть установлены отдельно, в зависимости от стратегии укладки кабеля и местных условий морского дна. Отмечается, что стоимость монтажа на километр одного пучка значительно ниже, чем у отдельных кабелей.

Заключение

В работе показано, что энергия волн обладает потенциалом, достаточным для удовлетворения всех потребностей человечества, а преобразование энергии морских волн – перспективное направление альтернативной электроэнергетики. Но эффективное преобразование энергии волнения – весьма трудная техническая задача. Предложенная новая схема преобразователя отличается наличием крупногабаритного секторного маятника, совершающего колебания с переменной частотой, совпадающей с частотой максимума энергетического спектра волнения.

Для базирования в районах со среднегодовым волновым климатом, соответствующим 5 баллам, определено, что удельной мощность волны составит 78 кВт/м. При этих условиях для платформы площадью 30×15 метров подобрана номинальная механическая мощность резонансного преобразователя энергии волн, которая должна быть приблизительно 700 кВт.

Обосновано, что для использования в плавучих волновых энергоустановках наиболее целесообразно применять асинхронные генераторы с фазным ротором, хорошо зарекомендовавшие себя в ветроэнергетике.

Для передачи электроэнергии с плавучих волновых энергоустановок на береговые подстанции подходят специальные подводные кабели высокого напряжения. При передаче на расстояние до 60 км целесообразно использовать кабели переменного тока, а при большем расстоянии передача на постоянном токе обеспечивает меньшую стоимость.

Список литературы

1. Макаров А. А. Энергия и энергетика будущего // Материалы Российского энергетического форума. М., 2005.
2. Гентова А.А., Каменских И. В. Обзор вариантов преобразователей энергии морских волн // Современные наукоемкие технологии, 2013. № 8-1. С. 115-116.
3. Panicker N.N. Power Resource Potential of Ocean Surface Waves // N.N. Panicker // Proc. Wave and Salinity Gradient Workshop. - Newark, Delaware, USA, 1976. - P. J1-J48.
4. Hobdy M., Wave energy converter, US Patent No. 8026620, 2011.
5. Чебоксаров В.В. Сравнительный анализ эффективности двух схем маятниковых преобразователей энергии волн / В.В. Чебоксаров // Энергетические установки и технологии. - 2016.- Т. 2, № 1. - С. 68-75.
6. Neill S.P., Hashemi M.R. Fundamentals of Ocean Renewable Energy. Elsevier, 2018, 319 p.
7. Чебоксаров В.В. К вопросу о создании маятниковых волновых энергоустановок большой мощности // В.В. Чебоксаров // Энергетические установки и технологии. - 2016.- Т. 2, № 4. - С. 69-76.
8. Cheboxarov Victor V, Cheboxarov Valery V. Research of Behavior of Large Rotary Pontoon of Offshore Wind Turbine in Waves // Proc 9th Pacific // Asia Offshore Mechanics Symposium, ISOPE, Busan, Korea, PACOMS-2010, pp.106-113.
9. Справочник по теории корабля: в 3-х т. Том.2 Статика судов. Качка судов // Под ред. Я.И. Войткунского. – Л.: Судостроение, 1985, - 440 с.
10. McDonald A., Carroll J. Offshore Wind Farms // Woodhead Publishing, 2016, pp. 419-440.

References

1. Makarov A. A. Energy and power engineering of the future // Materials of the Russian energy forum, Moscow, 2005
2. Gentova A. A., Kamenskikh I. V. review of options for marine wave energy converters // Modern science-intensive technologies, 2013, pp. 115-116.
3. Panicker N. N. Power Resource Potential of Ocean Surface Waves // N. N. Panicker // Proc. Wave and Salinity Gradient Workshop. - Newark, Delaware, USA, 1976. - P. J1-J48.
4. Hobby M., Wave energy converter, US Patent No. 8026620, 2011.
5. Cheboxarov V. V. Comparative Analysis of Two Schematics of Pendulum-Type Wave Energy Converters // V. V. Cheboxarov // *Energeticheskie ustanovki i tekhologii*. 2016, Vol. 2, No. 1. - pp. 68-75.
6. Neill S.P., Hashemi M.R. Fundamentals of Ocean Renewable Energy. Elsevier, 2018, 319 p.
7. Cheboxarov V. V. On Development of High Capacity Pendulum-Type Wave Energy Converters // V. V. Cheboxarov // *Energeticheskie ustanovki i tekhologii*. 2016, Vol. 2, No. 4. - pp. 69-76.
8. Cheboxarov Victor V, Cheboxarov Valery V. Research of Behavior of Large Rotary Pontoon of Offshore Wind Turbine in Waves // Proc 9th Pacific // Asia Offshore Mechanics Symposium, ISOPE, Busan, Korea, PACOMS-2010, pp.106-113.
9. Handbook of ship theory / Ya I Voytkunskiy, ed. // Sudostroenie, 1985, Vol 2, 440 p.
10. McDonald A., Carroll J. Offshore Wind Farms // Woodhead Publishing, 2016, pp. 419-440.

УДК 629.355

Анализ показателей надежности унифицированной машины технологического электротранспорта

[1]Якимович Б.А., [2]Филькин Н.М., [2]Музафаров Р.С., [1]П.Н. Кузнецов, [1]Н.Н. Смокталь

[1]ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия, BAYakimovich@sevsu.ru, PNKuznetsov@sevsu.ru
[2]ФГБОУ ВО "Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова"

Статья поступила 14.05.2020 г; после доработки 19.05.2020 г.

Аннотация

В статье описана разработка Сарапульского электрогенераторного завода - унифицированная машина технологического электротранспорта (УМТЭТ), предназначенная для транспортировки различных видов грузов. Авторами предложен ещё один вариант модификации платформы УМТЭТ, основанный на использовании модуля рефрижератора с питанием от фотоэлектрической установки. Показаны преимущества и возможности использования данного решения. Также в статье приведено решение задачи анализа показателей надежности УМТЭТ в период ее нормальной эксплуатации. Проведенные расчетные исследования показали: расчетный срок службы УМТЭТ более 8 лет; срок службы между средними капитальными ремонтами обеспечен более 4 лет; обоснован гамма-процентный срок сохраняемости безотказности, долговечности и ремонтопригодности при транспортировании и хранении более 8 лет при гамме, равной 97,207 %.

Ключевые слова: электротранспорт, фотоэлектрические преобразователи, рефрижератор, электротележка, показатели надежности, УМТЭТ

Analysis of reliability indicators of a unified machine of technological electric transport

[1]Yakimovich B.A., [2]Filkin N.M., [2]Muzafarov R.S., [1]Kuznetsov P.N., [1]Smoktal N.N.

[1]Sevastopol state university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia.
BAYakimovich@sevsu.ru, PNKuznetsov@sevsu.ru
[2]Izhevsk State Technical University. M.T. Kalashnikov

Received 14.05.2020 y ; received in final form 19.05.2020 y.

Abstract

The article describes the development of the Sarapul Electric Generator Plant - a unified technological electric transport vehicle (UTETV), designed to transport various types of cargo. The authors proposed another modification of the UTETV platform-form, based on the use of a refrigerator module powered by a photovoltaic installation. The advantages and possibilities of using this solution are shown. The article also provides a solution to the problem of analyzing the reliability indicators of UTETV during its normal operation. The calculations carried out have shown: the design life of UTETV is more than 8 years; the service life between average major repairs is provided for more than 4 years; the gamma-percent shelf life of reliability, durability and maintainability during transportation and storage for more than 8 years with a gamma of 97.207% is justified.

Keywords: electric transport, photoelectric converters, refrigerator, electric cart, reliability indicators, UTETV

Введение

Автотранспортные средства с двигателями внутреннего сгорания оказывают существенное негативное влияние на экологические составляющие окружающей среды. Эта проблема в последние годы особо остро проявляется вслед-

ствие интенсивного роста количества автомобилей на фоне их технического старения, нарушая хрупкое экологическое равновесие [1]. В настоящее время уровень данной проблемы достиг такого значения, что она регулярно вошла в повестку международных организаций таких как ЮНЕСКО и ООН [2,3]. Согласно цели, принятой на 21-й сессии Конференции сторон Рамочной конвенции ООН об изменении климата, является «достижение универсального и обязательного для выполнения соглашения, позволяющего эффективно бороться с изменением климата и ускорять переход к обществу и экономике, мало потребляющим углеродные технологии». Анализ существующих передовых технологий в области энергетики и транспорта показывает, что для достижения данной цели очень важным является переход от традиционного транспорта, использующим углеводородное топливо, на электрический, а также повсеместное использование технологий возобновляемой энергетики, включая транспортную отрасль.

В настоящее время, развитие данной концепции, помимо государственных программ, оказывается большинством автомобилестроительных компаний. Свидетельством этого являются проводимые под трендом «зеленый автомобиль» престижные международные автосалоны, где, помимо автомобилей, демонстрируются новейшие экологически чистые технологии, используемые в данной отрасли. Благодаря постоянному развитию таких технологий автопроизводителями, стоимость электространспорта становится всё более доступной, что в совокупности с множеством иных преимуществ, делает его всё более востребованным и популярным как в гражданском, так и промышленном применении.

В нашей стране электротранспорт также получает все большее развитие. Так Сарапульским электрогенераторным заводом была Разработана унифицированная машина технологического электротранспорта (УМТЭТ) предназначена для транспортировки различных видов грузов и использования в качестве тягача, а также в качестве унифицированного шасси для выполнения различных видов работ (в зависимости от вида навесного оборудования) [4-7]. Реализация данного проекта была направлена на создание высокотехнологичного производства/технологии и решение проблемы конкурентоспособного импортозамещения в сегменте технологического электротранспорта. В результате реализации проекта:

- создана унифицированная машина технологического электротранспорта для транспортировки различных видов грузов и использования ее в качестве тягача на основе экологически чистого электропривода с применением энергосберегающей технологии – рекуперации энергии торможения транспортного средства;
- создана машина технологического электротранспорта для выполнения различных видов работ в цехах на предприятиях машиностроения, легкой и пищевой промышленности, в жилищно-коммунальном хозяйстве, тепличном комплексе, на аэродромах гражданского и военного назначений и в других областях народного хозяйства;
- расширены функциональные возможности современных средств технологического электротранспорта и области их применения;
- решены вопросы импортозамещения в области технологического электротранспорта.

Ключевые научно-технические и технологические задачи, решаемые при создании высокотехнологичного производства/технологии:

- создание платформы УМТЭТ, которую можно использовать для выполнения различных видов работ (в зависимости от вида навесного оборудования) в различных отраслях народного хозяйства;
- создание ряда моделей на базе УМТЭТ для различных предприятий машиностроения, легкой и пищевой промышленности, для жилищно-коммунального хозяйства, для аэродромов и для других областей народного хозяйства;
- создание высокотехнологичного производства энергосберегающей экологически чистой УМТЭТ и ее моделей.

Задачи, на которые был направлен предлагаемый к реализации проект:

- проведение комплекса теоретических, расчетных и экспериментальных исследований создаваемой УМТЭТ;
- разработка конструкторской документации принципиально новой УМТЭТ;
- разработка технологической документации на производство УМТЭТ;
- реорганизация производства под новую УМТЭТ;
- организация высокотехнологичного производства УМТЭТ.

Разрабатываемая УМТЭТ имеет несколько исполнений (модификаций), которые от ее базо-

вой конструкции отличаются наличием/отсутствием навесных передней и задней платформ, наличием/отсутствием прицепного устройства, наличием/отсутствием вала отбора мощности, мощностью двигателя и его системой управления, кабиной закрытого/открытого типа. Примеры созданных УМТЭТ представлены на рисунках 1, 2.

Основные технические характеристики разрабатываемой УМТЭТ:

- габаритные размеры разрабатываемой УМТЭТ с учетом поставленной грузовой платформы и бортов, мм – не более 3400x1300;
- длина грузовой платформы, мм – не менее 2100;
- ширина грузовой платформы, мм – не менее 1300;
- высота грузовой платформы, мм – не более 800;
- масса УМТЭТ без аккумуляторной батареи, кг – не более 900;
- масса снаряженной УМТЭТ – 1500 кг, не более;
- внешний радиус поворота, мм – не более 2900;
- клиренс, мм – не менее 140.



Рис. 1. Созданные варианты исполнения УМТЭТ





Рис. 2. Опытные модели УМТЭТ «Электротележка» и «Электротягач»

Разработка автономного модуля рефрижератора

В данной статье рассмотрен ещё один вариант модификации платформы УМТЭТ, основанный на использовании модуля рефрижератора с питанием от фотоэлектрической установки, располагаемой на его крыше. Актуальность такого решения обусловлена высоким спросом на данную технологию, формируемым высокой долей грузоперевозок продуктов питания (около 70%).



Рис. 3. Опытные модели УМТЭТ «Электротележка» и «Электротягач»

Одним из главных преимуществ предлагаемого решения является автономность, что позволяет использовать его без подключения к бортовой сети. Данное преимущество не только позволяет упростить интеграцию модуля с электротранспортом, но и не окажет существенного влияния на запас хода.

По мнению авторов, использование фотоэлектрических преобразователей в системах энергоснабжения электротранспорта является весьма перспективным направлением развития экологически чистого автомобилестроения [8].

Расчеты основных энергетических характеристик модуля показали, что при объеме камеры 4 м3, фотоэлектрические модули номинальной мощностью 500 Вт позволят поддерживать температуру на уровне -5^{0}С в течение всего дня даже при невысоких средних значениях интенсивности солнечной радиации, составляющей порядка 250-300 Вт/м^2. При этом нужно отметить, что тепловые потери холодильной камеры имеют некоторую прямую корреляционную зависимость с солнечной активностью. Это обстоятельство является ещё одним важным аргументом в пользу использования фотоэлектрических преобразователей в качестве основного электрогенерирующего устройства для модуля.

Для оценки эффективности работы фотоэлектрических преобразователей, установленных на верхней части рефрижератора, был проведен расчет их годовой выработки электрической энергии. Результаты расчета показали, что, не смотря на то что угол установки модулей к горизонту не является оптимальным (0^0 вместо 34^0) [9], снижение среднегодовой энерговыработки составляет всего около 14%, причем в теплое время года разница составляет ещё более низкие значения, что позволяет утверждать о целесообразности данного технического решения. На рисунке 4 приведены графики энерговыработки фотоэлектрической установки:

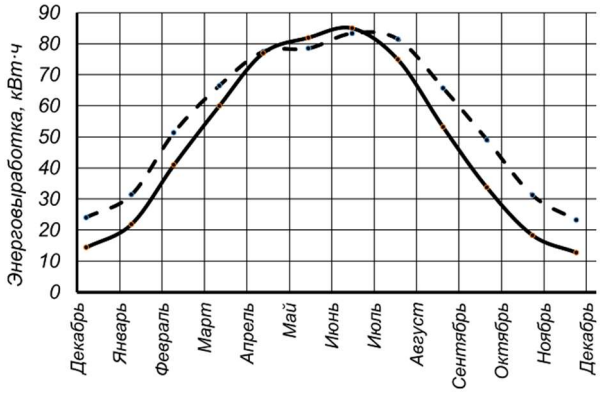


Рис. 4. Графики среднемесячной энерговыработки фотоэлектрической установки (—при угле установки - 0^0; --- при угле установки - 34^0)

Необходимо также отметить, что использование рефрижераторного модуля в комплексе с электротележкой позволяет частично решить ещё одну немаловажную задачу, связанную с отоплением кабины водителя. В основе данного решения лежит принцип работы теплонасосной установки – низкопотенциальная тепловая энергия, отбираемая из рефрижератора и окружающей среды, передается через теплообменник (испаритель) в кабину при более высокой температуре. Использование такой технологии позволяет значительно эффективнее использовать электрическую энергию по сравнению с использованием классических нагревательных систем, особенно при температурах окружающей среды от -5 до +15^{0}С

Анализ показателей надежности УМТЭТ

При разработке конструкции УМТЭТ была поставлена и решена задача анализа показателей надежности УМТЭТ в период ее нормальной эксплуатации [10, 11].

УМТЭТ является принципиально новой машиной, для которой отсутствует статистическая информация для решения вопросов ее надежности. Поэтому будем использовать информацию по комплектующим ее частям, обрабатываемую экспертным методом, и метод экспертной оценки.

Считаем, что эксплуатация УМТЭТ нормальная, техническое обслуживание в соответствии с руководством по эксплуатации, капитальный ремонт осуществляется централизованно в специализированных предприятиях, проявление постепенных отказов не значительное, внезапные отказы проявляются вследствие неблагоприятного сочетания условий производственного и эксплуатационного характеров, скоростные режимы и пробег УМТЭТ небольшие, что связано с характером работы и назначением. В этом случае время безотказной работы составляющих (частей) УМТЭТ можем аппроксимировать экспоненциальными законами распределения, в которых интенсивности отказов $\lambda(t)$ не зависят от времени и равны $\lambda_i = 1/m_i$, где m_i, – средняя наработка до отказа i-ой части УМТЭТ (i =1,15).

УМТЭТ рассматривается как техническая система (рис. 5), состоящая из 15 частей (табл. 1), подчиняющихся экспоненциальным законам. Тогда вероятность безотказной работы УМТЭТ также подчиняется экспоненциальному закону, а интенсивности отказов частей УМТЭТ складываются. Тогда вероятность безотказной работы УМТЭТ определяется по формуле:

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda dt} . \quad (1)$$

Анализ информации по серийно выпускаемой в настоящее время электротележке ЕТ-2013

производства АО «Сарапульский электрогенераторный завод», проведенный группой экспертов, позволили обосновать интенсивности отказов составляющих частей УМТЭТ, которые вычисляются в виде суммы и равны $3{,}4\cdot10^{-5}$. Следовательно, в соответствии с формулой (1) можно определить вероятность безотказной работы УМТЭТ в период нормальной ее эксплуатации по годам (табл. 2), считая, что наработка машины в год составляет 2000 часов (по экспертным данным и требованиям технического задания).

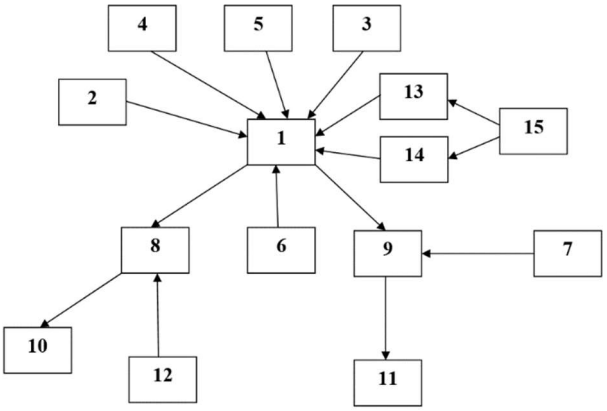


Рис. 5. Структурная схема УМТЭТ
(1 - несущая система (рама); 2- кабина; 3 - грузовая платформа; 4 - прицепное устройство переднее; 5 - прицепное устройство заднее; 6 - комплект аккумуляторных батарей; 7 - тяговый электродвигатель; 8 - мост передний; 9 - мост задний; 10 - движитель передней оси; 11 - движитель задней оси; 12 - управление рулевое; 13 - навесной ковш-отвал; 14 - навесная роторная щетка; 15 - система управления навесным оборудованием)

Таблица 2 *Вероятность безотказной работы УМТЭТ в период нормальной ее эксплуатации*

Время эксплуатации в годах		
1	4	7
0,9786	0,9172	0,8597

Требования технического задания на разрабатываемую УМТЭТ: вероятность безотказной работы не менее 0,95 в течение 1 года. Проведенные исследования показали, что разрабатываемая УМТЭТ соответствует требованиям технического задания.

Проведем анализ выполняемости УМТЭТ требований по долговечности [12, 13]. По допустимому уровню безотказности выбирается рациональная периодичность, при которой вероятность отказа машины F(t) не превышает заранее заданной величины, называемой риском.

Для агрегатов, механизмов и машин, обеспечивающих безопасность допустимая вероятность безотказной работы Rд = 0,9÷0,98 (90÷98 %), для прочих узлов и агрегатов Rд = 0,85÷0,9.

Вероятность безотказной работы УМТЭТ должна быть не менее 0,9. Вероятность безотказной работы УМТЭТ при эксплуатации 4 года (8000 часов) приближается к значению 0,9 (табл. 2). Это означает, что после 4-х лет эксплуатации необходимо провести капитальный ремонт УМТЭТ.

Известно, что после проведения капитального ресурса машины ее ресурс восстанавливается на 75…80 %, т.е. ресурс до списания будет не менее 0,75*14000 часов = 10500 часов, что составляет 5,25 лет. Следовательно, через 4 года можно провести дополнительный капитальный ремонт, что позволит эксплуатировать УМТЭТ еще более года (2500 часов).

Срок сохраняемости – это такая продолжительность пребывания объекта в режимах хранения и/или транспортирования, при которой изменения значений показателей безотказности, ремонтопригодности и долговечности объекта, обусловленные его хранением и транспортированием, находятся в допускаемых пределах.

Гамма-процентный срок сохраняемости на УМТЭТ, заданный в техническом задании на разработку УМТЭТ, равен 8 лет при гамме, равной 95 %. Гамма-процентный срок сохраняемости подобных УМТЭТ машин подчиняется нормальному закону распределения. Математическое ожидание по экспертным данным рассматриваемой случайной величины равен m_t = 16,6 года, а среднеквадратичное отклонение S = 9,4 года. Следовательно, функция плотности распределения:

$$f(t) = \frac{1}{9{,}4\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-16{,}6)^2}{176{,}72}}. \qquad (2)$$

Тогда для гамма-процентного срока сохраняемости 8 лет вероятность того, что показатели безотказности, ремонтопригодности и долговечности, обусловленные хранением и транспортированием УМТЭТ, находятся в допускаемых пределах выхода из строя:

$$F(t) = 1 - \frac{1}{9{,}4\sqrt{2\pi}} \int_0^8 e^{-\frac{(t-16{,}6)^2}{176{,}72}} dt =$$

$$= 97{,}207\ \%.$$

Расчетное значение 97,207 % больше, чем значение гамма, равное 95 %, заложенное в технических требованиях.

Заключение

В настоящее время, развитию концепции перехода от традиционного транспорта, исполь-зующим углеводородное топливо, на электрический оказывается большое значение. В нашей стране электротранспорт также получает все большее развитие. Разработанная Сарапульским электрогенераторным заводом унифицированная машина технологического электротранспорта, является хорошим подтверждением этого.

В Севастопольском государственном университет ведется разработка модуля рефрижератора для УМТЭТ, с питанием от фотоэлектрической установки, располагаемой на его крыше. Приведенные предварительные результаты расчетов подтверждают целесообразность данного решения.

Также был проведены расчетные исследования, показавшие что: расчетный срок службы, разработанной УМТЭТ более 8 лет (18500 часов); расчет срока службы между средними (капитальными) ремонтами у разработанной УМТЭТ обеспечен более 4 лет (более 8000 часов); обоснован гамма-процентный срок сохраняемости безотказности, долговечности и ремонтопригодности УМТЭТ при транспортировании и хранении более 8 лет при гамме, равной 97,207 %.

Работа выполнена в соответствии с темой «Разработка и создание высокотехнологичного производства унифицированной машины технологического электротранспорта», выполняемой постановления Правительства РФ от 09 апреля 2010 г. № 218 (шестая очередь).

Список литературы

1. Юнусов, М.Ю. Влияние автомобильного транспорта на экологическую обстановку города Душанбе / М.Ю. Юнусов, Б.Ж. Мажитов, Н.Б. Сахибов // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования - 2018 г. - № 1 (41) - с. 210-219
2. Парижское соглашение. Конференция Сторон. Двадцать первая сессия. Париж, 30 ноября – 11 декабря 2015 г. Рамочная конвенция Организации Объединенных Наций об изменении климата (2015) // Организация Объединенных Наций: Официальный сайт. URL: https://unfccc.int/files/meetings/paris_nov _2015/application/pdf/paris_agreement_russian_pdf
3. Преобразование нашего мира: Повестка дня в области устойчивого развития на период до 2030 года: резолюция Организации Объединенных Наций (2015) // Организация Объединенных Наций: Официальный сайт. URL: https://undocs.org/ru/A/RES/70/1
4. Разработка концепции унифицированной платформы напольного электротранспорта: Промежуточный отчет по договору между ФГБОУ ВПО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова» и АО «СЭГЗ» [Текст] / Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова; Руководитель работы Н.М. Филькин. – Ижевск: ИжГТУ имени М.Т. Калашникова, 2015. – 145 с. – Исполнители: Р.С. Музафаров, и др.
5. Коршунов, А.И. Системные подходы в конструировании и дизайн-проектировании унифицированной машины технологического электротранспорта (УМТЭТ) [Текст] / А.И. Коршунов, Р.С. Музафаров, М.А. Плетнев и др. // Интеллектуальные системы в производстве: Период. науч.-практ. журнал Ижевского государственного технического университета имени М.Т. Калашникова. – Вып. 2 (23). – Ижевск: ИжГТУ, 2016. – С. 40-47.
6. Филькин, Н.М. Разработка унифицированной платформы напольного электротранспорта [Текст] / Н.М. Филькин, Р.С. Музафаров, А.Ф. Мкртчян и др. // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова: Науч.-теорет. журнал. – Том 20, № 3. – Ижевск: ИжГТУ, 2017. – С. 41-42.
7. Филькин, Н.М. Унифицированная платформа наземного электротранспорта / Н.М. Филькин [и др.] // Патент на промышленный образец 102998. Приоритет промышленного образца 13.04.2017 г.
8. Кузнецов П.Н., Гусева Е.В., Борисов А. А. Современное состояние и направления развития фотоэлектрических энергоустановок // Энергетические установки и технологии. 2018. № 3. С. 51–57.
9. Кузнецов, П.Н. Гибридные ветро-солнечные энергетические установки / П.Н. Кузнецов, В.В. Чебоксаров, Б.А. Якимович // Вестник ИжГТУ им. М.Т. Калашникова - 2020 г. - № 1 (т.23) - с. 45-53
10. Решетов, Д.Н. Надежность машин [Текст] / Д.Н. Решетов, А.С. Иванов, В.З. Фадеев. – М.: Высшая школа, 1988. – 237 с.
11. Филькин, Н.М. Надежность унифицированной машины технологического электротранспорта в период ее нормальной эксплуатации [Текст] / Н.М. Филькин, Р.Ф. Шаихов // Сборник научных статей Международной научно-технической конференции «Автоматизация технологических процессов механической обработки, упрочнения и сборки в машиностроении». – Курск: Юго-западный государственный университет, 2016. – С. 311-315
12. ГОСТ Р 53480-2009. Надежность в технике. Термины и определения. – Введ. 2011-01-01. – М.: ФГУП «Стандартинформ», 2010. – 28 с.
13. ГОСТ Р 51709-2001. Автотранспортные средства. Требования безопасности к техническому

состоянию и методы проверки. – Введ. 2002-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 2001. – 40 с.

References

1. Yunusov, M.Yu. The impact of automobile transport on the environmental situation of the city of Dushanbe / M.Yu. Yunusov, B.Zh. Mazhitov, N.B. Sakhibov // Polytechnical Bulletin. Series: Engineering Research - 2018 - No. 1 (41) - pp. 210-219
2. The Paris Agreement. Conference of the Parties. Twenty-first session. Paris, November 30 - December 11, 2015. United Nations Framework Convention on Climate Change (2015) // United Nations: Official website. URL: https://unfccc.int/files/meetings/paris_nov
3. 3. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development: United Nations resolution (2015) // United Nations: Official site. URL: https://undocs.org/ru/A/RES/70/1
4. Development of the concept of a unified platform-form of outdoor electric transport: Interim-accurate report on an agreement between the Izhevsk State Technical University and Sarapul generator plant [Text] / Izhevsk State Technical University named after M.T. Kalashnikov; Leader of the work N.M. Filkin. - Izhevsk: IzhSTU named after M.T. Kalashnikova, 2015 .- 145 p.
5. Korshunov, A.I. System approaches in the design and design of a unified technological electric transport vehicle [Text] / A.I. Korshunov, R.S. Muzafarov, M.A. Pletnev et al. // Intelligent systems in production: Period. scientific-practical Journal of Izhevsk State Technical University named after M.T. Kalashnikov. - Vol. 2 (23). - Izhevsk: IzhSTU, 2016 - pp. 40-47.
6. Filkin, N.M. Development of a unified platform for outdoor electric vehicles [Text] / N.M. Filkin, R.S. Muzafarov, A.F. Mkrtchyan et al. // Bulletin of IzhSTU named after M.T. Kalashnikov: Scientific-theoretical. magazine. - Volume 20, No. 3. - Izhevsk: IzhSTU, 2017. - pp. 41-42.
7. Filkin, N.M. Unified platform of ground electric transport / N.M. Filkin [et al.] // Patent for industrial design 102998. Priority of industrial design 04.13.2017
8. Kuznetsov P.N., Guseva E.V., Borisov A.A. The current state and directions of development of photovoltaic power plants // Power plants and technologies. 2018. No.3. pp. 51–57.
9. Kuznetsov, P.N. Hybrid wind-solar power plants / P.N. Kuznetsov, V.V. Cheboksarov, B.A. Yakimovich // Bulletin of IzhSTU named after M.T. Kalashnikova - 2020 - No. 1 (vol.23) - pp. 45-53
10. Reshetov, D.N. Reliability of machines [Text] / D.N. Reshetov, A.S. Ivanov, V.Z. Fadeev. - M .: Higher school, 1988 .-- 237 p.
11. Filkin, N.M. Reliability of a unified technological electric vehicle during its normal operation [Text] / N.M. Filkin, R.F. Shaikhov // Collection of scientific articles of the International scientific and technical conference "Automation of technological processes of machining, hardening and assembly in mechanical engineering". - Kursk: Southwestern State University, 2016. - pp. 311-315
12. GOST R 53480-2009. Reliability in technology. Terms and Definitions. - Enter. 2011-01-01. - M.: FSUE “Standartinform”, 2010. - 28 p.
13. GOST R 51709-2001. Motor vehicles. Safety requirements for technical condition and verification methods. - Enter. 2002-01-01. - M .: Publishing house of standards, 2001. - 40 p

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 64.066.22

Прогнозирование энергопотребления при использовании данных мониторинга электрических параметров

П.Н. Кузнецов, Д.Ю. Котельников, Д.Ю. Воронин, А.Г. Хомюк
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия, PNKuznetsov@sevsu.ru

Статья поступила 18.05.2020 г; после доработки 19.05.2020 г

Аннотация

Дорожной картой Национальной технологической инициативы «Энерджинет» предусмотрен переход на интеллектуальные активно-адаптивные сети «SmartGrid». Такой переход предполагает увеличение масштабов использования распределенной генерации, требующей интеллектуального децентрализованного управления, обеспечивая свободный обмен электроэнергией между потребителями, генерирующими компаниями и просьюмерами. В настоящее время в распределительных сетях электросетевыми компаниями производится установка интеллектуального коммутационного оборудования, позволяющего осуществлять мониторинг и сохранение основных электрических параметров, включая динамику энергопотребления. В статье предлагается методика, позволяющая на основе этих данных производить прогнозирование энергопотребления, используя технологию машинного обучения. Результаты проведенных вычислительных экспериментов показывают, что использование нейронных сетей позволяет с довольно точностью (с вероятностью около 95 %) выявлять зависимости в графиках энергопотребления.

Ключевые слова: прогнозирование, энергопотребление, распределенные сети, методика, машинное обучение, SmartGrid

Energy prediction based on electrical parameters monitoring

P.N. Kuznetsov, D.Y. Kotelnikov, D.Y. Voronin, A.G. Homyuk
Sevastopol state university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia. PNKuznetsov@sevsu.ru

Received 18.05.2020 y; received in final form 19.05.2020 y

Abstract

The roadmap of the National Technology Initiative "Energy" provides for the transition to intelligent active-adaptive networks "SmartGrid". Such a transition involves an increase in the use of distributed generation, which requires intelligent decentralized management, ensuring a free exchange of electricity between consumers, generating companies and prosumer [1-3]. At present, in the distribution networks, electric grid companies are installing intelligent switching equipment that allows monitoring and preservation of basic electrical parameters, including the dynamics of energy consumption. The article proposes a technique that makes it possible to forecast energy consumption based on these data using machine learning technology. The results of the computational experiments show that the use of neural networks allows with fairly accuracy (with a probability of about 95%) to reveal the dependencies in the graphs of energy consumption.

Keywords: forecasting, power consumption, distributed networks, methodology, machine learning, SmartGrid

Введение

Рост мирового энергопотребления зависит от различных тенденций: повышение интенсивности производства, увеличение объёмов потребляемой энергии (ввиду усложнения производственных циклов), урбанизации, индустриализации и глобализации.

Вышеуказанные тенденции обуславливают повышенный интерес крупных производителей

и потребителей электрической энергии к прогнозированию энергопотребления.

Это происходит ввиду необходимости адаптивного реагирования на изменение потребностей в обеспечении энергией.

Ввиду многообразия характеристических зависимостей, влияющих на динамику энергопотребления в зависимости от сезона года, выходного, или буднего дня, полученная в ходе прогноза энергопотребления информация даёт возможность снизить финансовые потери компании производителя (например, штрафные санкции при отклонении заявленного энергопотребления от реального, понижении качества поставляемой электроэнергии) и потребителей электроэнергии (улучшение баланса процессов нагрузки энергопотребления).

Кроме того, в перспективных планах развития электроэнергетики РФ, согласно «дорожной карте» Национальной технологической инициативы «Энерджинет» предусмотрен переход на интеллектуальные активно-адаптивные сети «SmartGrid».

Такой переход предполагает увеличение масштабов использования распределенной генерации, требующей интеллектуального децентрализованного управления, обеспечивая свободный обмен электроэнергией между потребителями, генерирующими компаниями и просьюмерами [1-3]. Реализация данной концепции также требует точного прогнозирования энергопотребления в мезо- и микромасштабе.

Для осуществления прогнозирования энергопотребления такого уровня рассматриваются многоуровневые и многоэтапные процессы.

Решение данной задачи напрямую связанно с разработкой методов кластеризации потребителей и их последующей классификацией и идентификации в зависимости от динамики потребления электрической энергии, что, в свою очередь, даст дополнительную информацию для построения экономических моделей развития компаний, производителей электроэнергии.

Цель и задачи исследования

Целью исследования является разработка алгоритма прогнозирования энергопотребления, базирующегося на реальных значениях нагрузки потребителей различных типов.

В ходе исследования требуется решить следующие задачи:

1. Рассмотреть возможность использования журналов нагрузки современного интеллектуального электросетевого оборудования, включающего датчики напряжения и тока, имеющие точность достаточную для коммерческого учета, в качестве основного источника информации об энергопотреблении.
2. Проанализировать существующие методы обработки данных энергопотребления с целью выявления зависимостей (паттернов).
3. Разработать методику и способ прогнозирования суточной динамики энергопотребления на основе выявленных зависимостей.
4. При помощи современных инструментальных средств реализовать разработанный способ и оценить его эффективность на основе реальных данных суточной динамики энергопотребления распределительной сети.

Обработка входных данных

Проанализировав перспективные пути решения рассматриваемых задач, можно сделать вывод, что некоторые аспекты прогнозирования энергопотребления рассмотрены недостаточно подробно – кластеризация данных потребления электрической энергии, а также последующая классификация и идентификация потребителей согласно их динамике энергопотребления.

В данной статье авторами предлагается алгоритм процедуры прогнозирования энергопотребления, основанный на применении нейронных сетей, с его последующей апробацией, используя реальные данные энергопотребления.

Для исследования суточной динамики энергопотребления были получены данные из журналов нагрузки реклоузеров, установленных в различных фидерах распределенной сети.

С целью упрощения работы с данными, была выполнена предварительная обработка журналов, заключающаяся в преобразовании данных в форму таблицы, содержащую столбцы с данными, датой и временем. Работа с таблицами данных сопряжена с анализом различных выборок, взятых из генеральной совокупности (журнал нагрузки реклоузера), следовательно, для корректной обработки представленных данных энергопотребления необходимо исключить из выборки выбросы (шумы).

Ввиду необходимости точного определения паттернов (шаблонов) динамики энергопотребления будет применён медианный фильтр, практическая ценность которого состоит в замене аномальных значений сигнала, на значение медианы числовой последовательности (рис. 1).

Последующая обработка отфильтрованного сигнала, а также выявление характерных паттер-

нов динамики энергопотребления напрямую связаны с применением технологии машинного зрения, основанной на искусственной нейронной сети глубокого обучения.

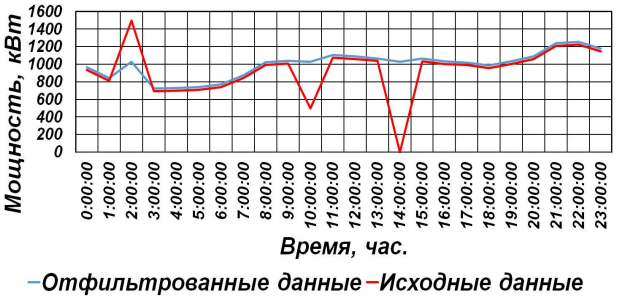


Рис. 1. Пример применения медианного фильтра

Данная технология является упрощённым механизма обработки данных и решения задач, позаимствованного у биологических нейронных сетей и показывает довольно неплохие результаты в распознавании графических изображений.

Основные преимущества искусственных нейронных сетей заключаются в параллельной обработке информации и способности обучаться, то есть – создавать обобщение. Эти преимущества позволяют решать масштабируемые (сложные) задачи, которые до этого считались трудно разрешимыми

Методика нейросетевого прогнозирования графиков энергопотребления

В настоящее время, одним из лучших инструментов, использующихся для глубокого обучения, является фреймворк TensorFlow [4]. Данный инструмент является разработкой компании Google и имеет открытый код, что позволяет гибко встраивать его для решения различных задач.

По своему функционалу TensorFlow является довольно мощным инструментом с большим количеством возможностей, однако работа с ним сопровождается рядом сложностей [5]. Ввиду этого, для работы с данным инструментом была применена библиотека Keras. Эта библиотека является надстройкой над фреймворком TensorFlow и позволяет существенно упростить работу, связанную с формированием нейронной сети.

Для решения задач классификации графиков энергопотребления была использована нейронная сеть, состоящая из двух свёрточных и одного полносвязного слоя (рис. 2).

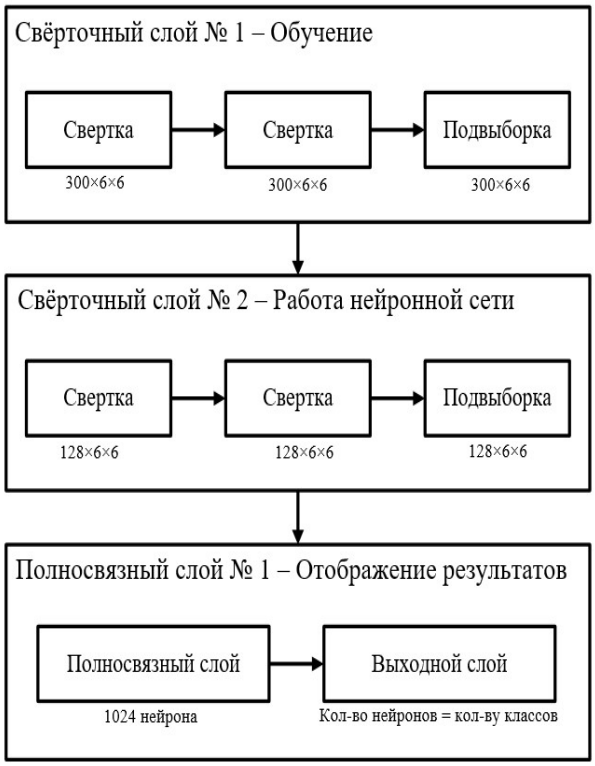


Рис. 2. Упрощённая структура искусственной нейронной сети

Свёрточный слои № 1 и № 2 состоят из двух свёрток и одной подвыборки, которые необходимы для обучения сети процессу выделения характерных признаков паттернов энергопотребления на тестовых данных. Также, в данных слоях, происходит работа нейронной сети по распределению входных данных (графиков динамики энергопотребления) по определённым классам. Слои включают по 300 и 128 карт признаков соответственно размером 6x6, то есть каждый нейрон подключен к части изображения, размером 6x6 пиксел.

Полносвязный слой № 1 необходим для подведения итогов работы двух предшествующих слоёв, то есть обработки входных весов связей на основании которых будет принято решение о принадлежности паттерна к определённому классу. Он состоит из полносвязного слоя, включающего 1024 нейрона и выходного слоя, количество нейронов в котором определяется количеством классов графиков энергопотребления.

Процесс обучения нейронной сети представлен в виде функциональной блок-схемы (рис. 3). Программная реализация модуля была написана на языке программирования Python с использованием библиотек TensorFlow, Keras, Numpy и других.

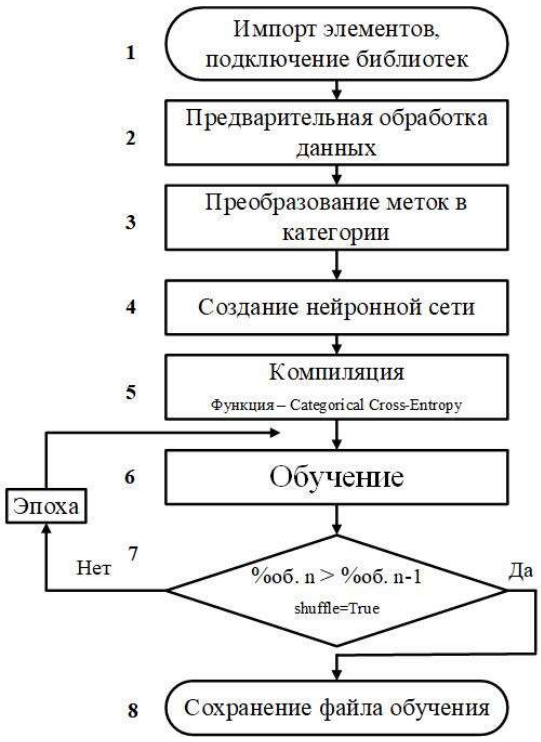


Рис. 3. Функциональная блок-схема свёрточного слоя № 1

Работа выше представленной функциональной блок-схемы описывается следующим алгоритмом:

Шаг 1: Импорт элементов: графики обучающей и тестовой выборок, отдельные модули из библиотек, необходимых для корректной работы нейронной сети. Подключение библиотек: TensorFlow, Keras, Numpy. Библиотека Keras необходима для регулирования процесса обучения нейронной сети. Библиотека Numpy используется для работы с большими массивами данных и матрицами.

Шаг 2: Предварительная обработка данных. Приведение всех изображений графиков обучающей выборки к одному размеру и формату, нормализация пикселей (привести к одной цветовой гамме).

Шаг 3: Преобразование меток в категории. Создание переменных (уникальных цифровых кодов, «понятных» для нейронной сети) и присвоение им меток с последующим преобразованием в категории, ввиду взаимоисключаемости данных меток.

Шаг 4: Создание нейронной сети. Создание нейронной сети прямого распространения (Sequential) путём последовательного добавления необходимых слоёв, а также задания их размера.

Шаг 5: Компиляция. Проверка нейронной сети на ошибки (используется функция Categorical Cross-Entropy).

Шаг 6: Обучение. Запуск скрипта, активирующего процесс обучения. Определение оптимального количества эпох (полных циклов обучения), требуемых для корректного процесса обучения. В ходе процесса обучение важно не дать нейронной сети переобучиться, что приведёт к резкому падению способности сети корректно обрабатывать последующие входные данные. Пример некоторых графиков и обучающей выборки представлен на рис. 4. Для обучения нейронной сети использовались 120 графиков суточного энергопотребления для каждого фидера.

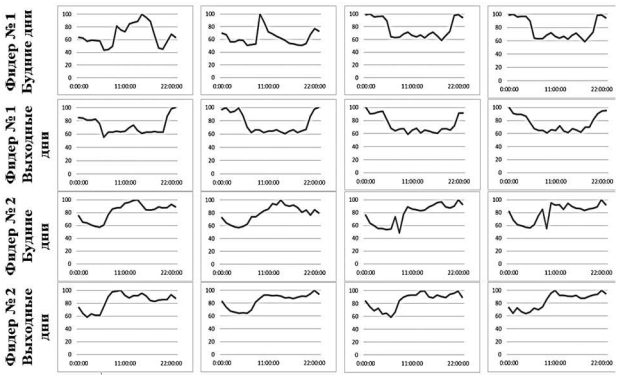


Рис. 4. Пример графиков обучающей выборки

Шаг 7: Сравнение процента правильных ответов тестовой выборки предыдущей эпохи с последующей. Для корректной процедуры сравнения необходимо установить shuffle=True для перемешивания входных данных. Перемешивание позволит процессу обучения сети не зависеть от порядка входных данных.

Шаг «Нет»: В случае большего процента правильных ответов тестовой выборки последующей эпохи, необходимо добавить в цикл ещё одну эпоху для до обучения нейронной сети.

Шаг «Да»: Преобладание правильных ответов в тестовой выборке предыдущей эпохи показывает, что сеть начала переобучаться и процесс обучения необходимо заканчивать. Выбрано оптимальное количество эпох.

Шаг 8: Сохранение файла обучения. Производится сохранение файла обучения с оптимальным количеством эпох, необходимого для дальнейшей работы.

Процесс работы свёрточного слоя № 2 можно представить в виде функциональной блок-схемы (рис. 5).

Шаг 1: Внесение графиков энергопотребле-

ния в рабочую среду нейронной сети. Необходимо перенести выборку из графиков динамики энергопотребления в рабочую среду нейронной сети.

Шаг 2: Подключение библиотек, основные: TensorFlow, Numpy, вспомогательные: OS, Time, Sys, Argparse. OS и Sys необходимы для работы с операционной системой компьютера, а также для доступа к некоторым функциям и переменным интерпретатора Python, Time – для работы с временем, Argparse – для разбиения и обработки аргументов командной строки.

Шаг 3: Проверка наличия файла с перечнем вносимых файлов. Для дальнейшей корректной работы нейронной сети необходимо проверить наличие временного файла с перечнем вносимых файлов с графиками динамики энергопотребления.

Шаг «Да»: Удаление файла. В случае обнаружения вышеуказанного файла его необходимо удалить.

Шаг «Нет»: Создание файла с перечнем вносимых файлов. В случае неуспешной проверки, необходимо создать временный файл с перечнем названий и расширений вносимых данных.

Шаг 4: Считывание строк в файле с их подсчётом. Подсчёт строк с названиями и расширениями всех внесённых файлов для определения количества итераций.

Шаг 5: «for i > подсчитанные строки». Проверка, превысил ли счётчик количество ранее подсчитанных строк.

Шаг «Нет»: Загрузка изображения [i]. Загрузка следующего в перечне файла.

Шаг 6: Подготовка файла. Приведение всех изображений графиков к одному размеру, формату, нормализация пикселей. Оцифровка в пригодный для распознавания нейронной сетью вид.

Шаг 7: Отправка кода изображения в нейронную сеть. Осуществляется отправка преобразованного кода изображения в нейронную сеть.

Шаг 8: Получение результатов от нейронной сети. Определение нейронной сетью на сколько процентов внесённое изображение соответствует определённому классу.

Шаг 9: Сортировка результатов и нахождение максимальных значений. Сортировка полученных результатов, записанных в виде процента соответствия определённому классу, нахождение максимального значения соответствия.

Шаг 10: Перенос файла в папку класса. Перенос i-го файла с изображением в папку, предназначенную для определённого класса.

Шаг 11: Вывод результатов в файл. Дописывание результата классификации в итоговый файл.

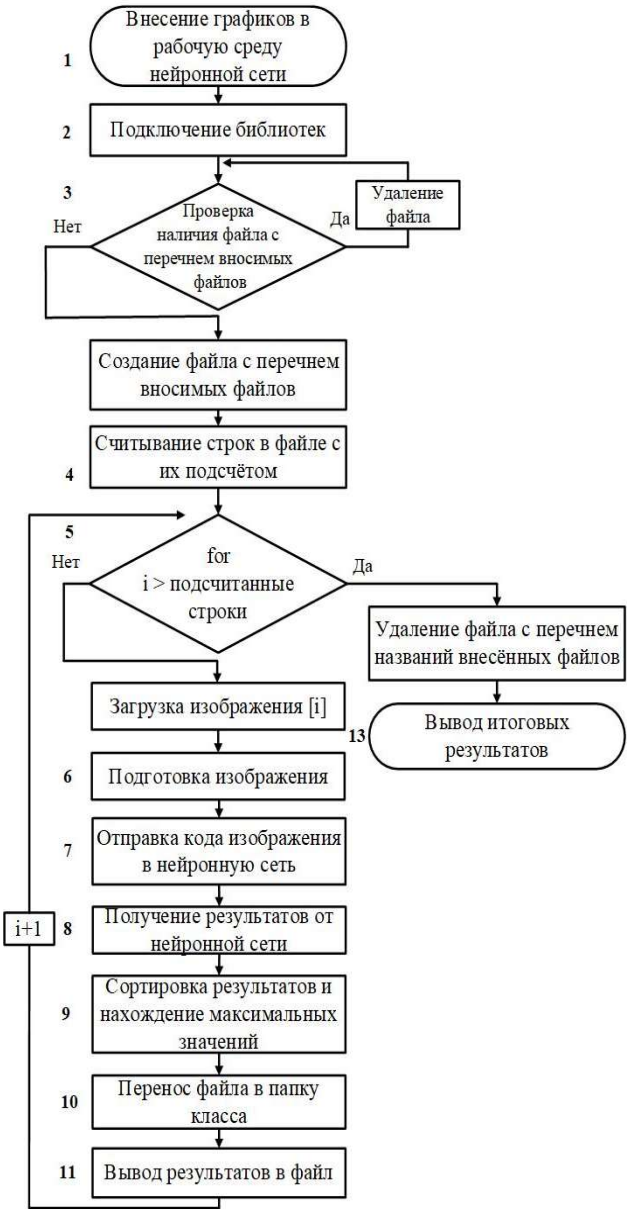


Рис. 5. Функциональная блок-схема свёрточного слоя № 1

Шаг 12: «i+1». Рассмотрение следующего в перечне файла с изображением.

Шаг «Да»: Удаление файла с перечнем названий внесённых файлов. По окончанию работы нейронной сети, необходимо удалить временный файл с перечнем всех внесённых файлов.

Шаг 13: Вывод итоговых результатов. Вывод результатов классификации входных данных (графиков динамики энергопотребления) по определённым классам.

Заключение

Результаты проведенных вычислительных экспериментов, выполненных по предложенной в статье методике, показывают, что использование нейронных сетей глубокого обучения позволяют с довольно высокой точностью выявлять зависимости в графиках энергопотребления. Точность классификации графиков нагрузки, полученных на тестовой выборке, состоящей из 60 изображений, характеризующих суточную нагрузку различных потребителей 2-х фидеров, составила 95 %. Таким образом, на основании предложенной в статье методики, используя журналы нагрузки, можно производить прогнозирование энергопотребления потребителей распределенной сети с довольно высокой точностью.

Также необходимо отметить, что анализ результатов классификации графиков нагрузки потребителей показывает, что ошибочные результаты были получены только при определении будних и выходных дней в рамках одного фидера. Однако, при классификации самого фидера, не возникло ни одной ошибки. Это обстоятельство позволяет предположить, что точность классификации может быть увеличена при более тщательной сепарации обучающих данных, характеризующих выходной и будний день, учитывая, к примеру, праздничные дни, приходящиеся на будний день.

Список литературы

1. Дорофеев В.В. Активно-адаптивная сеть – новое качество ЕЭС России / В.В. Дорофеев, А.А. Макаров //Бесплатная электронная версия журнала «Энергоэксперт» № 4, 2009 – С. 28-34.
2. Чебоксаров В.В., Кузнецов П.Н. Пути решения проблемы нестабильности энерговыработки установок возобновляемой энергетики / В.В. Чебоксаров, П.Н. Кузнецов //Дневник науки № 4 (28), 2019 – С. 60-66.
3. Kuznetsov, P.N., Lyamina, N.V. & Yuferev, L.Y. A Device for Remote Monitoring of Solar Power Plant Parameters. Appl. Sol. Energy 55, 247–251 (2019). https://doi.org/10.3103/S0003701X19040078
4. Abadi, M. TensorFlow: A system for large-scale machine learning / M. Abadi, P. Barham, J. Chen and etc. // 2016 г. — № 12th USENIX Symposium on Operating Systems Design and Implementation (OSDI 16) — С. 265-283

References

1. Dorofeev V.V. Active-adaptive network - a new quality of the UES of Russia / V.V. Dorofeev, A.A. Makarov // Free electronic version of the journal "Energy Expert" No. 4, 2009 - S. 28-34.2.
2. Cheboxarov V.V., Kuznetsov P.N. Ways to solve the problem of instability of energy production of renewable energy plants / V.V. Cheboxarov, P.N. Kuznetsov // Diary of Science No. 4 (28), 2019 - S. 60-66.
3. Kuznetsov, P.N., Lyamina, N.V. & Yuferev, L.Y. A Device for Remote Monitoring of Solar Power Plant Parameters. Appl. Sol. Energy 55, 247–251 (2019). https://doi.org/10.3103/S0003701X19040078
4. Abadi, M. TensorFlow: A system for large-scale machine learning / M. Abadi, P. Barham, J. Chen and etc. // 2016 г. — № 12th USENIX Symposium on Operating Systems Design and Implementation (OSDI 16) — С. 265-283

УДК 620.9 (621.315)

Способы снижения потребления топлива дизельными электростанциями

Ю.А. Майорова[1], Е.В. Пащук[2], Н.Н. Смокталь[3]
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33 , г. Севастополь, 299053, Россия. [1]gaika20041983@mail.ru [2] jpashuk@mail.ru [3] NNSmoktal@sevsu.ru

Статья поступила 13.05.2020 г.; после доработки 15.05.2020 г.

Аннотация

В статье выполнен обзор существующих дизельных установок. Предложены методы повышения эффективности дизельной установки. Для понижения расхода топлива дизельная энергия поставляется с зарядным выпрямителем, буферным накопителем и автономным инвертором. Предлагается улучшить режим работы дизельной электростанции, содержащий ряд дизель-генераторов, с использованием блока прогнозирования нагрузки и датчика температуры. Датчик температуры окружающей среды и посылает сигнал в модуль прогнозирования нагрузки, который определяет прогнозируемую мощность нагрузки дизельной электростанции. В зависимости от величины планируемой мощности один или несколько дизель-генераторов включается в работы в соответствии с критерием минимального удельного расхода топлива. Предлагаемые в статье графики дизельных электростанций позволяют оптимизировать режим работы станции и повысить ее эффективность работы за счет снижения расхода топлива

Ключевые слова: дизель-генератор, буферный накопитель энергии, выпрямительно-зарядное устройство, датчик температуры, нагрузка, расход топлива, дизельная электростанция.

Ways to reduce fuel consumption diesel power plants

Ju.A. Majorova[1], E.V. Pashhuk[2], N.N. Smoktal[3]
"Sevastopol State University", 33 Universitetskaya str., Sevastopol, 299053, Russia.
[1]gaika20041983@mail.ru [2] jpashuk@mail.ru [3] NNSmoktal@sevsu.ru

Received 13.05.2020 y; received in final form 15.05.2020 y.

Abstract

This article provides an overview of existing diesel installation (engine). Methods of increasing efficiency of diesel engine are proposed. To reduce fuel consumption, diesel power is supplied with a charging rectifier, buffer storage and an autonomous inverter. It is proposed to improve the operating mode of a diesel power plant containing a number of diesel generators using a load prediction unit and a temperature sensor. The ambient temperature sensor sends a signal to the load flow module, which determines the predicted load power of the diesel power plant. Depending on the value of the planned power, one or more diesel generators are put into operations in accordance with the criterion of minimum specific fuel consumption. The diesel power plant schedules proposed in the article allow optimizing the operation mode of the station and increasing its efficiency by reducing fuel consumption.

Keywords: diesel generator, energy storage buffer, rectifier-charger, temperature sensor, load, fuel consumption, diesel power station.

Введение

Россия имеет богатый топливно-энергетический потенциал и до недавнего времени тематика альтернативной энергии не была насущной и злободневной. Однако, в последнее время, появилось понимание того, что расходование природных богатств должно быть рациональным. Тут возникает возможность широкого использования потенциала возобновляемых источников

энергии. Для решения вопросов электроснабжения потребителей, все более популярными становятся автономные источники электроэнергии.

В настоящее время практичным и эффективным решением проблем автономного энергоснабжения различных объектов является дизельные электростанции. Автономные электростанции, построенные на основе дизель-генераторных установок, широко используются как основные источники питания для стационарных объектов, удаленных от централизованных систем энергоснабжения, для повышения качества питания потребителей. Говоря об их уникальности, можно отметить низкую стоимость оборудования, достаточную надежность, быструю окупаемость и долговечность.

Постановка задачи

Дизельные электростанции (ДЭС) нашли свое широкое применение, как источники постоянного либо аварийного электроснабжения в виду того, что дизельное топливо не обладает летучестью, как пары бензина или газ, и даже его значительная утечка не создает опасности окружающим и работникам.

Кроме того, одним из важных показателей ДЭС является ее экономичность. Она определяется отношением вырабатываемой энергии к расходу топлива за час работы.

Создание автономных систем электроснабжения на базе ДЭС приводит к необходимости решения ряда задач. Одна из них – снижение расхода топлива дизельными электростанциями.

Снижение расхода топлива на ДЭС является актуальной задачей и будет оставаться ею в ближайшее десятилетие из-за отсутствия готовых к внедрению энергетических альтернатив.

Существующие ДЭС не позволяют во многих случаях генерировать электроэнергию с параметрами, удовлетворяющими требованиям ГОСТ 13109-97 [1]. Кроме того, изменения электрической нагрузки уменьшает продолжительность работы ДЭС в номинальном режиме. Поскольку характер нагрузки автономной ДЭС переменный, это приводит к недоиспользованию номинальной мощности электрогенератора, снижения ее КПД и нерациональному расходу топлива.

Учитывая, что основную долю затрат (около 80%) в себестоимости электрической энергии, вырабатываемой дизельной электростанцией (далее – ДЭС), составляют затраты на топливо, то самым важны показателем определяющим экономические характеристики ДЭС, можно назвать удельный расход топлива на выработку 1 кВт·ч электроэнергии.

Данный показатель определяется величиной загрузки дизельного двигателя и частотой вращения его вала.

На рис. 1 изображено поле возможных режимов работы дизельных двигателей, выделенных на графике эффективной мощности N_e в зависимости от частоты вращения вала n (график изображен в относительных единицах, за базу в которых приняты номинальные значения мощности и частоты) [2].

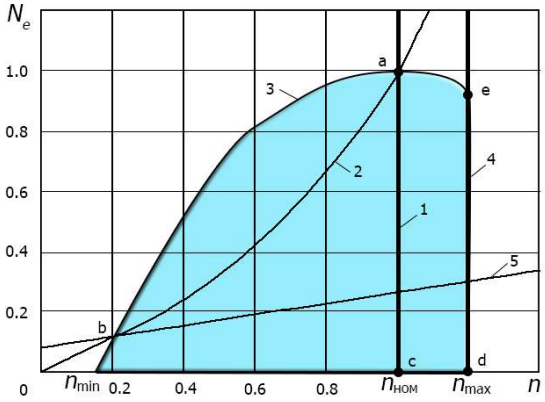


Рис.1. Поле возможных режимов дизельных двигателей

Поле, сверху ограничивается кривой 3, которая соответствует максимальной мощности для числа оборотов n, справа прямой 4, которая соответствует максимально возможному числу оборотов n_{max}. Точка b, является минимальным устойчивым числом оборотов дизеля n_{min}.

Рабочие режимы дизельных двигателей зависят от способа их эксплуатации. Так, в судовых двигателях, рабочие режимы приблизительно располагаются на одной кривой винта 2, которая представляет собой параболу. Возможные режимы эксплуатации дизелей транспортных средств показаны на рис.1 заштрихованной областью, ограниченной сверху кривой 3 и справа прямой 4.

Стационарным условиям работы двигателей общепромышленных ДЭС соответствует прямая 1, которая проходит через значение номинального числа оборотов дизеля $n_{ном}$, и ограниченная точкой a, которая соответствует номинальной мощности данного скоростного режима. Область допустимых нагрузок дизельных двигателей снизу ограничена прямой 5, которая представляет собой минимальную мощность, допустимую при длительной работе дизеля. Выходной вал дизельного двигателя механически связан с

ротором электрогенератора, преобразующим механическую энергию в электрическую энергию. В качестве генератора чаще всего используют синхронные электрогенераторы с электромагнитным возбуждением, дающие возможность достаточно просто выполнять регулированные амплитуды выходного напряжения.

Для достижения стабильности выходной вырабатываемой энергии, на ДЭС устанавливают регуляторы частоты и величины напряжения.

На рис.2 изображена структурная схема общепромышленной ДЭС.

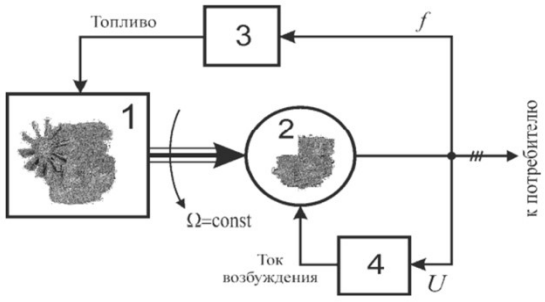


Рис.2. Структурная схема общепромышленной ДЭС: 1−дизельный двигатель; 2−сихронный генератор; 3−регулятор частоты вращения дизеля; 4−регулятор выходного напряжения

Дизельный двигатель 1 приводит во вращение ротор синхронного генератора 2. Частота напряжения *f* на выходе генератора пропорциональна частоте вращения ротора Ω. А величина напряжения *U* пропорциональна току возбуждения генератора. Регулятор частоты вращения 3 определяет частоту выходного напряжения и, воздействуя на силу топливоподачи дизеля, сохраняет постоянной частоту вращения вала двигателя, гарантируя тем самым стабилизацию частоты выходного напряжения в каждом режиме работы.

Регулятор напряжения 4 путем влияния на ток возбуждения генератора поддерживает величину выходного напряжения близкую к заданной при всех допустимых нагрузках.

Описанная выше конструкция установки обладает достаточно высокой простотой, в связи с чем на практике она применяется чаще всего в автоматизированных источниках электрической энергии.

Преимуществом данной схемы построения ДЭС является максимальная простота, как систем регулирования, так и электромеханической части. Высокий КПД электрической части системы обеспечивает отсутствие силовых электронных преобразователей, что так же снижает стоимость ДЭС. Схема может применяться для проектирования электростанций в обширном диапазоне мощностей от единиц до тысячи кВт. Однако, при работе с меняющимися неравномерными нагрузками, характерными для автономных потребителей, схема имеет существенный недостаток – малую эффективность.

С целью повышения эффективности работы дизельной электрической станции может быть использован метод снижения величины удельных затрат топлива, которые необходимы для выработки 1 кВт·ч электрической энергии. Однако используемые в настоящее время на большинства дизельных электрических станций методы управления рабочим процессом не могут привести к минимизации потребления топливных ресурсов в зависимости от величины загрузки ДЭС.

Все основные методы, которые могут быть использованы с целью повышения энергетической эффективности работы автономных ДЭС, можно разделить на основе таких факторов, как увеличение коэффициента полезного действия ДЭС, оптимизация работы дизельной электрической станции, сглаживание графиков потребления электрической энергии, использование местных топливных источников, использование возобновляемых энергетических ресурсов.



Рис.3. Методы увеличения энергоэффективности ДЭС

Базируясь на знании того, что дизельная электрическая станция представляет собой конечное устройство, можно с уверенностью сказать, что изменить какие-либо из ее характеристик представляется, просто-напросто, невозможным.

В связи с вышесказанным, процессы оптимизации режимов работы дизельных электрических станций требуется выполнять на этапах конструирования дизельных установок и в про-

цессе разработки системы электрического снабжения.

При этом по конструктивным особенностям следует отдавать предпочтение машинам с синхронным генератором и электронным регулятором частоты оборота двигателя.

Данная электромеханическая система получает значительный выигрыш по эффективности при внедрении соответствующего программного обеспечения в микропроцессорные контроллеры, связывающие данную систему с преобразователем частоты, установленным на подстанции.

Важным и эффективным способом является изначальная правильная оценка технологической работы объекта, его электроэнергетичекой емкости и составления предварительного графика нагрузок. Выбор в пользу конфигурации массива ДЭС или выбора в пользу одиночного агрегата, должен полагаться на результаты технико-экономического обоснования или эскизного проекта.

В процессе работы дизельной электрической станции к числу основных способов, которые позволяют повысить ее работоспособность, относятся:

- проведение своевременного и высокоэффективного технологического обслуживания и, при возникновении необходимости;
- выполнение всех необходимых требований, которые прописаны в инструкциях по работе с устройствами;
- выполнение всех необходимых правил по технике безопасности.

Оптимизация режимов ДЭС предполагает использование дизель-генераторов в режиме приближенному к оптимальному по коэффициенту загрузки. Для создания таких условий работы применяется оперативное управление группой дизель-генераторов в составе ДЭС относительно суточных и сезонных изменений графика электропотребления.

Данный способ применяется на электростанциях большой мощности.

Данный способ применяется на электростанциях большой мощности.

В случае с использованием дизельных электрических станций низкой мощности наиболее перспективным оказывается решение, которое состоит в оптимизации режимов с помощью применения инверторных дизельных электрических станций.

Такие ДЭС позволяю получить наиболее экономичные режимы для работы дизельного генератора.

С целью увеличения коэффициента полезного действия более мощного ДГ, используется так называемая когенерация.

Исходя из целей энергетической стратегии Российской Федерации, до 2035 года, Министерством энергетики планируется развитие технологий использования возобновляемых источников энергии (далее – ВИЭ), в том числе для «электро-и теплоснабжения автономных потребителей, находящихся за пределами систем централизованного энергоснабжения» [3].

Согласно стратегии, ожидается, что к 2035 году доля возобновляемых источников энергии увеличится до 3,7% в общем объеме ввода мощностей электростанций, в производстве электроэнергии – до 2,2%, а в последствии − замещение локальной дизельной генерации.

Количество источников возобновляемых энергетических ресурсов на территории Российской Федерации создает ситуацию, при которой, технический потенциал ВИЭ на два порядка превышает современное энергопотребление, однако, на полную мощность данный ресурсный потенциал не используется. По статистике из общего количества энергии, вырабатываемой электростанциями малой мощности, только менее 10% приходится на долю возобновляемой энергетики.

Таблица 1. *Данные по установленным мощностям и количестве вырабатываемой электроэнергии электростанциями малой мощности.*

Тип электростанций	**Установленная мощность, %**	**Выработка электроэнергии, %**
ДЭС	55,35	31,28
ГПУ	17,41	23,40
ГТУ	0,54	0,74
ПТУ/ в т.ч. на биомассе	23,13/0,99	36,93/2,05
Мини-ГЭС	2,72	5,57
ВЭС	0,09	0,03
ГеоТЭС	0,77	2,05

Основными преимуществами возобновляемых источников энергии являются их повсеместное распространение, практически неисчерпаемый потенциал и чистота окружающей среды. Но изменчивость их качества энергии ограничивает практическое применение.

Это приводит к неравномерности производства электрической энергии, зависимости электрогенерации от метеорологических условий,

что определяет важность совместного использования возобновляемых источников энергии с гарантированными источниками энергии топлива.

Изменив режим работы дизельного двигателя с постоянной частоты вращения на переменную, можно повысить эффективность ДЭС [4]. Из рис.1 следует, что если дизельная загрузка ниже номинальной мощности, то можно обеспечить ее стабильную долговременную работу на более низких скоростях, которые характеризуются значительно более низким удельным расходом топлива. При переводе ДГ на переменную частоту вращения, параметры входного напряжения, генерируемого синхронным генератором, изменяются. Для обеспечения стабильных параметров выходного напряжения ДЭС требуется введение в систему силовых преобразователей (управляемых выпрямителей, преобразователей и инверторов), что усложняет систему.

Обобщенная структурная схема построения инверторной ДЭС показана на рис.4.

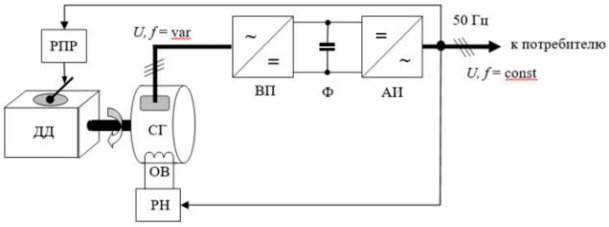


Рис.4. Обобщенная структурная схема ДЭС инверторного типа

Дизель-генератор, состоящий из дизельного двигателя (ДГ) и синхронного генератора (СГ) с электромагнитным возбуждением, вырабатывает электроэнергию в рассматриваемой электростанции. В зависимости от величины электрической нагрузки, регулятор положения рейки (РПР) топливного насоса обеспечивает автоматическое управление режимами работы ДД по заданному закону. Регулятор напряжения (РН) генератора осуществляет управление величиной тока обмотки возбуждения (ОВ), поддерживая напряжение на выходных зажимах СГ в требуемых пределах.

Стабилизация выходного напряжения U и частоты f генерируемого тока обеспечивается при помощи силового полупроводникового каскада, который состоит из управляемого выпрямителя-преобразователя (ВП), фильтра (Ф) и автономного инвертора напряжения (АИ).

Выпрямитель-преобразователь, помимо преобразования трехфазного переменного напряжения в постоянное напряжение, гарантирует поддержание величины коэффициента мощности на входе, близким к единице, а также стабилизацию выходного напряжения во всех эксплуатационных режимах СГ [5].

Стабильные параметры выходной электрической сети при резких изменениях нагрузки и, соответственно, высокое качество вырабатываемой электрической энергии, а также возможность максимальной унификации используемого электрооборудования, позволяющая довольно просто освоить выпуск модельного ряда ДЭС в широком диапазоне мощностей являются преимуществам этой схемы. Кроме того, указанная схема обеспечивает возможность подключения потребителей постоянного тока непосредственно к шине постоянного тока ДЭС.

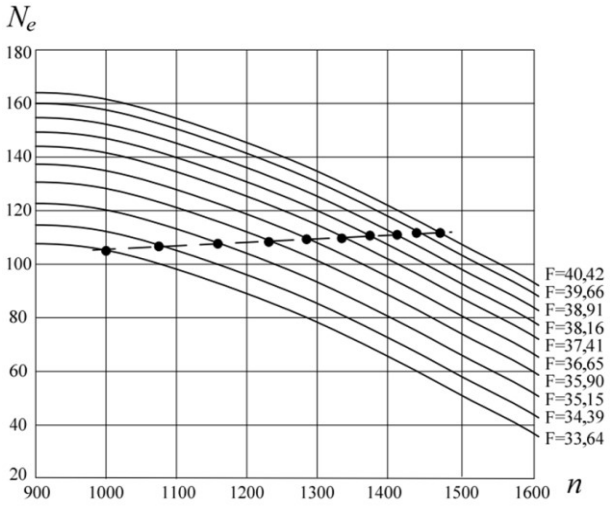


Рис.5. Скоростные характеристики дизеля

Однако стоит отметить, что необходимость использования силовой электроники на полную мощность электростанции, а также очень сложные системы управления, будут являться недостатком данной схемы. Двойное преобразование энергии снижает КПД электрической части ДЭС, сужая область практического применения таких станций диапазоном от единиц до сотен кВт, последующее увеличение мощности связано с резким увеличением стоимости силовой преобразовательной техники.

Для того, чтобы разобраться в вопросах повышения эксплуатации оборудования, применяемого на ДЭС, требуется проводить глубокий анализ рабочих режимов изделий.

Абсолютно каждая установка, потребляющая энергию и преобразующая ее в другой вид энергии, имеет одну важнейшую характеристику

– КПД.

Под коэффициентом полезного действия ДГ понимается отношение мощности, которая направлена на вал генератора, к той мощности, которая получается поршнем за счет наличия давления газов, которое возникает в процессе воспламенения применяемого топлива. Фактически эта величина равна энергии, преобразуемой из тепла в механику.

КПД дизельного двигателя полностью характеризует удельный расход топлива на выработку 1 кВт·ч электрической энергии. КПД дизельного двигателя можно увеличить при создании сопротивления движения воздуха из-за отсутствия дроссельной заслонки, но это приводит к повышению расхода топлива.

Проводя анализ энергетических характеристик дизеля, используем его нагрузочно-скоростную характеристику, которая устанавливает зависимость его эффективной мощности N_e, абсолютного $G_т$ или удельного расхода топлива g_e от частоты вращения вала n. Нагрузочно-скоростная характеристика дизеля может определяться экспериментально, на основании результатов обработки ряда нагрузочных характеристик, соответствующих различным частотам вращения.

На рис.5 представлено семейство скоростных характеристик дизеля $N_e = f(n)$ для различных значений абсолютного расхода топлива F. Из рисунка видно, что устойчивый режим работы дизеля при нагрузке 100 кВт обеспечивается при расходе топлива от 33,64 до 40,42 кг/ч. При этом рабочий диапазон частот составляет 1000-1500 об/мин.

Анализ энергетических характеристик дизельного двигателя показал, что переключение его на более низкую скорость вращения в режиме малых нагрузок обеспечивает экономию топлива до 40% от номинального режима при снижении скорости вращения до 50%. Для типичного графика нагрузок автономного потребителя экономия топлива будет варьироваться от 20 до 30% [6].

На рис. 6 приведена нормальная и максимальная, полученная с учетом использования критерия минимума потребления топлива, кривые выходной мощности дизельного генератора в зависимости от того, с какой частотой происходит вращение. Полученные кривые были построены в так называемых относительных единицах (в качестве основы применялась номинальная величина мощности).

Используя их, можно произвести оценку мощности ДГ в зависимости от частоты.

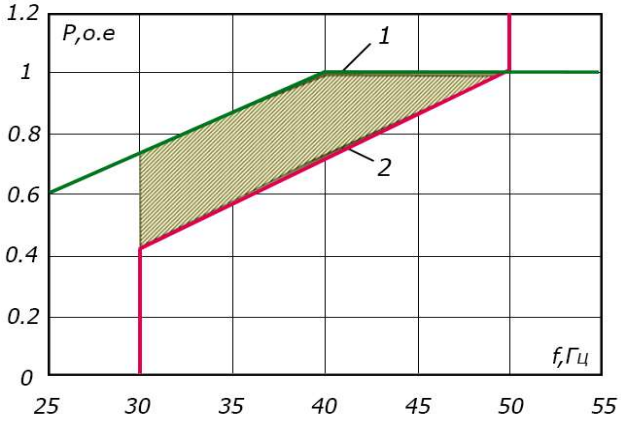


Рис.6. Предельная и оптимальная мощности СГ на разных частотах вращения

График 1 описывает максимально возможное значение мощности ДГ с учетом всех возможных ограничений. Горизонтальная часть графика ограничивается величиной напряжения, а наклонная – значением тока обмотки.

Постепенное снижение рабочей частоты оказывает существенное влияние на снижение электродвижущей силы холостого хода. Это приводит к тому, что процесс регулировки напряжения ограничивается также тепловым режимом обмотки возбуждения. Следовательно, если частота вращения составляет 30 Гц, то номинальная величина напряжения может быть получена и на холостом ходу.

График 2 отвечает за оптимальную нагрузку синхронного генератора при наименьшем потреблении дизельным генератором. Таким образом, можно с уверенностью сказать, что СГ будет выдавать требуемую мощность на каждой частоте.

Для дизельной электростанции, снабжающей электричеством децентрализованных потребителей, важнейшими характеристиками являются количество и мощность установленных силовых агрегатов. Этими показателями определяется надежность электроснабжения и от них во многом зависит эффективность работы ДЭС. В соответствии с [7] суммарная мощность рабочих дизельных электрических установок обязана покрывать максимальную расчетную нагрузку с учетом собственных потребностей ДЭС и обеспечивать запуск электродвигателей.

Стоит особенно отметить, что в нормативных документах полностью отсутствуют какие-либо данные, которые могут быть использованы для выбора числа ДГ и их мощности. Количество

установок, которое требуется использовать в процессе работы ДЭС, должно быть выбрано с учетом так называемого графика загрузки, а также номенклатурой ДГ. Данные характеристики являются ключевыми, поскольку именно от их величины зависят все технические и экономические параметры разрабатываемой электрической станции.

Определение рационального числа ДГ, которые позволяют достичь максимальных технических и экономических показателей дизельной электрической станции, связано с огромным числом противоречащих данных. К числу главных проблем, которые возникают в данном вопросе, можно отнести:

1. Необходимость постоянного технического обслуживания ДГ, а также проведения необходимых ремонтных работ. В процессе проведения вышеперечисленных работ происходит отключение оборудования, что приводит к существенному снижению показателей надежности обеспечения населения электрической энергией. Важно подчеркнуть, что время и периоды отключения ДГ зависят от их структуры, размеров и сложности.

2. Разница определенных групп потребителей электрической энергии что в итоге оказывает влияние на величину необходимой выходной мощности. Стоит отметить, что обычно принято загружать ДГ на величину, которая составляет 25-80% от его номинальной мощности. В случае, если загрузка превышает указанный диапазон, то это становится причиной быстрого выхода изделия из строя. При низкой нагрузке существенно растет рост потребления топлива и появляется эффект карбонации.

3. Величина расхода топлива, которое необходимо для выработки 1 кВт·ч энергии ДГ, зависит от его типового размера.

В работе [8] описывается методика, которая используется для проведения оптимизации количества ДГ, применяемых на дизельной электрической станции, а также их мощности. В рамках данной методики вычисляется величина минимальных приведенных финансовых затрат в течение года, которые необходимы для поддержания необходимого уровня электрического обеспечения населения.

Цена дизельной электрической станции рассчитывается в соответствии с данными, которые указаны в [9,10].

Удельный эффективный расход энергетического топлива вычисляется с помощью нормативных документов на используемые на ДЭС ДГ.

Для приближенного расчета удельного эффективного расхода топлива дизельной электростанции используют формулу умножения мощности на коэффициент 0,184-0,220 кг/кВт/час. Формула выведена практическим путем-установлено, что на производство одного киловатта 184 – 220 грамм дизтоплива. Информацию о потреблении горючего, можно также узнать из технического паспорта, как правило в нем, указывается значение для максимальной загрузки.

Важным требованием, предъявляемым ко всем генераторным установкам, в том числе и к дизельным, является экономичность. Её оценивают исходя из объёма горючего, необходимого для генерации одного киловатта электроэнергии в течении часа. Такую систему оценки используют в России, странах Европы и большинстве стран Азии.

На практике получается, что потребление топлива ДГ зависит от следующих факторов:

- соответствия номинальной мощности и нагрузки;
- качества топлива;
- состояния воздушных масляных и топливных фильтров;
- исправности электронной системы управления;
- состояние поршней, степени износа двигателя, отсутствия/наличия отложений и нагаров в камере сгорания, смазки трущихся деталей и т.д.;
- использования сезонных видов топлива, соответствующих ГОСТ;

Описывая эффективность расхода топлива необходимо указать и факторы, отрицательно влияющие на данный аспект.

Все методики расчета дают довольно точные значения, но существует ряд факторов, влияющий на потребление топлива.

Документы предполагают работу дизельных установок при оптимальных условиях – температуре 20°С, влажности 50% и давлении 750 мм рт. ст.

Кроме процесса износа и нагрузки на выходе, на величину расхода топлива оказывают влияние следующие факторы:

- климатические условия;
- влажность;
- давление воздуха;
- качество топлива.

Исходя из данных, приведенных в работе [11], производится расчет коэффициента, кото-

рый определяет величину технического применения ДГ различных видов.

В рамках проведения данной работы будет решена задача оптимизации определения типа ДГ для дизельной электрической станции, которая обеспечивает электрическое снабжение автоматизированного объекта, у которого в течении года наблюдается стабильный график суточной нагрузки (показан на рис.7).

Будем предполагать, что данная характеристика была получена только с учетом затрат электрической энергии на собственные нужны дизельной электрической станции.

Для того чтобы произвести выбор необходимого ДГ дизельной электрической станции, введем следующие допущения:

1. Мощность всех ДГ должна на ¼ превышать номинальную мощность, потребляемую в течении суток. Данное введение использовать каждый ДГ примерно на 80% своей мощности.
2. С целью наиболее эффективного технического обслуживания все применяемые на дизельной электрической станции ДГ должны относиться к одному виду.
3. Наибольшее число ДГ дизельной электрической станции не должно превышать восьми единиц.

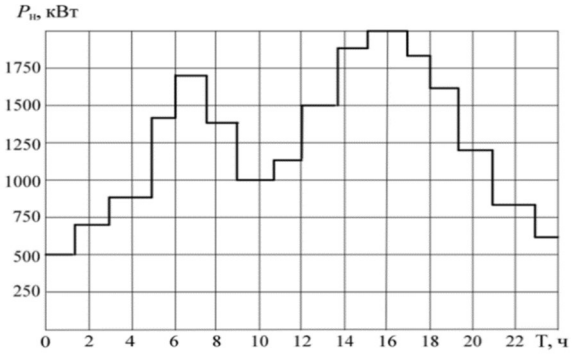


Рис.7. Суточный график нагрузки децентрализованного потребителя

С учетом графика, приведенного на рис.6, можно использовать следующие варианты конструкции дизельной электрической станции:

- 2 ДГ, мощность каждого из которых составляет 1600 кВт;
- 4 ДГ, мощность каждого из которых составляет 630 кВт;
- 6 ДГ, мощность каждого из которых составляет 315 кВт;
- 8 ДГ, мощность каждого из которых составляет 315 кВт.

Для того, чтобы провести оценку текущего показателя надежности ДГ ДЭС, можно применять выражения биноминального закона распределения вероятности, которые приведены в работе [11].

Исходя из того, какую номинальную мощность имеют ДГ, можно, в соответствии с [10], вычислить следующие коэффициенты:

- технологического использования;
- вынужденного простоя;
- загрузки ДГ.

Таблица 2. *Вероятность нахождения электроагрегатов ДЭС в рабочем состоянии.*

i(m)	**0**	**1**	**2**	**3**
$P_{гi}$, **кВт**	0	500	1000	1500
$K_г^{P_{гi}}$	$5{,}3\cdot10^{-7}$	$3{,}2\cdot10^{-5}$	0,00081	0,01099
i(m)	**3**	**4**	**5**	**6**
$P_{гi}$, **кВт**	1500	2000	2500	3000
$K_г^{P_{гi}}$	0,01099	0,08332	0,33698	0,56787

При проведении подобного рода расчетов важно грамотно выбрать удельный показатель ущерба, который может быть нанесен в связи с введением внеплановых ограничений. Исходя из анализа зарубежной литературы, данный показатель принято выбирать в диапазоне от 2 до 4,5 долларов на кВт·ч. В Российской Федерации в соответствии с [12] данный параметр принято выбирать в диапазоне от 40 до 100 рублей на кВт·ч. Приведенные величины, что очевидно, представляют собой средние значения.

В таблице 2 приведены данные, которые были получены в процессе вычисления коэффициента готовности. Суммарное число различных состояний в данном случае было равно семи. В таблице 3 приведены данные по ряду мощностей нагрузки.

Таблица 3. *Вероятность работы ДЭС на нагрузку потребителя*

J	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
P_{Hj}, **МВт**	0,5	0,7	0,9	1,4	1,7	1,3	1	1,1
J	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**	**16**
P_{Hj}, **МВт**	1,5	1,9	2	1,8	1,6	1,2	0,8	0,6

На рис. 8 приведен пример ежедневного гра-

фика работоспособности ДГ дизельной электрической станции, в состав которой входит четыре ДГ.

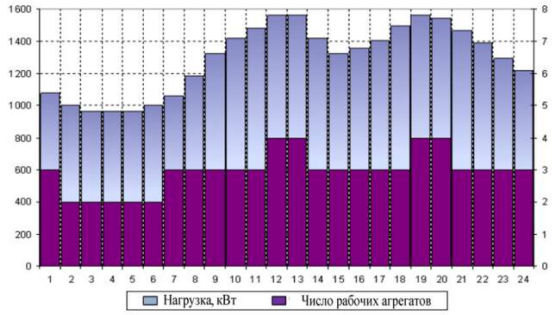


Рис.8. Пример суточного графика работоспособности ДГ ДЭС

Процесс проведения вычисления НУР ДЭС осуществляется с использованием значений основных технических характеристик ДГ, которые указываются в паспортах на определенные виды ДГ, справочных пособия или каталогах предприятий, занимающихся производством ДГ.

Обычно в таких документах принято приводить те технические характеристики, которые полностью соответствуют нормальному режиму работы ДГ. К числу данных параметров относятся удельный расход потребляемого дизельным генератором топлива, коэффициент полезного действия дизельной установки (далее по тексту – КПД), потребляемую мощность ДГ и т.п.

При вычислении НУР необходимо использовать специальные коэффициенты, которые отвечают за корректировку данных о потреблении энергетического топлива ДГ, взятых из первоисточника, на:

1) нагрузку, которую планируется получить;
2) величину износа ДГ;
3) процессы запуска и остановки;
4) отведение тепла от газоводогрейных котлов, выступающих в роли утилизаторов;
5) потребление электрической энергии, которая затрачивается на собственные нужды;
6) теплотворную способность топлива.

Процедуру проведения расчета количества потребляемого топлива ДГ обычно принято выполнять в соответствии с [3]. В ходе проведения расчетов по данному справочнику, в рамках данной работы предполагается, что цена за тонну энергетического топлива составляет 211 тыс. рублей. Кроме этого, процент финансовых затрат на приобретение данного топлива, которое применяется для ДГ, составляет 65%. Данные предположения дают возможность произвести расчет эксплуатационных издержек, которые направлены на процессы технического обслуживания ДЭС, в течение одного года.

***Таблица 4**. Результаты решения оптимизационной задачи*

Количество агрегатов ДЭС	**2**	**4**	**6**	**8**
Номинальная мощность ДЭС (кВт)	1600	630	500	315
Коэффициент технического использования	0,87	0,87	0,91	0,91
Цена комплектной ДЭС (тыс.руб.)	12132	4111	2700	1710
Общие капитальные вложения в ДЭС	24264	16444	16200	13680
Удельный расход топлива ДЭС (г/кВт·ч)	164	171	177	185
Суммарный годовой расход топлива (тонн)	2010,6	1981,7	2038,9	2119,1
Годовые затраты на топливо (тыс.руб.)	42222	41617	42818	44501
Годовые издержки на обслуживание ДЭС	64957	64026	65873	68463
М.О. недоотпуска ЭЭ в год (тыс.кВт·ч)	309	198	12	30
Ущерб от недоотпуска ЭЭ (тыс.руб.)	18534	11935	701	1826
Приведенные годовые затраты (тыс.руб.)	87131	78428	69005	72341

В таблице 4 приведены результаты, полу-

ченные в процессе проведения расчета параметра оптимизации для ДЭС различного типа.

В рамках проведенного расчета не учитывались такие факторы, как износ ДГ и величина потребления топлива ДГ в момент их запуска и в процессе работе в режиме холостого хода.

На основе полученных данных можно с уверенностью сказать, что наименьшие финансовые затраты на содержание ДЭС наблюдается в случае, когда в ее составе используются шесть ДГ, потребляемая мощность которых составляет 500 кВт.

Вывод

Таким образом, проведенный в ходе данной работы анализ величины энергетических потерь базовых частей ДЭС, а также исследование факторов, которые оказывают влияние на данные потери, позволяет с уверенностью сказать, что наибольшие потери наблюдаются в дизельном генераторе в процессе выработки электрической энергии. К ключевым факторам, влияющим на рост числа потерь, относятся постоянная нерегулярность кривой годичной нагрузки, а также неэффективный выбор методик и разновидностей дизельных генераторов в ДЭС.

В рамках проведения данной работы была разработана методика, которая может применяться для вычисления разновидности необходимого генератора и его типа для ДЭС, в которой учитываются текущие колебания, которые наблюдаются в нагрузке, а также ежегодный процесс снижения энергетического потребления всей ДЭС.

Разработанная в ходе проведения работы методика является весьма универсальной и с успехом может быть применена с целью оптимизации текущих ДЭС, которые работают в определенных условиях.

Список литературы

1. ГОСТ 13109-97 Качество электрической сети.
2. Нормы технологического проектирования дизельных электростанций // Утверждены Минэнерго СССР. Протокол от 19 июля 1990 г. №38.
3. Пученкин А.В., Титов В.Г., Ходыкина И.В. Анализ алгоритмов управления регулятором точки максимальной мощности для солнечных батарей //http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_6_puchenkin.pdf_2020.pdf
4. Tajuddin Waris , C.V.Nayar. Variable Speed Constant Frequency Diesel Power Conversion System Using Doubly Fed Induction Generator (DFIG) https://www.researchgate.net/publication/224323897
5. Jeffrey Boylan. The Future Belongs to Synchronous Rectifiers. Technical Paper. – http://www.power-pulse. net.
6. Справочник по проектированию электрических сетей / под редакцией Д.Л.Файбисовича. – М.:Изд-во НЦ ЭНАС, 2005. – 320 с.
7. Степанов С.Ф., Павленко И.М., Ербаев Е.Т. Обеспечение эффективной работы мультимодульнойветроэлектростанции при изменении скорости ветра и нагрузки// Современные проблемы науки и образования. – 2013.– № 6. URL: http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=11407
8. Надежность электроэнергетических систем. Справочник/ под редакцией М.Н.Розанова. том 2. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 564 с.
9. ГОСТ 23377-84 Электроагрегаты и передвижные электростанции с двигателями внутреннего сгорания. Общие технические требования
10. 7. ООО «Энерго-Статус»//http://energo-status.ru.
11. 8. ООО «Промышленные силовые машины»//http://www.powerunit.ru
12. Лукутин Б.В., Обухов С.Г., Шутов Е.А., Парников Н.М. Оптимизация числа и мощности дизель-генераторов автономной дизельной электростанции // «Промышленная энергетика». – 2009 – №11. – С.27-33

References

1. GOST 13109-97 Quality of the electrical network.
2. Norms of technological design of diesel power plants/ / *Approved by the Ministry of energy of the USSR*. Protocol No. 38 of July 19, 1990.
3. Puchenkin A.V., Titov V. G., Khodykina I. V. *Analysis of algorithms control of the maximum power point controller for solar panels* //http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_6_puchenkin.pdf_2020.pdf
4. Tajuddin Waris , C.V.Nayar. *Variable Speed Constant Frequency Diesel Power Conversion System Using Doubly Fed Induction Generator (DFIG)* https://www.researchgate.net/publication/224323897
5. Jeffrey Boylan. *The Future Belongs to Synchronous Rectifiers*. Technical Paper. – http://www.power-pulse.net.
6. Reference Book on the design of electrical networks / edited by L. Faibisovich. - Moscow: Publishing house of NC ENAS, 2005. - 320 p.
7. Stepanov S. F., Pavlenko I. M., Yerbaev E. T. *Ensuring the effective operation of a multi-module wind power plant when changing wind speeds and loads*// Modern problems of science and education. – 2013.– № 6.
8. URL: http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=11407
9. *Reliability of electric power systems*. Handbook /

edited by M. N. Rozanov. volume 2. - Moscow: *Energoatomizdat*, 2000. - 564 p.

10. GOST 23377-84 electric Units and mobile power plants with internal combustion engines. *General technical requirement.*

11. 8. OOO "Industrial power machines" //http://www.powerunit.ru

12. Lukutin B. V., Obukhov S. G., Shutov E. A., Parnikov N. M. *Optimization of the number and power of diesel generators of Autonomous diesel power power plants* / / "Industrial power engineering". - 2009-No. 11. – Pp. 27-33

УДК 621.311.42

Достоинства и недостатки «Умных сетей» в России

В.В. Смирнов[1] И.А. Муртазаев[2]
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,
ул. Курчатова, 7, г. Севастополь, 299015, Россия, [1]svadick@mail.ru , [2]foreducation99@mail.ru.

Статья поступила 14.05.2020 г.; после доработки 20.05.2020 г._____

Аннотация

В статье рассмотрены перспективы полномасштабного использования инновационных цифровых технологий на территории РФ. Рассмотрены достоинства и недостатки внедрения и полного перехода сети на цифровые технологии. Анализированы пилотные проекты активно-адаптивной сети

Ключевые слова: электротехника, электроэффективность, умные сети, цифровые технологии, активно-адаптивные сети

Advantages and disadvantages of «Smart Grid» in Russia

V. V. Smirnov[1] I. A. Murtazaev[2]
Federal state autonomous establishment of higher education «Sevastopol State University»,
7 Kurchatov street, Sevastopol, 299015, Russia, [1]svadick@mail.ru , [2]foreducation99@mail.ru.

The article was received 14.05.2020 y.; after revision 20.05.2020 y.

Abstract

The article discusses the prospects for full-scale use of innovative digital technologies in the territory of the Russian Federation. The advantages and disadvantages of implementing and fully transitioning the network to digital technologies are considered. Pilot projects of the active-adaptive network are analyzed

Keywords: electrical engineering, electrical efficiency, smart networks, digital technologies, active-adaptive networks

Введение

Обращаясь к истории - термин «Smart Grid» или интеллектуальные сети использовался только в качестве маркетингового хода для компаний, разрабатывающих контроллеры синхронизации ветрогенераторов и счетчиков электроэнергии. Цифровые технологии производства систем управления не стояли на месте, разработки шаблонов обмена данных и их кодировка перешли в стадию использования в практике. Вскоре простой рекламный трюк преобразовался в идеологию. Цифровые технологии более экономичны при проектировании, монтаже, наладке и в эксплуатации. Вследствие обновления международных стандартов и развития современных информационных технологий открывается возможность инновационных подходов к решению задач автоматизации и управления энергообъектами, позволяя создать электроэнергетическую сеть нового типа — «Smart Grid». [2]

Что представляет собой технология «Smart Grid»?

На Западе понятие Smart Grid связывают в основном с интеграцией возобновляемых источников энергии с электроэнергетическими системами и формированием, в теории, самодиагностики и самовосстановления сети.

Кроме того, акцент делается на устройствах учета, соединенных в единую информационную

сеть и позволяющих увеличить возможности «Зеленой энергии» позволяя организовать автоматический контроль расхода энергии при изменении погоды или смене времени суток. Также внедрение системы «Smart home» позволит потребителю участвовать в рынке электроэнергетики. В концепте, через мобильное приложение пользователь сможет следить за расходом электроэнергии через «Smart meter» - это приборы способные автоматически передавать данные о расходе коммунальных ресурсов на сервер для последующей обработки. Для обмена информацией прибор использует беспроводную связь (LPWAN) и интернет. Кроме того, смарт-счетчик предусматривает обратный канал связи. [2] То есть имеется возможность дистанционно управлять им: настраивать его параметры, вносить изменения в тарифы, также планировать возможность продажи электроэнергии. Допустим у вас на территории располагаются какой-либо источник электроэнергии и ваше собственное потребление компенсируется вырабатываемой энергией, то излишек можно продавать компании поставляющей электроэнергию, если , конечно, же это выгодно компании.

Россия, в отличие от Америки, Японии и ряда европейский стран, взяла из полного толкования понятия «умная сеть» только сеть. Это, объясняется тем, что по России уровень изношенности объектов электросети превышает установленные ПУЭ нормативы. По данным Федеральной сетевой компании (ОАО «ФСК ЕЭС»), 25% подстанций 6-10/0,4 кВ находится в неважном состоянии, более 35% воздушных и масляных выключателей должны быть заменены более обновленной версией, в частности, из-за долгосрочной службы. Стоит заметить, что изношенность электросети повышает потери электроэнергии, которые могут быть в диапазоне 20-30%, когда обычным для стран Европы является 6-8%. Около 60% электросетей нуждаются в замене уже в ближайшее время.[3]

Из вышеуказанного можно понять, что для России «Smart Grid» - это беспрецедентное преобразование электросети и электроэнергетики, создание комплекса электроустановок: воздушных линий электропередачи, трансформаторных подстанций, выключателей и т.д., подключенных к источникам электроэнергии и потребителям. При этом должны быть использованы новые принципы электроснабжения, технологии транспортировки электроэнергии и управления процессами. Такая технология называется активно-адаптивной. Активно-адаптивной сети свойственно обладать интересными свойствами - самовосстановлением и самодиагностикой. Например, в случае обледенения проводов – сеть круглосуточно диагностирует саму себя с помощью посыла импульса.

В зависимости от характера, времени и качества вернувшегося пучка энергии «умная сеть» выявит самые «слабые» участки сети и внесет изменения в ее работу для устранения возможности перебоев и даже блекаута сети. [1] «Умные» электрические сети предоставляют возможность накапливать мощности на случай всевозможных эксцессов в энергосистеме, а также накапливать избыток электроэнергии, используя его в часы пиковых нагрузок.

Перспективы «EnergyNet»

В 2017 году на Петербургском международном экономическом форуме президент Владимир Владимирович Путин призвал сформировать принципиально новую, гибкую нормативную базу для внедрения цифровых технологий во все сферы жизни. Указание касается и сферы электроэнергетики. На сегодняшний день команда национальной энергетической инициативы «Energynet» уже имеет дорожную карту и несколько пилотных проектов:

1) Реализация проекта Smart Grid в АО «Янтарьэнерго»;

2) Введение Smart Grid в г. Севастополь Республике Крым (создание полигона цифрового РЭС на территории Сакского района).

Проект Smart Grid в АО «Янтарьэнерго», был в направлении цифровизации одним из первых в России, и его результаты доказывают теоретические расчеты, но с экономической стороны оказался довольно дорогим. В Калининграде стояли нестандартные немецкие сети 0.23 кВ, которые нужно было заменить отечественными 0.4 кВ, также необходим Smart-ретрофит ячеек ЗРУ центров питания (замена несовременных коммутационных устройств на соответствующие нормам сегодняшнего дня вакуумные выключатели), установка реклоузеров и создание SCADA (система уровня района электрических сетей с интеграцией автоматических коммутационных аппаратов). Всё вышеуказанное и программы систем учёта и управления обошлись в ~400 млн. руб.). Вся эта сумма была затрачена только на Мамоновский и Багратионовский округ.

Таким образом можно отметить, что на цифровизацию всей России уйдут гигантские средства, а даже, если это произойдёт, то период окупаемости будет в сотни лет, что в наше время при

существующих технологиях абсолютно нерентабельно.

Идеи «EnergyNet» уже претворены в цифровых распределительных сетях на территории Калининградской области. А поскольку процесс совершенствования технологий идёт постоянно, севастопольский проект обещал стать ещё более «продвинутым». Однако в силу ряда причин, его реализация была сорвана. Россети, планировавшие вложить в проект 2 млрд рублей, от участия в нём отказались, и в декабре 2018 года правительство Севастополя исключило проект из числа приоритетных для Севастополя. Но на этом программа «EnergyNet» не остановилась. В 2019 году соседний регион (Республика Крым) стал новой площадкой для внедрения всех вышеперечисленных технологий в электроснабжение кабельными и воздушными линиями некоторых районов. У организации была задача: не повышая тарифа повысить качество электроснабжения для для местных сел и городов, а также – создать фундамент для будущего развития всей распределительной сети в Республике Крым. Сакский район стал перевалочным пунктом для «цифровизации» полуострова. Стартовым обьектом стала «полуцифровая» подстанция в с. Штормовое.

Проект «Крымэнерго» – это уже развитие с учётом глубокого анализа по результатам «Янтарьэнерго»

Указанная подстанция – лишь начало. Далее модернизируют весь Сакский РЭС. Распространить технологию «Умная сеть» на всю Республику Крым программа региона планирует на 2025 год.

Из вышеизложенного понятно, что отечественные проекты имеются. Это внушает оптимизм и даёт тенденцию к развитию системы «smart grid» в нашей стране, но только на определенных участках сети. Так как умные сети – это сети с добавлением цифровой составляющей, то необходимо заменить ныне изношенное оборудование и линии электропередач, аналоговые счётчики на цифровые, подготовить персонал для работы с новыми приборами. Подобная реорганизация всего электроэнергетического комплекса страны повлечет к гигантским затратам.

Помимо этого, необходимо понимать, что единый электроэнергетический комплекс должен будет управляться централизованно. В случае выхода из строя главного сервера, невозможным становится управление всем комплексом устройств. Это может привести не только к потере оборудования и затратам на его восстановление, но и к глобальной катастрофе. В случае распределенного управления умной сети по районам и регионам, несколько затрудняется их взаимосвязь и объединение их в единый электроэнергетический комплекс. Стоит помнить, что любое цифровое устройство имеет некоторую вероятность быть взломано злоумышленниками. Учитывая, что речь идёт о умных сетях целой страны, то необходимо серьёзно подойти к вопросу об обеспечении безопасности оборудования и предотвращению его взлома.

Из всего вышеизложенного нужно все-таки обозначить что же на самом деле обозначают определения :

1) Активно-адаптивная сеть (Умная сеть) – определение, заключающее в себе соображения отечественных сетевиков всего понятия «Smart Grid». Это замена сети и установка новых выключателей для самодиагностики и самовосстановления сети. Для западных проектировщиков это же только первый этап.
2) Smart Grid – Концепт, носящий громкое название, но и заключающий в себе революционные цели. Кроме самодиагностики и самовосстановления включает в себя такие проекты как «Smart Home» и «Green Energy», то есть цифровизацию всей сети от источников питания до потребителя. Цифровые подстанции, цифровые счетчики, цифровые контроллеры синхронизации источников питания.

Вывод

Подводя итоги, необходимо указать, что пока Россия имеет только пилотные проекты по реализации smart grid. В целом страна пока не готова перейти на данный уровень модернизации сетей электроснабжения и всего электроэнергетического комплекса. Слишком большие затраты на её реализацию, технологические сложности организации процесса управления всем комплексом оборудования, организация кибербезопасности, отсутствие долгосрочной стратегии и рентабельности от внедрения умных сетей ставит под сомнение внедрение умных сетей в масштабах страны. Это отнюдь не означает, что умные сети не обладают никакой перспективой в России. Удачные реализованные проекты подтверждают обратное. И только на основе этого опыта спустя несколько лет использования этих систем и мониторинга их работы можно строить планы по улучшению работы системы, внедрению идей по реализации и оптимизации работы

системы в масштабах страны.

Чтобы проект продвижения технологий «Smart grid» имел удачную реализацию, необходимо выполнить ряд следующих положений:

1) государственные инвестиции и контроль внедрения новых технологий на определенных основаниях;
2) переработка старой нормативно-правовой базы под новые функции сети;
3) объявление конечным потребителям их прав и возможностей;
4) предотвращение возможных спекуляций с возможностями новой сети.

Список литературы

1. *Бурман А.П., Розанов Ю.К., Шакарян Ю.Г.* Управление потоками электроэнергии и повышение эффективности электроэнергетических систем: учебное пособие. – М.: Издательский дом МЭИ, 2012.
2. *Чичев С.И.* Методология проектирования цифровой подстанции в формате новых технологий / С.И. *Чичев, В.Ф. Калинин, Е.И. Глинкин. М.*: Издательский дом «Спектр», 2015. 128-134 с.
3. *Семёнов В.* Технология «Smart grid» и будущее мировой электроэнергетики // Электрик. Международный электротехнический журнал. 2013. № 12. С. 26–56

References

1. *Burman A.P., Rozanov Yu.K., Shakarian Yu.G.* Managing electricity flows and improving the efficiency of electric power systems: a textbook. – Moscow: publishing house of MEI, 2012.
2. *Chichev S.I.* Methodology of designing a digital substation in the format of new technologies / *S.I. Chichev, V.F. Kalinin, E.I. Glinkin.* Moscow: publishing house "Spectrum", 2015. 128-134 p.
3. *Semenov V.* "Smart grid" Technology and the future of the world electric power industry / / electrician. International electrical engineering journal. 2013. no. 12. Pp. 26-56

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК.550.837.3

Пути совершенствования технологии переработки жидких радиоактивных отходов

А.М. Акимов, С.А. Котельникова, В.Э.Филатова
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33, г. Севастополь, 299053, Россия, e-mail*:cvetlana.83@inbox.ru*

Статья поступила 27.04.2020 г.; после доработки 29.04.2020 г.

Аннотация

Проведен анализ образования первичных источников жидких радиоактивных отходов на АЭС с ВВЭР, их солевой и химический состав. Предложены перспективные технологии переработки ЖРО на основе барабанных пленочных испарителей.

Ключевые слова: АЭС, ВВЭР, жидкие радиоактивные отходы, спецводоочистка, кубовый остаток, солевой плав, коэффициент уменьшения объема, барабанный пленочный испаритель, безреагентная технология упаривания, роторный испаритель.

Ways to improve technology for processing liquid radioactive waste

A.M. Akimov, S.A. Kotelnikova, V.E .Filatova
Sevastopol state University, Sevastopol, 299002 Russiae-mail:cvetlana.83@inbox.ru

Received 27.04.2020 y.; received in final form 29.04.2020 y.

Abstract

The analysis of formation of primary sources of liquid radioactive waste at NPPs with WWER, their salt and chemical composition was carried out. Promising technologies of liquid radioactive waste processing based on drum film evaporators are proposed.

Keywords: NPP, VVER, liquid radioactive waste, special water treatment, cube residue, salt melt, volume reduction factor, drum film evaporator, reagent-free vaporization technology, rotary evaporator

Введение

Радиоактивные отходы как негативный техногенный фактор, сопровождающий деятельность объектов атомной энергетики, являются одной из серьезных проблем, как в сфере безопасности АЭС, так и в сфере промышленной экологии в целом. С позиции рентабельности и безопасности сегодня объектом интереса являются технологии полного цикла, дающие на выходе утилизированный продукт, пригодный для захоронения без какой-либо дополнительной обработки.

Жидкие радиоактивные отходы занимают особое место в производимых радиоактивных отходах, поскольку превалируют в производственных отходах и требуют более высокого уровня технологического обеспечения и научно-технической поддержки эксплуатации. ЖРО содержат продукты деления ядерного топлива, их дочерние радионуклиды, и радиоактивные изотопы, появляющиеся в результате активации

конструкционных материалов оборудования ядерно-энергетических установок.

Большинство продуктов деления и активации имеют малье периоды полураспада. При длительном хранении ЖРО основная доля радиоактивности приходится на следующие радионуклиды: цезий- 134, 137, стронций-90, кобальт-60, марганец-54, рутений-106, церий-144 и другие. Из-за большого периода полураспада некоторых нуклидов, содержащихся в этих отходах, необходимо ограничивать ПДК этих нуклидов. Наибольшую озабоченность вызывают стронций-90, железо-55, углерод-14, тритий и плутоний, поскольку они не испускают легко обнаруживаемого гамма-излучения, характерного для других радионуклидов.

Наибольший объем отходов приходится на ЖРО низкого и среднего уровня активности, что требует значительных затрат для обеспечения их безопасного хранения.

Тарифы на захоронение твердых средне- и низкоактивных отходов в европейских странах составляют 5-8 тыс. USD/м3. Поэтому актуальны исследования, направленные на создание технологий по переработки РАО, обеспечивающих минимальные объемы захоронения.

Основной вклад в образования ЖРО вносят неконтролируемые протечки I контура, регенерационные и промывочные растворы систем спецводоочистки , а также сбросы санитарно-бытового блока.

Радиоактивные стоки, собранные системой спецканализации, направляются для переработки на систему спецводоочистки СВО-3 и имеют общее название – трапные воды. Растворы, образующие трапные воды, не подлежат раздельной переработке (в отличие от зарубежных АЭС-аналогов), а перерабатываются по единой схеме с использованием термоконцентрирования.

На сегодняшний день накоплено и продолжают накапливаться огромное количество ЖРО средней и низкой активности (только в РФ более 500 млн кубометров активностью более 10^{20} Бк)[2] . Для переработки ЖРО обычно используют термический, сорбционный и мембранный методы.

Термический метод – наиболее распространенный способ переработки ЖРО. Этот способ осуществляется в системах СВО-3 и СВО-7. Полученный в результате упаривания на этих аппаратах кубовый остаток с солесодержанием от 200 до 400 г/л сливается в монжус и направляется на установки глубокого упаривания УГУ-500, в которых удаляется несвязанная вода, а полученный солевой плав [~ 800 г/л] заливается в металлические бочки. Эта технология имеет много недостатков, что привело к проблемам с обращением этого неконденсированного продукта на АЭС.

Сорбционный метод предусматривает удаление радионуклидов из жидких отходов в виде твердой фазы в результате адсорбции, ионного обмена, адгезии и т.д. Однако из-за селективности к отдельным радионуклидам метод сорбции неприемлем как основной метод очистки от активных примесей.

Мембранные методы – это методы извлечения радиоактивных веществ из растворов на молекулярном уровне. Среди них наиболее эффективными являются ультрафильтрация, обратный осмос и электролиз.

Из-за разнообразия радиоактивных и нерадиоактивных загрязнений, в том числе из-за наличия боратов, аммиака, органических соединений, ни один из перечисленных методов очистки отдельно не обеспечивает очистки ЖРО до необходимой степени, поэтому система очистки ЖРО на АЭС – сложная система операций, на выходе из которой полученный высокоактивный концентрат, поступает на отверждение и захоронение.

Концентраты (солевые плавы), полученные в результате очистки ЖРО отверждают методами битумирования, цементирования, полимеризации и др.

Упаривание (дистилляция) в настоящее время является основным методом переработки ЖРО так как:

- перерабатываются отходы любой засоленности;
- позволяет очищать раствор от радионуклидов, находящихся в любой форме (ионной, молекулярной, коллоидной);
- обеспечивает высокий коэффициент очистки, позволяющий решать проблему очистки жидких отходов до установленных норм.

Для концентрирования ЖРО на АЭС, как правило, используется два типа выпарных аппаратов (на установках СВО-3 и УГУ-500):

- выпарной аппарат с вынесенной греющей камерой (СВО-3) производительность 6 кг^3/м, упаривающий кубовой остаток до солесодержания 250-400 г/л;
- установка глубокого упаривания УГУ-500, доупаривающая кубовый остаток до «солевого сплава», который должен содержать количество несвязанной воды не более 15%

(на практике в «солевом составе» содержится до 30% несвязанной воды).

Общей проблемой для этих выпарных аппаратов является интенсивное солеотложение на греющих поверхностях теплообменных трубок, снижающее эффективность теплопередачи, что приводит к остановке для отмывки теплообменника. Химические добавки (растворы HNO_3 и KOH) для снижения солеотложения и пенообразования в выпарном аппарате СВО-3 приводят к увеличению количества радиоактивных солей в концентрате, что увеличивает объемы конденсирования РАО, подлежащих долговременному хранению и захоронению. Еще большие проблемы с вторичными ЖРО возникают при использовании УГУ-500, так как солесодержания на теплообменных трубках там идет наиболее эффективно. Поэтому установку приходится постоянно останавливать для промывки раствором азотной кислоты, который после использования должен быть нейтрализован, что так же приводит к существенному увеличению объемов радиоактивных солей, подлежащих переработке.

Для минимизации объемов концентрата, направляемого на цементирования, должны использоваться выпарные установки, в которых отсутствует проблема солеотложения на греющих поверхностях при выпаривании растворов и в которых для уменьшения энергозатрат используется рекомпрессия пара (MVR). Этим требованиям может отвечать технология упаривания в барабанных пленочных испарителях.

Постановка цели и задач научного исследования

Предлагаемая технология, направленная на создание оборудования для безреагентного концентрирования и дистилляции растворов, в частности при переработке ЖРО.

Основной целью создания безреагентной технологии упаривания ЖРО является разделение чистых паров растворителя от радиоактивного раствора в режиме пленочного испарения при непрерывной механической очистки греющей поверхности от солевых отложений. Механическая очистка греющей поверхности позволяет избежать необходимости применения химических реагентов, что является фактором для многих процессов выпаривания, в частности, применительно к переработке ЖРО, так как отсутствие химических реагентов для промывки теплообменных поверхностей значительно снижает объемы ЖРО.

Для реализации безреагентной технологии упаривания решаются следующие задачи:

- создание технологии безреагентоного упаривания до требуемой концентрации (например 700-800 г/л);
- исключение химических промывок выпарного оборудования для восстановления теплопередающей способности, греющих поверхностей;
- применение энергосберегающих технологий с механической рекомпрессией вторичного пара (Mechanical Varop Recompression);
- разработка выпарных аппаратов с широким диапазоном степени концентрирования;
- высокая степень очистки пара;
- обеспечение длительного межпромывочного цикла работы;
- автоматизация управления технологическими параметрами;
- малая численность персонала и низки дозовые нагрузки;
- компактность и универсальность выпарного оборудования, и его встраиваемость в технологическую цепочку, например, для получения цементного компаунда.

К особенностям предлагаемой технологии можно так же отнести:

- безреагентность процесса упаривания;
- низкие энергозатраты при переработке ЖРО средней и низкой активности;
- нетребовательность к составу и солесодержанию перерабатываемых ЖРО;
- широкий диапазон солесодержания получаемого концентрата;
- очистка греющей поверхности от отложений в процессе упаривания;
- минимальное количество вторичных ЖРО;
- возможность создания транспортных модулей;
- встраиваемость технологии в комплекс по переводу ЖРО в цементный компаунд;
- существенное снижение стоимости переработки ЖРО.

Технология упаривания в барабанных пленочных испарителях

Предлагаемая технология направлена на решение этой проблемы и создание оборудования для безреагентного концентрирования и дистилляции растворов. В сочетании с применением нагрева теплообменных поверхностей за счет рекомпрессии вторичного пара предлагаемая тех-

нология обеспечивает энергосберегающий режим работы и низкие эксплуатационные расходы. Реализация принципа непрерывной очистки греющих поверхностей в процессе выпаривания позволяет неограниченно увеличивать межпромывочный цикл выпарного оборудования.

Принцип упаривания предлагаемой технологии по физике процесса более всего близок к роторным испарителям (рис 1), однако движение потоков сред идет в непрерывном режиме, без необходимости периодического заполнения выпарного сосуда и полного слива концентрата.



Рис. 1. Роторный испаритель (лабораторный).

Кроме того, имеется механическая система очистки греющей стенки от отложений под уровнем упариваемого раствора, что стало возможным при переходе от формы колбы к форме полого цилиндра (рис.2).

Как и в роторных испарителях, принцип действия БПИ основан на испарении растворителя (например, воды) с поверхности пленки жидкости, растекающейся по внутренней подогреваемой поверхности вращающегося барабана. Непринципиальным отличием можно считать способ нагрева испарительного сосуда. Если в роторных испарителях нагрев колбы осуществляется ее частичным погружением в чашу с подогреваемой водой или маслом (так называемую «баню»), то для БПИ нагрев испарительного барабана на внешней поверхности осуществляется предпочтительно конденсирующимся паром либо инфракрасным излучением.

Еще одним из прототипов БПИ являются барабанные кристаллизаторы, в которых проблема инкрустации поверхностей решается размещением внутри тяжелой цепи, перекатывающейся при вращении барабана. В предлагаемой конструкции вместо цепи предлагается использовать шнековую конструкцию, которая при перекатывании не только очищает стенки, но и перемещает образующиеся кристаллы к точке выгрузки.

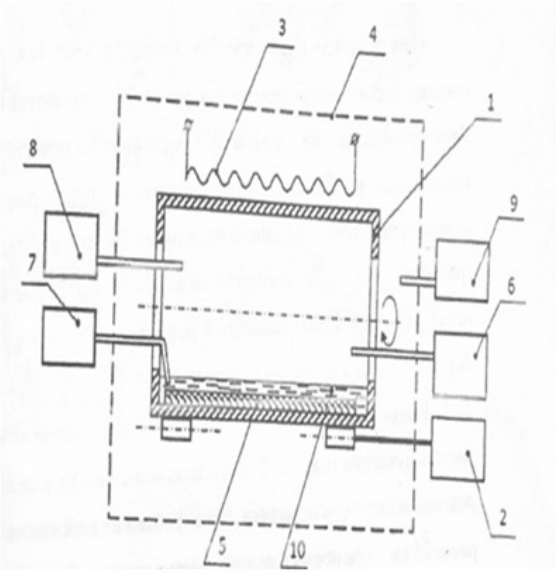


Рис. 2. Модуль предлагаемой выпарной установки БПИ: 1-барабан; 2-привод вращения; 3-нагревательный элемент; 4-корпус (кожух); 5-приспособление для отчистки от отложений; 6-система дозированной подачи раствора; 7-система выгрузки и сбора концентрированного продукта; 8-система сбора, концентрирования паров и отвода конденсата; 9-система создания разряжения; 10-уровень раствора.

Процесс пленочного испарения либо исключает, либо многократно снижает фрагментацию раствора в результате разрыва пленок паровых пузырьков и уноса мелких капель (аэрозолей) вместе с паром в устройство конденсации, что обеспечивает высокую степень очистки конденсата вторичного пара от аэрозолей.

Особенности механизма тонкопленочного испарения позволяют упаривать некоторые растворы до очень высоких концентраций, вплоть

до «солевого плава».

Технология концентрирования жидких радиоактивных отходов

Концентрирование ЖРО на основе барабанной пленочной технологии рассмотрим на примере работы единичного модуля, аппаратное исполнение представлено на рисунке 3.

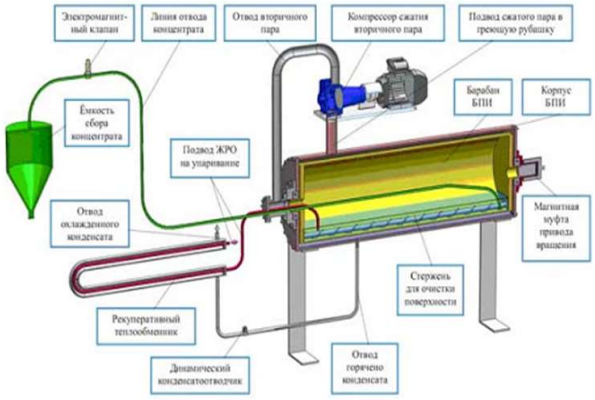


Рис. 3. Аппаратное исполнение выпарной установки БПИ малой производительности.

Модульное построение выпарного аппарата снижает затраты на изготовление, кроме того универсальный модуль имеет ряд других преимуществ:

– легкая масштабируемость производительности выпарной установки;
– простая технология изготовления, сборки и транспортировки модулей;
– быстрая перенастройка выпарных установок на другую производительность.

Выпарной модуль состоит из горизонтального вращающегося барабана, размещенного в герметичном корпусе (рис 3). С одной стороны, к модулю подводятся и отводятся рабочие среды, а с другой стороны расположен герметичный привод вращения (магнитная муфта), что позволяет решить проблемы с герметичностью выпарного модуля и установки в целом.

Нагрев теплообменных поверхностей модуля осуществляется за счет рекомпрессии вторичного пара. В качестве рекомпрессоров целесообразно использовать насосы Рутса, так как они обладают хорошими техноэкономическими показателями (рис.4).

Использование технологии MVR дает возможность использовать вторичный пар, получаемый внутри барабана, в качестве греющего пара для паровой рубашки этого же барабана, что позволяет кратно снизить энергозатраты при повышении производительности.



Рис. 4. Насос Рутса для применения в выпарных аппаратах.

Очистка греющей поверхности от солевых отложений производится механически, под уровнем раствора, например, перекатывающимся спиральным безосевым шнеком.

Рассматриваемый процесс пленочного испарения во вращающемся барабане либо исключает, либо многократно снижает фрагментацию раствора в результате разрыва пленок паровых пузырьков и уноса мелких капель (аэрозолей) вместе с паром в конденсатор, что обеспечивает высокую степень очистки конденсата вторичного пара от включений радиоактивных солей.

Эффективность технологии барабанного пленочного испарения обусловлена высокими коэффициентами теплоотдачи при конденсации (внешняя стенка барабана) и при испарении (внутренняя стенка барабана).

Выводы

Исходя из вышесказанного следует, что одним из направлений совершенствования технологии переработки жидких радиоактивных отходов является технология на базе БПИ, которая имеет существенные преимущества по сравнению с другими выпарными аппаратами:

- технологичный наукоемкий подход удешевляет производство унифицированных выпарных модулей и обеспечивает их высокое качество;
- практически отсутствуют ограничения по производительности выпарной установки, так как количество задействованных унифицированных выпарных модулей не ограничено;
- монтаж выпарных модулей в выпарной установке можно проводить с учетом суще-

ствующей геометрии отведенных площадей.

- универсальность (однотипные модули могут применяться в установках разной производительности);
- при применении рекомпрессии пара рециркуляция тепловой энергии обеспечивает высокую эффективность процесса и отпадает необходимость в греющем паре и в контуре охлаждения;
- барабанный пленочный испаритель с системой самоочистки обеспечивает непрерывный цикл работы без ухудшения параметров теплопередачи;
- высокая степень очистки раствора;
- относительно низкая стоимость аппаратов и их монтажа;
- встраиваемость в непрерывный технологический цикл.

Список литературы

1. Козлов П.В., Разработка технологии иммобилизации жидких солесодержащих САО в цементную матрицу с последующим хранением компаунда в отсеках большого объема. [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.02: защищена 10.12.09: утв. 02.11.09 / Козлов Павел Васильевич. – Санкт-Петербург., 2009. - 163 с. - Библиогр.: с. 152-157. - 004620577.
2. Маслов М. В., Гупало В.С., Чистяков В.Н. Исследование схем обращения с накопленными радиоактивными отходами в целях их подготовки для окончательной изоляции// Горный информационно аналитический бюллетень (научно-технический журнал). - М.: 2012. - №1, - С. 160-164;
3. Муратов О.Э., Тихонов М.Н., Радиоэкологические аспекты обращения с РАО и ОЯТ в условиях инновационного развития ядерной энергетики / http://nuclear-submarine-decommissioning.ru/node/755;
4. Узиков В.А., Кочнов Я.К, Осипова Н.Е., Узикова И.В., Патент РФ № 2488421 «Способ концентрирования жидких растворов»;
5. Узликов В.А. Оптимизация технологии обезвреживания ЖРО/ Атомная стратегия № 153- Санкт-Петербург с 14-19.

References

1. Kozlov P.V., Development of technology for immobilization of liquid salt-containing SAO into cement matrix with subsequent storage of compound in large volume compartments, dissertation, St. Petersburg, 2009.
2. Maslov, M.V.; Gupalo, B.C.; Chistyakov, V.N. Investigation of the schemes of the accumulated radioactive waste management with the purpose of their preparation for the final isolation (in Russian). - M.: 2012. - №1, - P. 160-164;
3. Muratov, O.E.; Tikhonov, M.N.; Radioecological aspects of the RAW and SNF handling under conditions of the nuclear power innovative development / http://nuclear-submarine-decommissioning.ru/node/755;
4. Uzikov V.A., Kochnov Ya.K., Osipova N.E., Uzikova I.V., Russian Federation Patent №2488421 "Liquid Solution Possession";
5. Uzlikov, V.A. Optimization of the LRW decontamination technology/ Atomic strategy № 153- St. Petersburg, P14-19.

УДК 620.9 (621.315)

Исследования диоксида кремния микронного и субмикронного размера из отходов карьерного производства, полученного методом осаждения

Г.А. Баранов[1], Н.М. Дербасова[2], О.П. Гавриш[3], В.М. Гавриш[4], В.А. Турянский[5]
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33 , г. Севастополь, 299053, Россия.
[1]georgij.baranov.49@mail.ru [2]derbasovanm@mail.ru [3]olga_gavrish_53@mail.ru [4]vmgavrish@sevsu.ru [5]morsavinv@bk.ru

Статья поступила 01.04.2020 г.; после доработки 03.04.2020 г.

Аннотация
Проведены исследования диоксида кремния, полученного способом осаждения из отвалов карьерного производства сотрудниками в НОЦ ПТиМ (Научно-образовательный центр «Перспективные технологии и материалы»). По результатам анализа размер частиц синтезированного диоксида кремния составил от 50 нанометров до 40 микронов. Чистота продукта составила 95 - 99%.

Ключевые слова: кремнезем, диоксид кремния, карьерные отвалы.

Investigation of micron and submicron-sized silica from opencast mining waste

G.A. Baranov[1], N.M. Derbasova[2], O.P. Gavrish[3], V.M. Gavrish[4], V.A. Turyansky[5]
"Sevastopol State University", 33 Universitetskaya str., Sevastopol, 299053, Russia.
[1]georgij.baranov.49@mail.ru [2]derbasovanm@mail.ru [3]olga_gavrish_53@mail.ru [4]vmgavrish@sevsu.ru [5]morsavinv@bk.ru

Received 01.04.2020 y.; received in final form 03.04.2020 y.

Abstract
Studies of silicon dioxide obtained by the method of deposition from dumps of quarry production by employees at the Scientific and Educational Center PTiM (Scientific and Educational Center "Advanced Technologies and Materials") were carried out. According to the analysis, the particle size of the synthesized silicon dioxide ranged from 50 nanometers to 40 microns. The purity of the product was 95 - 99%.

Keywords: silica, silicon dioxide, dumps.

Введение

Диоксид кремния – стратегический важный продукт. Спрос мирового рынка на диоксид кремния растет ежедневно и составляет более двух сотен тысяч тонн в год. Исходя из данных федеральной таможенный службы доля импорта диоксида кремния в Россию за 2016-2017 годы составила примерно 50 тысяч тонн, на сумму 75 млн долларов. Основными поставщиками этого продукта в Россию стали Китай (29 %), Германия (23 %) и Франция (12 %) [1]. Монополия на выпуск диоксида кремния принадлежит преимущественно западным фирмам, которые ежегодно наращивают свое производство.

Производство осажденного кремнезема в США составляет около 145,000 тонн SiO2 и цены на него меняются в значительной степени (от $1 до $4,5 за кг) в зависимости от области его применения [2].

На российском рынке наблюдается преобладание импортного диоксида кремния. Одним из крупнейших производителей этого продукта, поставляющий продукт из Франции на российский рынок является фирма «RHONE-POULENC», производящая более 35 000 тонн в год [3].

Диоксид кремния получил широкое распространение в промышленности, так как может использоваться для производства пищевых добавок, сорбентов, резин, зубных паст, смазок [4,5]. Также он используется при формировании как неорганических, полимерных так и элементоорганических соединений вследствие многообразия и особенностях структурных форм и модификаций [6]. Диоксид кремния находит применение в качестве добавки в виде наночастиц в материалы для создания композитов с улучшенными характеристиками [7].

Таким образом, технология создания из распространенного сырья диоксида кремния высокой чистоты с частицами наноразмерного уровня является актуальной задачей [8].

Производство диоксида кремния обладает высокой инвестиционной привлекательностью и хорошими перспективами для дальнейшего роста. Наращивание объемов потребления диоксида кремния создает необходимость российского рынка в отечественном производстве данного продукта.

Материалы и методы исследования

Анализируемый продукт производился способом, предполагающим использование в качестве исходного сырья отходы карьерного производства, который включает три основных этапа:

- Предварительная подготовка сырья (измельчение с последующей термообработкой)
- Химическое выщелачивание сырья с образованием диоксида кремния
- Осаждение и сушка диоксида кремния

В работе исследовались такие характеристики, как состав продукта и размер частиц. Образцы отвалов отбирались согласно ГОСТ 17.4.4.02-2017. С каждого отвала отобрано по одной пробе.

С Псилерахского отобрано две пробы. Элементный состав пробы проводился на аналитическом комплексе на базе вакуумного рентгенофлуоресцентного кристалл-дифракционного сканирующего спектрометра ООО «НПО «СПЕКТРОН» Россия. Результаты анализа представлены в таблице 1.

Как видно из представленной таблицы, в исследуемых отвалах минимальное значение содержания диоксида кремния составило 16%. Максимальное 52%. Помимо диоксида кремния в пробах содержится значительное количество оксида кальция и оксида алюминия. Данные примеси извлекались в результате применения способа, разработанного НОЦ ПТиМ.

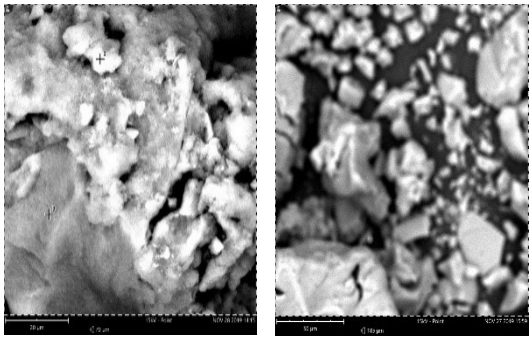
Размер частиц полученного диоксида кремния определялся на сканирующем электронном микроскопе PHENOM proX фирмы: Phenom–World B.V. (Нидерланды) с интегрированной системой энергодисперсионного анализа. Максимальное увеличение 150000, разрешение 10 нм, ускоряющее напряжение 5, 10, 15 кВ.

Элементный анализ исследуемого порошка диоксида кремния получен с применением программы Element Identification компании Phenom, позволяющий использовать электронный микроскоп Phenom ProX для анализа образцов методом энергодисперсионного спектроскопии.

Для анализа размера, формы и морфологии частиц использовали программное обеспечение ParticleMetric, позволяющее анализировать изображения частиц.

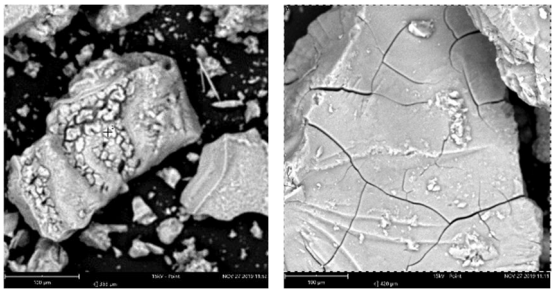
Анализ полученных результатов исследования

Микрофотографии частиц исследуемого порошка диоксида кремния, полученные на сканирующем электронном микроскопе PHENOM proX при разном увеличении, представлены на рис. 1, 2



1) 2)

Рис.1 Фотография порошка диоксида кремния: 1) проба Кудринского месторождения; 2) проба Кадыковского месторождения.



1) 2)

Рис.2 Фотография порошка диоксида кремния: 1) проба 1 Псилерахское месторождение; 2) проба 2 Псилерахское месторождение.

На снимках можно наблюдать наличие конгломератов – крупных частиц, состоящих из совокупности более мелких частиц разных размеров.

Чем мельче частицы сырья, тем более активно будет протекать реакция.

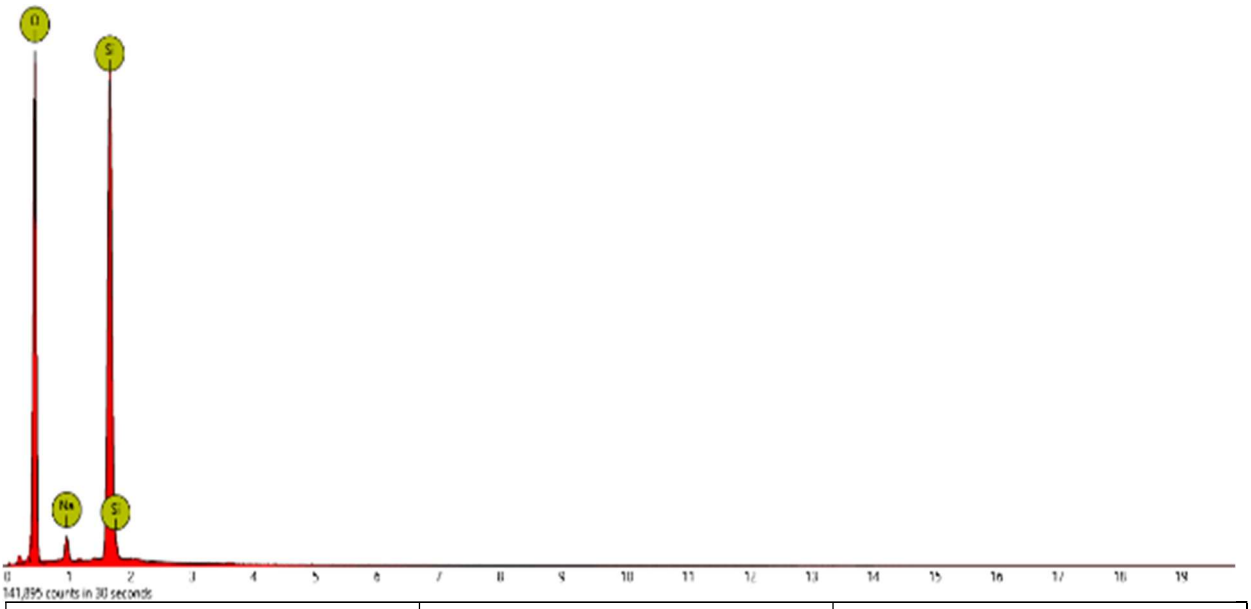
Таблица 1. *Химический состав проб месторождений*

Вещество	Единица измерения	Кудринское месторождение	Кадыковское месторождение	Псилерахское месторождение 1	Псилерахское месторождение 2
MgO	%	3,2040238465	3,770486445275	1,904336300	1,95314287
Al_2O_3	%	19,385250102	7,650932814068	15,65093281	3,7754375
SiO_2	%	16,457142863	22,15714286309	24,21428571	52,2857142
P_2O_5	%	0,0803240532	0,092872643119	0,090531771	0,08075720
K_2O	%	2,5383209991	2,135238613838	4,818208536	2,85216942
CaO	%	13,827870331	2,359459195371	14,50477765	6,97226327
TiO_2	%	0,7786976232	0,785562259598	0,951936183	0,80029355
Fe_2O_3	%	4,4767416775	15,84420882639	6,957875433	3,06917785
Cr	мг/кг	123,47722846	117,1274086039	96,03630033	125,298267
MnO	мг/кг	259,88351757	168,7600016036	409,1688370	1344,81434
V	мг/кг	137,70131774	147,5804188963	129,1555674	140,637492
Co	мг/кг	7,1988598859	11,62870853581	15,82659373	18,8906227
Ni	мг/кг	79,643285209	43,21658137386	37,32467635	73,8575154
Cu	мг/кг	10,768218736	7,045964789947	12,11672305	58,9837797
Zn	мг/кг	113,05490206	62,49659935491	95,14850567	134,052357
As	мг/кг	2,2105253538	4,934988830234	1,918264109	2,34715282
Sr	мг/кг	95,705982069	104,7005968931	96,30053062	231,692714
Pb	мг/кг	16,348962949	28,40186198443	5,451484860	26,6365653

Элементный состав и спектр исследуемых порошков представлен на Рис. 3-6

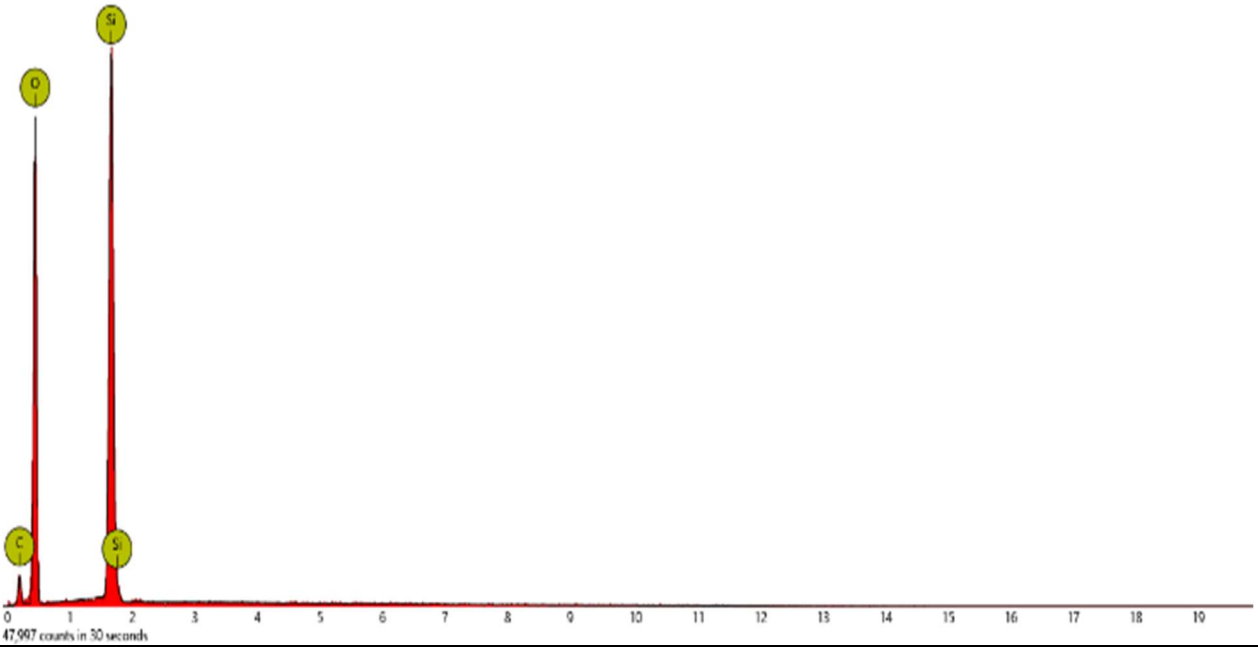
Из приведенных данных видно, что исследуемый порошок представляет диоксид кремния с небольшими примесями катионов натрия и частицами углерода.

Диаграмма распределения частиц по размерам одного из исследуемых диоксида кремния представлены на рисунке 7.



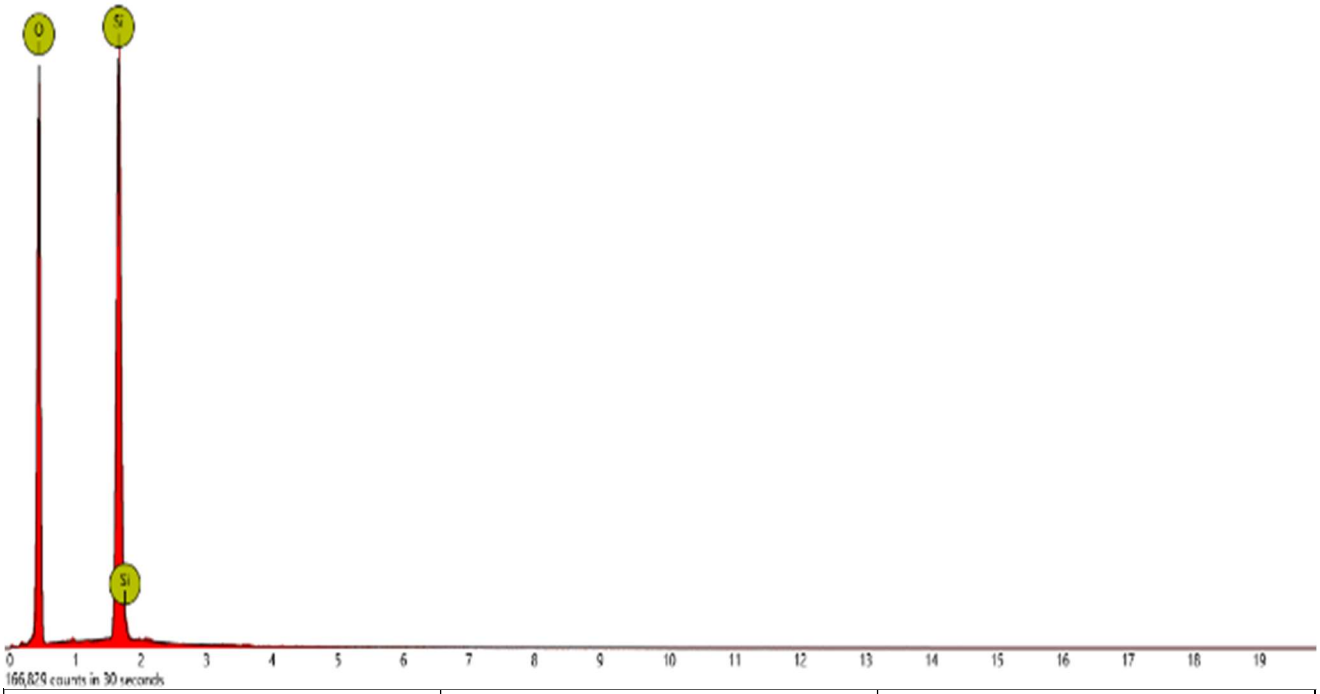
Element Symbol	Atomic Conc.	Weight Conc.
O	78.91	68.63
Si	18.06	27.57
Na	3.04	3.79

Рис.3 Спектры и элементный анализ исследуемого порошка диоксида кремния, полученного из пробы с Кудринского месторождения



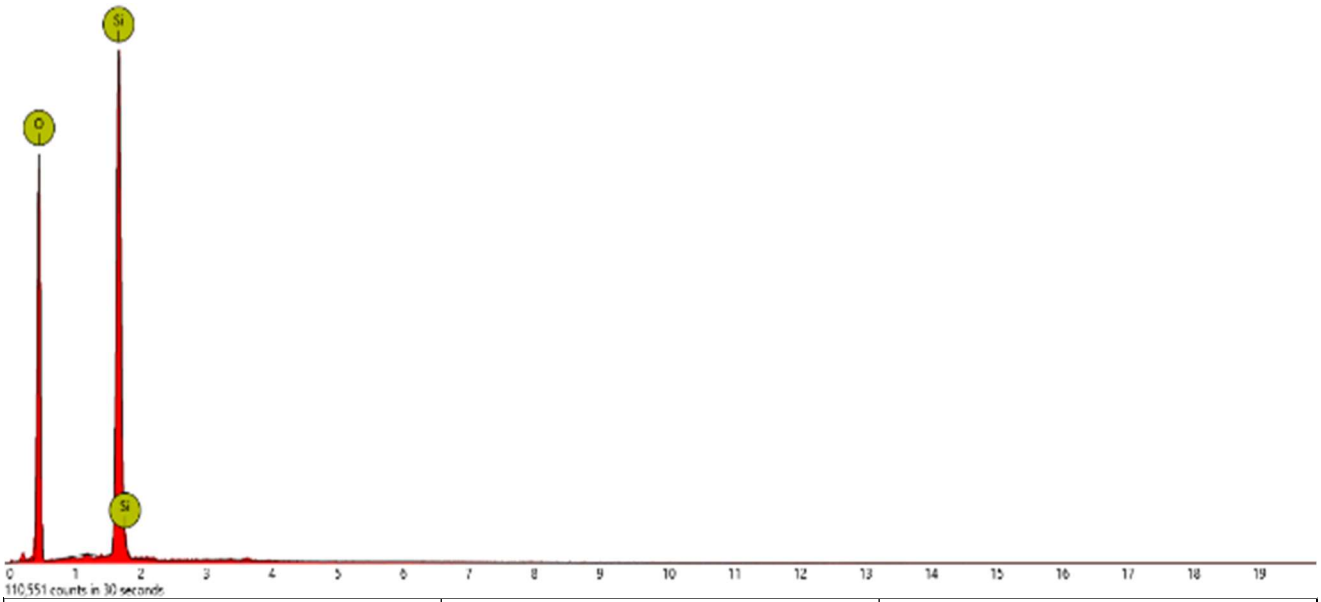
Element Symbol	Atomic Conc.	Weight Conc.
O	78.51	68.55
Si	19.79	30.34
C	1.70	1.11

Рис.4 – Спектры и элементный анализ исследуемого порошка диоксида кремния, полученного из пробы с Кадыковского месторождения



Element Symbol	Atomic Conc.	Weight Conc.
O	80.73	70.47
Si	19.27	29.53

Рис.5 Спектры и элементный анализ исследуемого порошка диоксида кремния, полученного из пробы 1 с Псилерахского месторождения



Element Symbol	Atomic Conc.	Weight Conc.
O	78.36	67.35
Si	21.64	32.65

Рис.6 Спектры и элементный анализ исследуемого порошка диоксида кремния, полученного из пробы 2 с Псилерахского месторождения

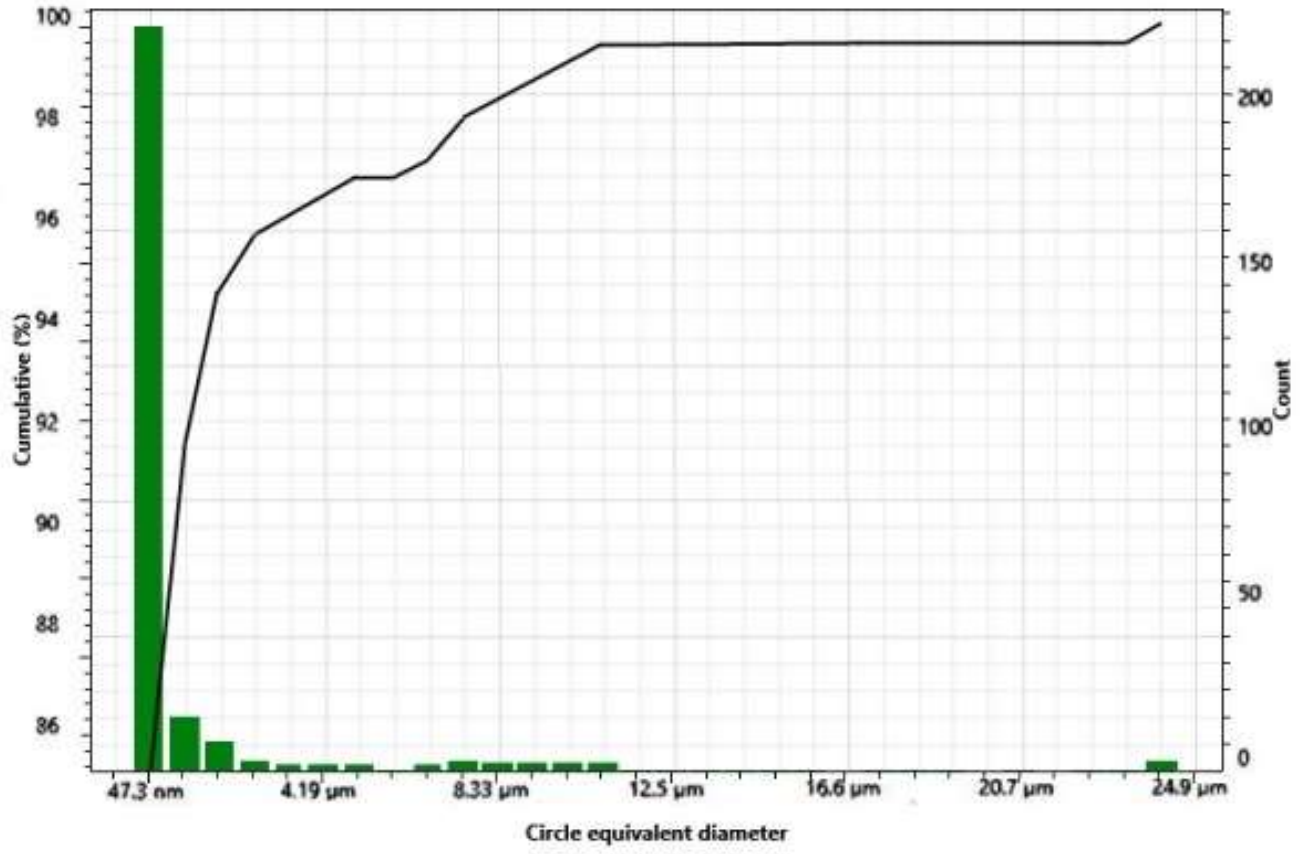


Рис. 7 Распределение частиц порошка диоксида кремния по размерам

Диаграмма распределения частиц по размерам указывает на наличие преимущественно частиц, размером менее 1 микрометра. При этом наличие частиц размером больше 1 микрометра можно объяснить наличием прочно связанной совокупностью большого числа малых частиц – агломератов.

Таким образом, используя разработанный в НОЦ ПТиМ способ получения диоксида кремния, мы получили продукт, который характеризуется малыми размерами, высокой чистотой и низкой себестоимостью. Полученный диоксид кремния соответствует техническим требованиям ГОСТ 9428-73.

Выводы

В рамках проведенного исследования, на основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1) Установлено, что используя предложенный метод возможно получение частиц порошка диоксида кремния, размеры которого менее 1 нанометра.
2) Получаемый порошок, в результате использования способа разработанного в НОЦ ПТиМ, более чем 99% состоит из диоксида кремния.
3) Продукт, полученный из отвалов карьерного производства соответствует техническим требованиям ГОСТ 9428-73.

Список использованных источников

1. Ронжин, Н. А. Производство диоксида кремния // Apriori. Серия: Естественные и технические науки. – 2018. – №2. – с. 13
2. Бочевская, Е. Г. Технология комплексной переработки высококремнистой и труднообогатимой минеральной руды с получением концентрата РЗМ и высокодисперсного диоксида кремния / Каршигина З. Б., Саргелова Э. А., Абишева З. С. // Вестник науки и образования. – 2017. – № 12. – с. 13-18.
3. Сугоняко, Д. В. Диоксид кремния как армирующий наполнитель полимерных материалов / Л. А. Зенитова // Вестник технологического университета. – 2015. – №5. – с. 94-100.
4. Селяев, В.П. Оптимизация технологических режимов синтеза аморфного диоксида кремния из диатомитового сырья / Куприяшкина Л.И., Селяев П.В., Киселев Н.Н., Кечуткина Е.Л. // Вестник приволжского территориального отделения

российской академии архитектуры и строительных наук. – 2019. – с. 204-209
5. Кокшаров, С.А. Метод равномерного распределения нанодисперсного диоксида кремния в полимерном связующем композитного материала / Корнилова Н.Л. // Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (smartex). – 2019. – № 1. – с. 119-124
6. Мофа, Н.Н. Комплексное использование механохимической и ультразвуковой обработки для получения высокодисперсного диоксида кремния специального назначения / Жапекова А.О., Садыков Б.С., Баккара А.Е., Сахан М.Г., Бекентаева А.Д., Мансуров З.А. // Сорбционные и хроматографические процессы. – 2019. – №2. – с. 123-132
7. Алексеева, О.В. Влияние концентрации диоксида кремния на термодинамические свойства композитов на основе полистирола / Алексеева О.В., Носков А.В., Гусейнов С.С., Агафанов А.В. // Физикохимия поверхности и защита материалов. – 2015. – №2. – с. 198
8. Covindarao Venneti M.H. Utilization of rice hack a preliminary analysis. // Journal of Scientific and Industrial Research. 1980. V. 39. № 9. P. 495 – 515

References

1. Ronzhin, N.A. Production of silicon dioxide // Apriori. Series: Natural and technical sciences. - 2018. – No. 2. – p. 13.
2. Bochevskaya, E.G. Technology for the complex processing of high-siliceous and difficult-to-concentrate mineral ore to produce REM concentrate and highly dispersed silicon dioxide / Karshigina Z. B., Sargelova E. A., Abisheva Z. S. // Bulletin of Science and Education. - 2017. - No. 12. - p. 13-18.
3. Sugonyako, D.V. Silicon dioxide as a reinforcing filler of polymeric materials / L.A. Zenitova // Bulletin of the Technological University. - 2015. - No. 5. - p. 94-100.
4. Selyaev, V.P. Optimization of technological modes of synthesis of amorphous silicon dioxide from diatomaceous raw materials / Kupriyashkina LI, Selyaev PV, Kiselev NN, Kechutkina EL // Bulletin of the Volga territorial branch of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences. - 2019 .-- p. 204-209.
5. Koksharov, S.A. The method of uniform distribution of nanosized silicon dioxide in a polymer binder of a composite material / Kornilova N.L. // Physics of fibrous materials: structure, properties, high technology and materials (smartex). - 2019.- No. 1. - p. 119-124.
6. Mofa, N.N. The complex use of mechanochemical and ultrasonic processing to obtain highly dispersed silicon dioxide for special purposes / Zhapekova AO, Sadykov BS, Bakkara A.E., Sakhan MG, Bekentaeva A.D., Mansurov Z.A . // Sorption and chromatographic processes. - 2019. - No. 2. - p. 123-132.
7. Alekseeva, O.V. Effect of silicon dioxide concentration on the thermodynamic properties of polystyrene-based composites / Alekseeva O.V., Noskov A.V., Guseinov S.S., Agafanov A.V. // Physicochemistry of the surface and protection of materials. - 2015. - No. 2. - p. 198.
8. Covindarao Venneti M.H. Utilization of rice hack a preliminary analysis. // Journal of Scientific and Industrial Research. 1980. V. 39. № 9. P. 495 – 515

УДК 627.24:606:51-7

Влияние нанопорошка диоксида кремния на электропроводность модельных сред, содержащих катионы Na^{+}, Mg^{2+},Fe^{3+}

С.А.Федорова

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33, г. Севастополь, 299053, Россия. [1]s.a.fedorova@sevsu.ru,

Статья поступила 06.05.2020 г.; после доработки 08.05.2020 г.

Аннотация

Исследование посвящено анализу влияние различных концентраций нанопорошка диоксида кремния на изменение электропроводности модельных сред, содержащих сульфаты натрия, магния железа (Ш). Проведен расчет электрической проводимость смеси растворов электролитов. Представлены результаты экспериментальное исследование изменения электропроводности модельных сред в присутствии различных концентраций нанопорошка диоксида кремния в модельных средах, содержащих сульфаты натрия, магния и железа (Ш).

Ключевые слова: нанопорошок диоксида кремния, электропроводность модельных сред, сульфат натрия, сульфат магния, сульфат железа(Ш)

The effect of silicon dioxide nanopowder on the electrical conductivity of model media containing cations Na^{+}, Mg^{2+}, Fe^{3+}

S.A. Fedorova

Sevastopol State University, 33 Universitetskaya st,, Sevastopol, 299053, Russia
[1]s.a.fedorova@sevsu.ru,

Received 06.05.2020 y.; received in final form 08.05.2020 y.

Abstract

The study is devoted to the analysis of the effect of various concentrations of silicon dioxide nanopowder on the change in the electrical conductivity of model media containing sodium sulfates, magnesium iron (III). The calculation of the electrical conductivity of a mixture of electrolyte solutions was carried out. The results of an experimental study of changes in the electrical conductivity of model media in the presence of various concentrations of silicon dioxide nanopowder in model media containing sodium, magnesium, and iron sulfates are presented..

Keywords: silicon dioxide nanopowder, electrical conductivity of model media, sodium sulfate, magnesium sulfate, iron sulfate (Ш).

Введение

Решение задач, обозначенных в Положении о Федеральной службе по экологическому, технологическому и атомному надзору, утвержденному постановлением Правительства Российской Федерации «Основные правила учета и контроля снижения активности радиоактивных растворов» (НП-067-11) [1], определяет актуальность исследований, направленных на снижение активности технологических сред [2-4] . В процессе эксплуатации атомных станций образуются жидкие радиоактивные отходы (ЖРО) различных уровней активности как по значению активности, так и по радионуклидному составу. Основными источниками ЖРО могут быть: контурные воды, организованные протечки, конденсат турбины, регенерационные воды ионообменных фильтров, пульпы отработанного фильтра и пульпы ионообменных смол, кубовые остатки

после переработки трапных вод, неорганизованные протечки технической воды, лабораторные сточные воды, обмывочные воды, воды спецпрачечной, растворы дезактивации и т.п. [5, 6]. Часть этих вод может быть возвращена в производственный цикл.

Для дезактивации растворов низкой и средней активности можно использовать нанопорошок диоксида кремния [7-12]. При этом условно «чистые» воды после использования нанопорошка диоксида кремния могут быть повторно использованы в технологической цепочке производственного цикла.

Возможность повторного использования определяется соответствием полученной среды, нормируемым и диагностическим показателям. Одним из характеристик качества технологической среды является показатель электропроводности.

Объектом исследования являются модельные растворы с различными добавками нанопорошка диоксида кремния.

Цель исследования

Определение влияние нанопорошка диоксида кремния в средах, содержащих сульфаты натрия, магния и трехвалентного железа на изменение электропроводности раствора.

Задачи исследования

1. Теоретический расчет электрической проводимости смеси растворов электролитов.
2. Экспериментальное исследование изменения электропроводности модельных сред в присутствии различных концентраций нанопорошка диоксида кремния.

Методика измерения электропроводимости модельного раствора в присутствии катионов Na^+, Mg^{2+},Fe^{3+}с нанопорошком диоксида кремния

Измерение электропроводимости раствора основано на нахождение величины его сопротивления электрическому току методом компенсации, то есть сравнение неизвестного сопротивления с известным сопротивлением (рисунок 1).

С помощью переключателей моста постоянного тока выравнивают синусоиду в прямую линию, и снимают показание моста постоянного тока.

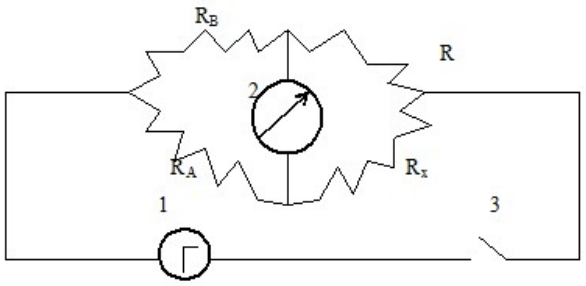


Рис. 1. Схема установки для определения электропроводности: 1 – звуковой генератор; 2 – осциллограф; 3 – клеммы; Rx – сопротивление испытуемого раствора в измерительном сосуде, Ом; R,R_A,R_B – известные сопротивления на мосте постоянного тока.

При компенсации моста (ток равен нулю, J=0) соблюдается условие:

$$\frac{R_x}{R} = \frac{R_A}{R_B}\ , \qquad (1)$$

отсюда определяемое сопротивление равно:

$$R_x = \frac{R \cdot R_A}{R_B}, \qquad (2)$$

где R_A и R_B – известное значение сопротивления моста постоянного тока, соответственно плеч А и В, Ом;

R – сопротивление моста постоянного тока, снятое при выравнивании напряжения, Ом.

Расчет электрической проводимость смеси растворов электролитов

Рассчитаем электрическую проводимость смеси растворов по формуле:

$$1000X = \sum(л_i C_{экс\,i}) \qquad (3)$$

где λ_i – эквивалентная электрическая проводимость;

$C_{экс\,i}$ – концентрация иона.

Рассчитанные эквивалентные электрические проводимости ионов для растворов приведены в таблице 1.

Таблица 1. *Рассчитанные эквивалентные электрические проводимости ионов для модельных растворов*

№ п/п	Раствор	λ_i , См см^2 /г-экв
1	KCl	149,9
2	Na_2SO_4	180,2
3	$MgSO_4$	133,0
4	$Fe_2(SO_4)_3$	346,4

Зная эквивалентную электрическую проводимость ионов и нормальную концентрацию растворов, рассчитаем электропроводность X. Результаты расчетов приведены в таблице 2.

Таблица 2. *Расчет теоретической электроводности исследуемых растворов*

№ п/п	KCl, C%	Na2SO4, C%	MgSO4, C%	Fe2(SO4)3, C%,	X, См/см
1	24	2	5	10	4,5
2	24	7	5	10	5,2
3	24	2	10	10	5,1
4	24	7	10	10	5,8
5	24	2	10	15	7,8
6	24	7	10	15	8,4
7	24	2	5	15	7,1
8	24	7	5	15	7,8

Как следует из приведенных расчетов, наибольший вклад в изменение электропроводности приходится на сульфат железа (Ш).

Мы проанализировали, насколько изменится значение электропроводности каждого катиона при постоянстве прочих параметров в минимальных и максимальных точках эксперимента. Так, величина электропроводности изменилась на 0,7 См/см, при увеличении концентрации ионов натрия на 5% при одинаковых концентрации ионов магния (5%) и ионов железа (Ш) (10%). При постоянных значениях концентраций ионов железа (Ш) (10%), как и в предыдущих измерениях, но увеличении концентрации ионов магния на 5%, электропроводность при той же вариации ионов натрия, изменяется также на 0,7 См/см. При увеличении концентрации ионов железа (Ш) и уменьшении концентрации ионов магния варьирование концентрации ионов натрия дает то же число. Но процент изменения, иными словами, вклад влияния того или иного катиона на значение общей электропроводимости изменяется. На рисунке 2 приведены зависимости влияния различных ионов на исследуемую характеристику. Следует отметить, что с увеличением содержания ионов трехвалентного железа, влияние на электропроводность раствора катионов натрия снижается почти в два раза (8,97 при содержании ионов магния 5%, и 7, 14% при содержании ионов магния 10%). Такие же числа получаются при оценке влияния концентраций катионов магния (5% и 10%) на электропроводность раствора. Изменение электропроводности раствора в большей степени определяется варьированием катионов трехвалентного железа (от 17,24% до 22,22).

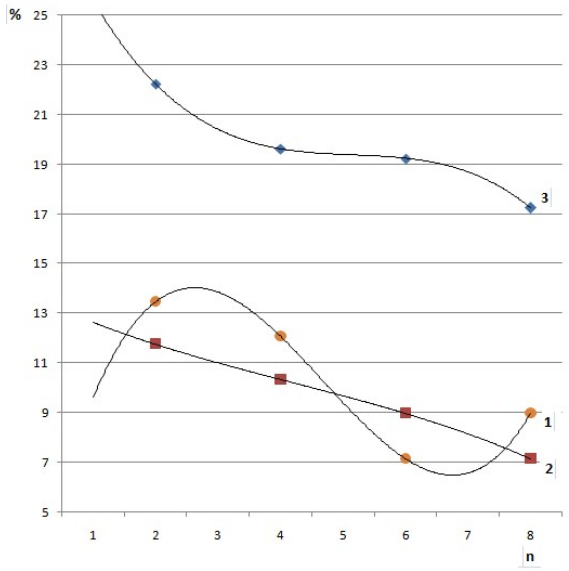


Рис. 2. - Теоретический расчет влияния ионов натрия, магния и железа (Ш) на электропроводность: 1 - влияние ионов натрия, 2 - влияние ионов магния, 3 - влияние ионов железа (Ш).

Аппроксимационные зависимости для рассмотренных кривых, представлены ниже. Для всех зависимостей $R^2 = 1$.

Для катионов трехвалентного железа:

$$y = -0{,}080x^3 + 1{,}242x^2 - 6{,}514x + 30{,}92, \quad (4)$$

для катионов магния:

$$y = -0{,}010x^3 + 0{,}133x^2 - 1{,}214x + 13{,}74, \quad (5)$$

для катионов натрия:

$$y = 0{,}214x^3 - 3{,}014x^2 + 11{,}38x + 1{,}029. \quad (5)$$

Как видим, аппроксимация зависимостей описывается полиномом третьей степени для всех рассматриваемых катионов. Отмечается схожесть в поведении кривых, и соответствующих им математических зависимостей, для описания влияния на изменение электропроводности растворов, обусловленных катионами трехвалентного железа и двухвалентного магния.

Экспериментальное исследование изменения электропроводности модельных сред в присутствии различных концентраций нанопорошка диоксида кремния

Для того, чтобы определить как изменится электропроводность растворов при добавлении нанопорошка диоксида кремния, мы провели исследование этого параметра на модельных растворах, в которых одновременно варьировались

концентрации сульфатов натрия, магния и трехвалентного железа. Были проведены серии измерений модельных растворов с различной концентрацией нанопорошка диоксида кремния: от 1% до 5%. Измерения проводились с диапазоном времени 1,3,7,21 день.

На рисунке 3 представлены результаты исследований изменения электропроводности модельных растворов с варьированием концентраций сульфата натрия от 2% до7%, сульфата магния от5% до 10%, сульфата железа трехвалентного от 10%до 15% и содержанием нанопорошка оксида кремния 1%.

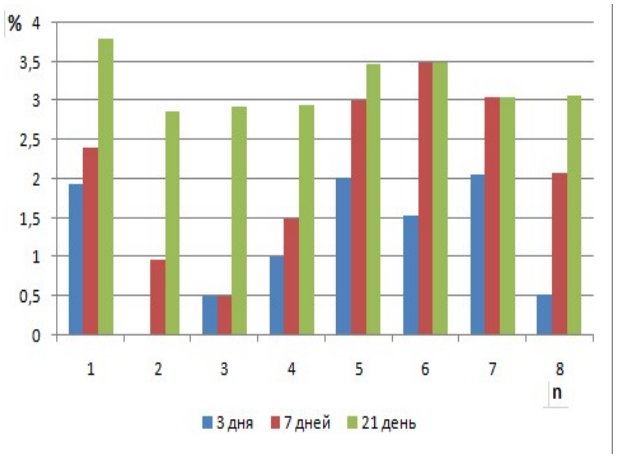


Рис. 3. Изменение электропроводности модельных растворов в присутствии 1% нанопорошка диоксида кремния через 3, 7, 21 день

Наибольшее изменение электропроводности наблюдается на 21 день проведения измерений. Максимальное изменение мы видим в пробе, соответствующей максимальным концентрациями солей натрия, магния и трехвалентного железа (3,8%). Минимальное изменение в пробе, содержащей минимальное количество сульфата трехвалентного железа (2,9%).

На рисунке 4 представлены результаты исследований изменения электропроводности модельных растворов с варьированием концентраций сульфата натрия от 2% до7%, сульфата магния от5% до 10%, сульфата железа трехвалентного от 10%до 15% и содержанием нанопорошка оксида кремния 3%.

Максимальные изменения электропроводности наблюдаются на 21 день в пробах, содержащих минимальное содержание сульфата натрия (2.9% - 3,4%).

Минимальные значения колеблются в интервале 2,3% - 2,8%. Разброс между минимальным и максимальным изменением электропроводности незначителен.

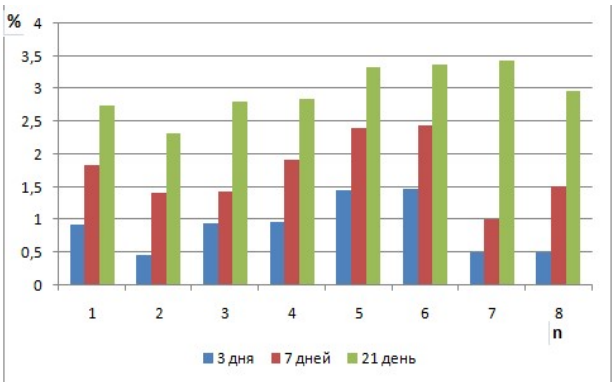


Рис. 4. Изменение электропроводности модельных растворов в присутствии 3% нанопорошка диоксида кремния через 3, 7, 21 день

На рисунке 5 представлены результаты исследований изменения электропроводности модельных растворов с варьированием концентраций сульфата натрия от 2% до7%, сульфата магния от5% до 10%, сульфата железа трехвалентного от 10%до 15% и содержанием нанопорошка оксида кремния 5%.

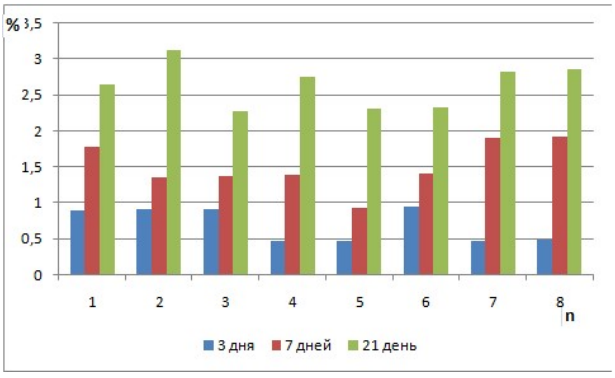


Рис. 5. Изменение электропроводности модельных растворов в присутствии 5% нанопорошка диоксида кремния через 3, 7, 21 день

Разброс между максимальным и минимальным изменением электропроводности в присутствии 5% нанопорошка диоксида кремния составляет 2,3% - 3,1%. Наблюдается снижение интервала изменения электропроводности модельных растворов при увеличении содержания нанопорошка диоксида кремния.

Поэтому для дальнейшего исследования мы выбрали концентрации нанопорошка диоксида кремния 5%. Модельные растворы были приготовлены на базе раствора хлорида калия с добавлением: 1- нанопорошка диоксида кремния, 2- нанопорошка диоксида кремния и сульфата натрия, 3 - нанопорошка диоксида кремния и сульфата магния, 4 - нанопорошка диоксида кремния и сульфата железа трехвалентного, 5

нанопорошка диоксида кремния и сульфатов натрия и магния, 6 нанопорошка диоксида кремния и сульфатов натрия и железа трехвалентного, 7 - нанопорошка диоксида кремния и сульфатов магния и железа трехвалентного, 8 - нанопорошка диоксида кремния и сульфатов натрия, магния и трехвалентного железа. Результаты изменений электропроводности этих сред представлены на рисунке 6.

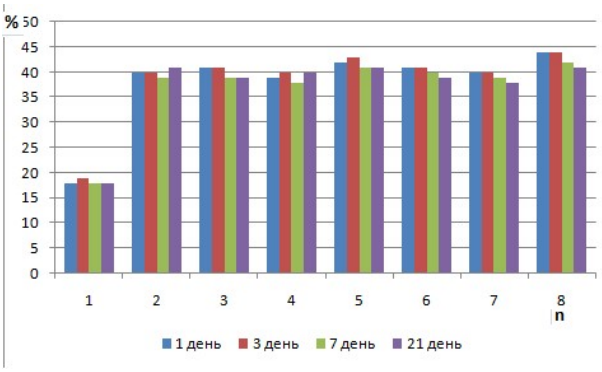


Рис. 5. Изменение электропроводности модельных растворов (1-8) в присутствии 5% нанопорошка диоксида кремния через 3, 7, 21 день

Как видим, изменение электропроводности в присутствии различных комбинаций солей сульфатов натрия, магния и трехвалентного железа не происходит. Изменение электропроводности в присутствии только нанопорошка диоксида на протяжении 21 не происходит.

Выводы

Итак, в ходе проведенного исследования:

1. Аппроксимировали теоретический расчет влияния ионов натрия, магния и железа (Ш) на электропроводность модельного раствора. Зависимости описывают полиномами третьей степени (R=1). Наибольшее влияние оказывает наличие ионов трехвалентного железа.
2. Изменение электропроводности модельных растворов с варьированием концентраций сульфата натрия от 2% до7%, сульфата магния от5% до 10%, сульфата железа трехвалентного от 10%до 15% и содержанием нанопорошка оксида кремния 1%, 3%, 5% наблюдается в пределах 2,27-3,79%. Это сопоставимо со стандартной погрешностью.
3. Исследование на протяжении 21 дня изменения электропроводности растворов комбинаций различных катионов (пробы 1-8) показало, что существенных изменений за счет использования нанопорошка диоксида кремния не происходит.

Таким образом, испоьзование нанопродшка диоксид кремния для дезактивации технологических сред (САО и НАО) не влечет изменение показателя электропроводности.

Список литературы

1. Положение о Федеральной службе по экологическому, технологическому и атомному надзору, утвержденному постановлением Правительства Российской Федерации «Основные правила учета и контроля снижения активности радиоактивных растворов» (НП-067-11) https://clck.ru/N6oaQ (Дата обращения 22.04.2020г.)
2. Тимошин И.А. Способ химической дезактивации радиоактивных материалов. Патент RU 2 457 560 C1. https://clck.ru/N6pNj(Дата обращения 22.04.2020г.)
3. Савкин А.Е., Карелина О.К., Малинкин В.М., Дубинин Г.В., Лебедев Н.М., Смирнов Б.А. Испытания ультазвуковой установки для дезактивации металлических РАО // Безопасность окружающей среды. 2007. № 3, С. 38-41. https://clck.ru/N6pWy (Дата обращения 22.04.2020г.)
4. Качан П.П., Краснов И.М., Стахив М.Р. Опыт эксплуатации комплекса переработки радиоактивных отходов на Смоленской АЭС /Радиоактивные отходы. 2018. №1 (2). С.34-40. https://clck.ru/N6pfU (Дата обращения 22.04.2020г.)
5. Федорова С.А., Стрюк А.Е. Использование нанопорошка оксида кремния для снижения активности технологических сред. //Науч.-тех. конф. «Актуальные вопросы ядерно-химических технологий и экологической безопасности» (г. Севастополь 15-18 июня 2016г.) – Севастополь - 2016.- С.66-70.
6. Акимов А.М., Федорова С.А., Котельникова С.А. Оборудование и материалы ядерных энергетических установок. Севастополь: СевГУ, 2017. - 250с.
7. Федорова С.А., Магдыч Е.А., Кухта Ю.А. Исследование изменения β-активности модельных растворов при использовании нанопорошка диоксида кремния в присутствии катионов Na^{+}, Mg^{2+} и Fe^{3+}.//Энергетические установки и технологии. 2017. Т. 3.№3. С. 79-83.
8. Федорова С.А., Магдыч Е.А., Вовк Е.П. Использование нанопорошка диоксида кремния при дезактивации модельных растворов. //Экология и развитие общества МАНЭБ №2(17), 2016 - С.45-48.
9. Федорова С.А., Табацкая А.А. Анализ влияния на снижение β-активности модельных растворов нанопорошка диоксида кремния в присутствии анионов NO_2^{-}, SO_4^{2-}// Инновационные подходы в

современной науке: сб. ст. по м-лам XVII Междунар. науч.-практ. конф. «Инновационные подходы в современной науке». – № 5(17). – М., Изд. «Интернаука», 2018.- С.68-72.
10. Федорова С.А., Табацкая А.А. Математическое описание изменения β -активности модельных растворов при использовании нанопорошка диоксида кремния в присутствии нитрит-ионов и сульфат-ионов //Энергетические установки и технологии. 2018. Т. 4. № 2. С. 70-76.
11. Федорова С.А. Влияние нанопорошка SiO_2 на снижение β-активности модельных сред в присутствии Ca^{2+}, Na^{+}, Cu^{2+}, NH_4^{+} // Естественные и технические науки. 2019. №4 (130). С.209-211.
12. Федорова С.А., Пенькова Е.А., Решетник Л.В., Григорян К.А. Перспективы использования нанопорошка диоксида кремния при обращении с РАО // Сб. статей междунар. науч.-практ. конф. «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2019», 23 – 26 сентября 2019 г.. Севастополь. 2019. С.1676-1678.

References

1. Polozhenie o Federal'noj sluzhbe po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru, utverzhdennomu postanovleniem Pravitel'stva Ros-sijskoj Federacii «Osnovnye pravila ucheta i kon-trolya snizheniya aktivnosti radioaktivnyh rastvo-rov» (NP-067-11) https://clck.ru/N6oaQ (Data obrashcheniya 22.04.2020g.)
2. Timoshin I.A. Sposob himicheskoj dezaktiva-cii radioaktivnyh materialov. Patent RU 2 457 560 C1. https://clck.ru/N6pNj(Data obrashcheniya 22.04.2020g.)
3. Savkin A.E., Karelina O.K., Malinkin V.M., Dubinin G.V., Lebedev N.M., Smirnov B.A. Ispytaniya ul'tazvukovoj ustanovki dlya dezaktivacii metallicheskih RAO // Bezopasnost' okruzhayushchej sre-dy. 2007. № 3, S. 38-41. https://clck.ru/N6pWy (Data obrashcheniya 22.04.2020g.)
4. Kachan P.P., Krasnov I.M., Stahiv M.R. Opyt ekspluatacii kompleksa pererabotki radioaktiv-nyh othodov na Smolenskoj AES /Radioaktivnye othody. 2018. №1 (2). S.34-40. https://clck.ru/N6pfU (Data obrashcheniya 22.04.2020g.)
5. Fedorova S.A., Stryuk A.E. Ispol'zovanie na-noporoshka oksida kremniya dlya snizheniya aktivno-sti tekhnologicheskih sred. //Nauch.-tekh. konf. «Aktual'nye voprosy yaderno-himicheskih tekhnologij i ekologicheskoj bezopasnosti» (g. Sevastopol' 15-18 iyunya 2016g.) – Sevastopol' - 2016.- S.66-70.
6. Akimov A.M., Fedorova S.A., Kotel'nikova S.A. Oborudovanie i materialy yadernyh energeticheskih ustanovok. Sevastopol': SevGU, 2017. - 250s.
7. Fedorova S.A., Magdych E.A., Kuhta YU.A. Issledovanie izmeneniya β-aktivnosti model'nyh rastvorov pri ispol'zovanii nanoporoshka dioksida kremniya v prisutstvii kationov Na^{+}, Mg^{2+} i Fe^{3+}.//Energeticheskie ustanovki i tekhnologii. 2017. Т. 3. №3. S. 79-83.
8. Fedorova S.A., Magdych E.A., Vovk E.P. Ispol'zovanie nanoporoshka dioksida kremniya pri dezaktivacii model'nyh rastvorov. //Ekologiya i razvitie obshchestva MANEB №2(17), 2016 - S.45-48.
9. Fedorova S.A., Tabackaya A.A. Analiz vliyaniya na snizhenie β-aktivnosti model'nyh rastvorov nanoporoshka dioksida kremniya v prisutstvii anio-nov NO_2^{-}, SO_4^{2-}// Innovacionnye podhody v sovre-mennoj nauke: sb. st. po m-lam XVII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. «Innovacionnye podhody v sovremennoj nauke». – № 5(17). – M., Izd. «Internauka», 2018.- S.68-72.
10. Fedorova S.A., Tabackaya A.A. Matematicheskoe opisanie izmeneniya β -aktivnosti model'nyh rastvorov pri ispol'zovanii nanoporoshka dioksida kremniya v prisutstvii nitrit-ionov i sul'fat-ionov //Energeticheskie ustanovki i tekhnologii. 2018. T. 4. № 2. S. 70-76.
11. Fedorova S.A. Vliyanie nanoporoshka SiO2 na snizhenie β-aktivnosti model'nyh sred v prisutstvii Ca^{2+}, Na^{+}, Cu^{2+}, NH_4^{+} // Estestvennye i tekhnicheskie nauki. 2019. №4 (130). S.209-211.
12. Fedorova S.A., Pen'kova E.A., Reshetnik L.V., Grigoryan K.A. Perspektivy ispol'zovaniya nanoporoshka dioksida kremniya pri obrashchenii s RAO // Sb. statej mezhdunar. nauch.-prakt. konf. «Ekologicheskaya, promyshlennaya i energeticheskaya bezopas-nost' – 2019», 23 – 26 sentyabrya 2019 g.. Sevastopol'. 2019. S.1676-1678.

УДК 631.029

Расчетно-экспериментальное исследование радиационно-защитных свойств тугоплавких композитных материалов

Н.И. Черкашина[1], В.А. Разина [2], Д.В. Тарасевич [3]
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33, г. Севастополь, 299053, Россия. [1]selyanskij-as@ya.ru

Статья поступила 18.05.2020 г.; после доработки 22.05.2020 г.

Аннотация

Исследовано влияния различных концентраций нанопорошков тугоплавких металлов на радиационно-защитные свойства композита. Выбран наиболее оптимальный модификатор композитного материала, улучшающий радиационно-защитные свойства – TiC, TiO_2 (кратность ослабления 29*). Представлен физико-химический анализ некоторых порошков в составе радиационно-защитных материалов.*

Ключевые слова: нанопорошок, композиционные материалы, кратность ослабления, оксиды титана, карбиды титана и вольфрама, экономический расчет.

Computational-experimental study of radiation-protective properties of refractory composite materials

N.I. Cherkashina, V.A. Rasina, D.V. Tarasevich
Sevastopol State University, 33 Universitetskayast,, Sevastopol, 299053, Russia
[1]selyanskij-as@ya.ru,

Received 18.05.2020 y.; received in final form 22.05.2020 y.

Abstract

The effect of various concentrations of nanopowders of refractory metals on the radiation-protective properties of the composite is studied. The most optimal modifier of the composite material, improving the radiation-protective properties – TiC, TiO_2 annealed, (the multiplicity of attenuation 29). The physicochemical analysis of some powders in the composition of radiation-protective materials is presented.

Keywords: nanopowder, composite materials, attenuation ratio, titanium oxides, titanium and tungsten carbides, economic calculation.

Введение

На предприятиях атомной отрасли, а также сотрудников медицинских учреждении, чья работа связана с рентгенографией, работающих в зоне действия источников излучения или радиоактивного загрязнения, должны использовать защитную одежду, изготовленную из специальных материалов, в основе может находиться резина, пластик или каучук со специальным наполнителем из соединений поглотителя [1–3].

В данной работе исследованы материалы, в основу которых входит: поливинилацетатный клей ГОСТ 30535-97, оксиды тугоплавких металлов [4–5].

Порошки, используемые в качестве модификатора, исследовали на сканирующем электронном микроскопе PHENOM proX фирмы: Phenom-World с интегрированной системой энергодисперсионного анализа. Максимальное увеличение 150 000, разрешение 10 нм, ускоряющее напряжение 5, 10, 15 кВ.

Элементный анализ исследуемых порошков получены с применением программы

ElementIdentification компании Phenom, позволяющий использовать электронный микроскоп PhenomProX для анализа образцов методом энергодисперсионного спектроскопии.

Для анализа размера, форма и морфология частиц использовали программное обеспечение ParticleMetric, позволяющая анализировать изображения частиц. На рисунках 1–3 приведены фото нанопорошоков оксида титана TiO_2, карбида титана и вольфрама в среде аргона.

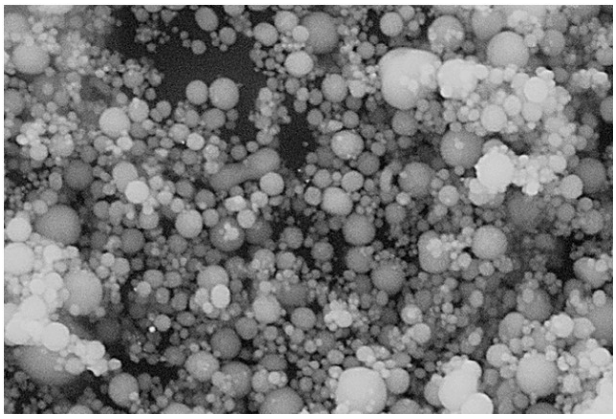


Рис.1. Фото оксида титана

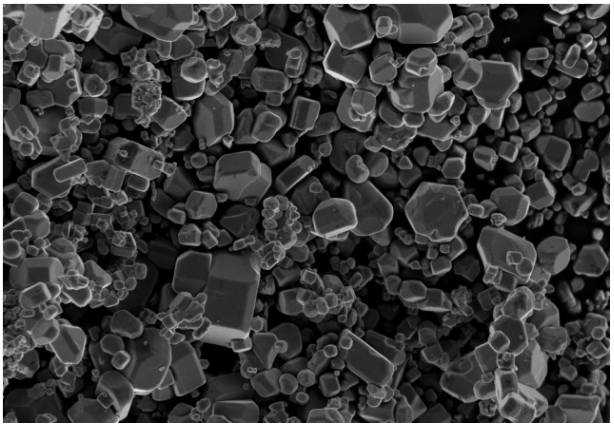


Рис.2. Фото нанопорошока карбида вольфрама в среде аргона

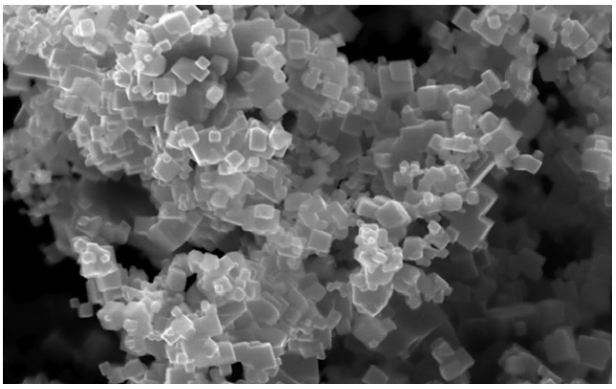


Рис.3. Фото нанопорошока карбида титана

Физико-химический анализ порошков представлен в таблице 1.

Таблица 1.*Физико-химические свойства некоторых порошков легкоплавких металлов*

Товарный знак	Средний диаметр/нм	Удельная площадь, $м^2/г$	Общие примеси	Примеси
TiO_2	100–190	8–15	<0,2	Cl_2 <0,2 %;
TiC	40–90	12–30	<0.3	O_2~1,5 %; Cl_2~0,5 %
WC	300–500	1–1,5	<0.05	C (своб) = 0,055 % O_2~0,025 %

Примечание: примеси включают в себя B, Al, Si, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Mo, W, P, C, S и другие элементы.

Постановка цели и задач научного исследовании

Цель работы – выбор и разработка композитного материала на основе нанопорошков с оптимальными радиационно-защитными свойствами и стоимостью.

Для достижения поставленной цели исследования в работе решаются следующие задачи:
– исследование влияния различных концентраций нанопорошков тугоплавких металлов на радиационно-защитные свойства;
– экономическая целесообразность использования композитных нано материалов.
– определены физические характеристики радиационно-защитных тугоплавких композита.

Методика эксперимента

Измерения проводились на дозиметр-радиометре КРВП–3Б регистрирующий скорость счета (имп/с) и МКС–05М (доза). Суть эксперимента заключалась в регистрации мощности дозы в геометрии «без защиты» на расстоянии (от 1 до 10 см) от источника гама- и бета- излучения и регистрациимощности дозы «за защитой» на расстоянии 10 см от источника.

Кратность ослабления оценивалась как отношение мощности экспозиционной дозы на поверхности защиты (испытуемого образца) к мощности экспозиционной дозы после защиты [6].

Результаты исследования радиационно-защитных свойств композитных материалов модифицированных порошками тугоплавких металлов представлены в таблице 2.

***Таблица 2**. Зависимость коэффициента ослабления от % концентрации добавки модифицированных порошков тугоплавких металлов*

Металл	Содержание (%)	n (имп/с)	Кратность ослабления
WC	10	4,87	8,44
	15	4,46	10,02
	20	3,89	11,02
	25	3,11	16,94
	30	2,52	27,57
TiC,TiO_2	10	4,27	9,91
	15	3,82	10,8
	20	3,59	12,74
	25	3,02	15,31
	30	2,55	22,68
TiC,TiO_2 (отож)	10	4,06	10,64
	15	3,68	12,57
	20	3,11	15,96
	25	2,55	19,64
	30	2,2	28,08

Таким образом, в результате исследования влияния наномодификаторов на радиационно-защитные свойства образцов, можно сделать следующие выводы: нанопрошок карбида вольфрама 30 % содержанием показали наилучшую радиационно-защитную способность по сравнению с другими тугоплавкими образцами.

Расчет стоимости изготовления на примере образца TiC

Приведен экономический расчет стоимости изготовления образцов, который состоит из затрат на материалы и работы по изготовлению самого изделия.

Расчет стоимости изделия проводиться следующим образом:

$$C_{изд\%}=C_{св}+C_{п}+C_{рас}+C_{раб} \quad (1.1)$$

где $C_{изд\%}$ – стоимость изделия, руб/100г;

$C_{св}$ – стоимость связующего материала, руб/кг;

$C_{п}$ – стоимость порошка, руб/кг;

$C_{рас}$ – стоимость растворителя, руб/л;

$C_{раб}$ – стоимость работы затраченной на изготовление подложки, руб.

Расчет стоимости связующего материала (формула 1.2):

$$C_{св}=m_{св}\cdot Ц_{св} \quad (1.2)$$

где $m_{св}$ – масса связующего вещества, кг;
$Ц_{св}$ – цена связующего вещества, кг.

Расчет стоимости порошка (формула 1.3):

$$C_{п}=m_{п}\cdot Ц_{п} \quad (1.3)$$

где $m_{п}$ – масса порошка, кг;
$Ц_{п}$ – цена порошка, руб/кг.

Расчет стоимости растворителя (формула 1.4):

$$C_{раств}=\rho_{раст}\cdot Ц_{раст}\cdot V_{раст} \quad (1.4)$$

где $\rho_{раст}$ – плотность растворителя, г/мл;
$C_{раст}$ – цена растворителя за 1л, руб;
$V_{раст}$ – объём растворителя, мл.

Расчет стоимости работы затраченной на изготовление подложки (формула 1.5):

$$C_{раб}=n_{час}\cdot Ц_{раб} \quad (1.5)$$

где $n_{час}$ – количество времени затраченного на изготовление образца, час;

$Ц_{раб}$ – стоимость работы, руб/час.

Так как объём растворителя и время работы во всех случаях одинаковы (формула 1.6).

$$\sum_{рас+раб} = C_{рас}+C_{раб} \quad (1.6)$$

где $\Sigma_{рас+раб}$ – суммарная стоимость растворителя и работы.

Отсюда: $C_{изд\%}=Ц_{св}\cdot m_{св}+Ц_{п}\cdot m_{п}+\sum_{рас+раб}$

$$C_{изд10\%}=0,09\cdot 650+0,01\cdot 2960+26,96=$$
$$=115,06\ {}^{руб}/_{100г}$$

$$C_{изд15\%}=0,085\cdot 650+0,015\cdot 2960+26,96=$$
$$=126,61\ {}^{руб}/_{100г}$$

$$C_{изд20\%}=0,08\cdot 650+0,02\cdot 2960+26,96=$$
$$=138,16\ {}^{руб}/_{100г}$$

$$C_{изд25\%}=0,075\cdot 650+0,025\cdot 2960+26,96=$$
$$=149,71\ {}^{руб}/_{100г}$$

$$C_{изд30\%}=0,07\cdot 650+0,03\cdot 2960+26,96=$$
$$=161,26\ {}^{руб}/_{100г}$$

$$\sum_{C_{изд}}^{Cu} =115,06+126,61+138,16+149,71+161,26=$$
$$=690,8 \text{ руб}$$

Расчет стоимости 1 м^2 (TiC) в зависимости от процентного содержания композитного материала:

$$C10\%_{м^2}=\frac{2516,54\cdot 115,06}{100}=2895,53\ {}^{руб}/_{м^2}$$

$$C15\%_{м^2}=\frac{2516,54\cdot 126,61}{100}=3186,19\ {}^{руб}/_{м^2}$$

$$C20\%_{м^2}=\frac{2516,54\cdot 138,16}{100}=3476,85\ {}^{руб}/_{м^2}$$

$$C25\%_{м^2}=\frac{2516,54\cdot 149,71}{100}=3767,51\ {}^{руб}/_{м^2}$$

$$C30\%_{м^2}=\frac{2516,54\cdot 161,26}{100}=4058,17\ {}^{руб}/_{м^2}$$

Результаты исследования радиационно-защитных свойств композитных материалов модифицированных порошками тугоплавких металлов представлены в таблице 3.

Таблица 3.*Зависимость коэффициента ослабления от % концентрации добавки модифицированных порошков тугоплавких металлов с привязкой к стоимости*

Металл	Содержание,%	n, имп/с	Кратность ослабление	Стоимость, м^2/руб.
WC	10	6,09	8,44	2954,41
	15	5,51	10,02	3284,08
	20	4,91	11,02	3618,78
	25	3,42	16,94	3924,79
	30	2,62	27,57	4245,15
TiC, TiO_2	10	4,63	9,91	2815
	15	4,2	10,8	3065,4
	20	3,87	12,74	3315,79
	25	3,22	15,31	3566,18
	30	3,11	22,68	3816,58
TiC,TiO_2 (отож)	10	4,48	10,64	2899,05
	15	3,87	12,57	3190,79
	20	3,31	15,96	3483,89
	25	3,01	19,64	3675,65
	30	2,61	29,86	4068,74

Необходимые допущения при измерениях:

– источник расположен на оси детектора при измерении;

– ионизирующее излучение не поглощает слоем воздуха и не отражается от радиационно-защитного материала.

Материал диска будет влиять на коэффициент поглощения ионизирующего излучения слоем отделяющей среды, который вносит вклад в коэффициент регистрации для определения абсолютной активности источника.

Зависимости кратности ослабления от стоимости материала представлены на рисунках 4–5.

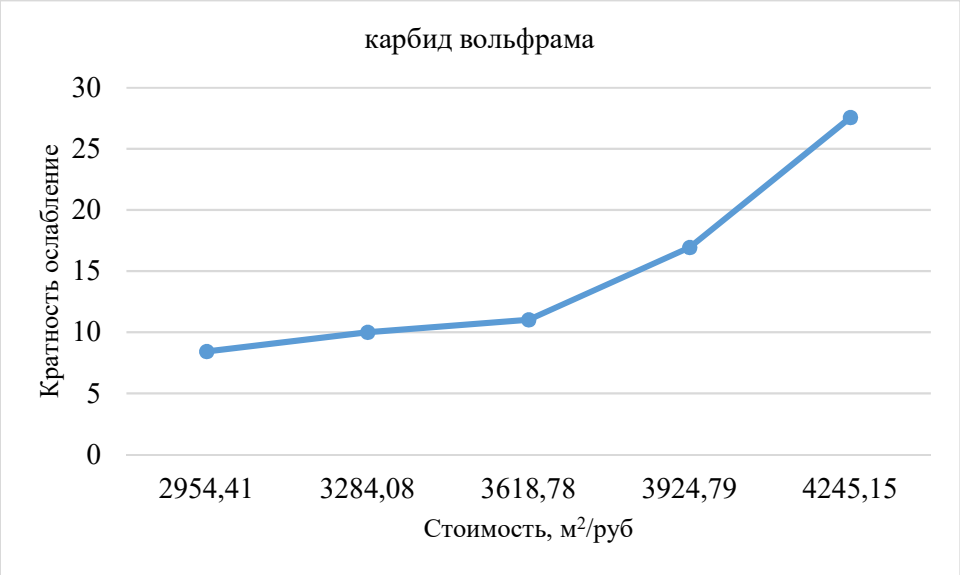


Рис.4. Зависимость кратности ослабления от стоимости композита (WC)

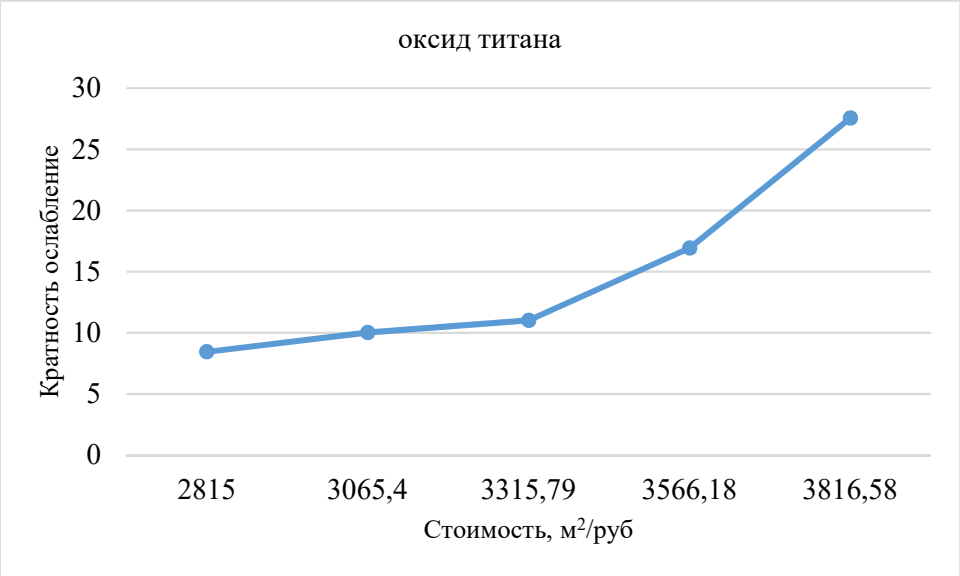


Рис.5.Зависимость кратности ослабления от стоимости композита (TiO_2)

Кратность ослабления была получена путем расчета соотношения мощности дозы от препарата без слоя защитного материала к измеренной мощности дозы с защитным материалом.

Выводы

Таким образом, в результате исследования влияния наномодификаторов на радиационно-защитные свойства образцов, можно сделать следующие выводы:

– изучение кратности ослабления от стоимости композита показало, что кратность ослабления композита на основе карбида вольфрама 15 % равен композиту из оксида и карбида титана 10 % отожжённого, по стоимости разница составила 15 %, следовательно дешевле использовать материалы с добавлением TiC, TiO_2 (отож);

– нанопрошок карбида вольфрама показал наименьшую радиационно-защитную способность;

– дальнейшее увеличение концентрации наномодификаторов до 25 – 30 % во всех образцах приводит к незначительному росту стоимости материала на 15 % при увеличении кратности ослабления более чем 2 раза;

– для более детального изучения влияния наномодификаторов необходимо провести ряд

исследований направленных на различные свойства композитных образцов.

Список литературы

1. Русских И.М., Селезнев Е.Н., Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е. Экспериментально-теоретическое исследование органометаллических радиационно-защитных материалов, адаптированных к источникам излучения со сложным изотопным составом // Ядерная физика и инжиниринг, 2014, том 5, №5, с.449-455.
2. Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е., Лукьяненко В.Ю., Михайлова А.Ф., Русских И.М., Селезнев Е.Н., Козлов А.В. Оптимизация состава радиационной защиты // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика 2015. № 4. С. 36-42.
3. Савченкова Г.А., Артамонова Т.А., Савченков В.П., Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е., Русских И.М., Селезнев Е.Н. Перспективы использования материалов серии Абрис для радиационной защиты персонала АЭС. Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики. Сборник докладов восьмой международной научно-технической конференции 23–25 мая 2012 г. М., ОАО «Концерн Росэнергоатом», 2012.
4. P.V. Matyukhin, V.I. Pavlenko, R.N. Yastre-binskii, N.I. Cherkashina. The high-energy radiation effect on the modified iron-containing composite material // Middle-East Journal of Scientific Research. 2013, v. 17(9), p. 1343-1349.
5. Н.И. Власенко, М.Н. Коротенко, С.Л. Литвиненко, В.В. Стовбун. Нейтронозащитные свойства гидридов титана и циркония с повышенным содержанием водорода // Ядерна та радіаційна-безпека. 2009, т.12, №4, с. 33-35.
6. Cherkashina N, Vladimir G., Tatyana C. Experiment – calculated investigation of composite materials for protection against radiation // Materials Today: Proceedings 11. –2019. – p. 554–560.

References

1. Russkikh I. M., Seleznev E. N., Tashlykov O. L., Shcheklein S. E. Experimental and theoretical study of organo-metallic radiation-protective materials adapted to radiation sources with complex isotopic composition / / Nuclear physics and engineering, 2014, vol. 5, No. 5, pp. 449-455.
2. Tashlykov O. L., Shcheklein S. E., Lukyanenko V. Yu., Mikhailova A. F., Russkikh I. M., Seleznev E. N., Kozlov A.V. Optimization of radiation protection composition. Izvestiya-vysheuchebnykhzavedenii. Russian. Nuclear power 2015. No. 4. p. 36-42.
3. Savchenkova G. A., Artamonova T. A., Savchenkov V. P., Tashlykov O. L., Shcheklein S. E., Russkikh I. M., Seleznev E. N. Prospects of using materials of the Abris series for radiation protection of NPP personnel. Safety, efficiency and Economics of nuclear energy. Collection of reports of the eighth international scientific and technical conference may 23-25, 2012 Moscow, "Concern Rosenergoatom", 2012.
4. P.V. Matyukhin, V.I. Pavlenko, R.N. Yastre-binskii, N.I. Cherkashina. The high-energy radiation effect on the modified iron-containing composite material // Middle-East Journal of Scientific Research. 2013, v. 17(9), p. 1343-1349.
5. N. I. Vlasenko, M. N. Korotenko, S. L. Litvi-Nenko, V. V. Stovbun. Neutron-protective properties of titanium and zirconium hydrides with increased hydrogen content / / Nuclear radiation bezpek. 2009, vol. 12, No. 4, pp. 33-35.
6. Cherkashina N, Vladimir G., Tatyana C. Experiment – calculated investigation of composite materials for protection against radiation // Materials Today: Proceedings 11. –2019. – p. 554–560.

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

УДК 712.413

Инвентаризация зелёных насаждений парка Института ядерной энергии и промышленности

Е.В. Заблоцкая
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия, evere82@mail.ru

Статья поступила 14.05.2020 г.; после доработки 15.05.2020 г.

Аннотация

В статье представлены результаты оценки состояния деревьев в различных типах садово-парковых насаждений, расположенных в парке Института ядерной энергии и промышленности. Установлен видовой состав и количество деревьев, находящихся в хорошем, удовлетворительном и неудовлетворительном состоянии. Также на территории парка были выявлены растения, занесённые в Красную книгу и оценено их состояние.Проведённый анализ распределения видов и количества деревьев по категориям состояния позволяет предложить мероприятия по реконструкции насаждений.

Ключевые слова: инвентаризация зелёных насаждений, древостой, категории состояния насаждений, рабочий дневник, реконструкция насаждений.

Inventory of green spaces in the Park of the Institute of nuclear energy and industry

E.V. Zablotskaya
Sevastopol state university, 33 Universitetskayast., Sevastopol, 299053, Russia, evere82@mail.ru

Received 14.05.2020 y.; received in final form 15.05.2020 y.

Abstract

The article presents the results of assessing the condition of trees in various types of garden and Park facilities located in the Park of the Institute of nuclear energy and industry. The species composition and the number of trees in good, satisfactory and unsatisfactory condition have been established. Also, plants listed in the Red book were identified in the Park and their condition was assessed. The analysis of the distribution of species and number of trees by status categories allows us to suggest measures for the reconstruction of plantings.

Keywords: inventory of green spaces, tree stand, categories of plant condition, working diary, reconstruction of plantings.

Введение

Озеленённые территории, бесспорно, участвуют в формировании облика любого города. Что касается Севастополя, то в последние годы прослеживается чёткая тенденция сокращения площадей и количества зелёных насаждений, что в первую очередь связано со сносом засохших и аварийных деревьев.

Основной причиной сноса аварийных деревьев является их возраст, который для многих быстрорастущих деревьев достиг или достигает предельного, в связи с основными посадками более 50 лет назад.

Снос зелёных насаждений, что связано со строительством, происходит в связи с уплотнением застройки в городе и выделением земельных участков под застройку на территории зелёных насаждений. В отдалённых районах и на придомовых территориях централизованно восстановительные посадки не проводятся. Учёт площади зелёных насаждений, предоставленных под застройку и другие цели, не связанные с озеленением – отсутствует.

В городе не ведётся учёт зелёных насаждений и отсутствует их реестр по видовому составу и возрасту.

Таким образом, не представляется возможным получение достоверных данных:

– о количественных и качественных характеристиках зелёных насаждений Севастополя;
– о соответствии деятельности владельцев озеленённых территорий установленному функциональному назначению территории;
– нет информационной базы для организации рационального использования озеленённых территорий;
– не несётся ответственность за сохранность насаждений предприятиями, организациями и учреждениями.

Департаментом городского хозяйства города Севастополя запланированы работы по инвентаризации городских зелёных насаждений, в том числе объектов растительного мира, занесённых в Красную книгу города Севастополя и Красную книгу Российской Федерации.

По результатам выполненных работ будет составлен реестр по видовому составу и возрасту и получены достоверные данные:

- о количественных и качественных характеристиках зелёных насаждений Севастополя;
- о соответствии деятельности владельцев озеленённых территорий установленному функциональному назначению территории [1].

Поэтому работы по инвентаризации зелёных насаждений являются на сегодняшний день весьма актуальными.

Постановка задачи

Целью проведённого исследования являлась оценка состояния деревьев в различных типах садово-парковых насаждений, расположенных в парке Института ядерной энергии и промышленности.

Для реализации данной цели были поставлены следующие задачи:

– выработать наиболее оптимальный подход к оценке состояния насаждений парка Института ядерной энергии и промышленности;
– оценить морфологическое и санитарное состояние древесной растительности парка Института ядерной энергии и промышленности;
– предложить практические мероприятия по реконструкции насаждений парка Института ядерной энергии и промышленности.

Описание исследования

Данные для оценки состояния насаждений были собраны в мае 2018 года в парке ИЯЭиП города Севастополя в пределах первого и второго секторов. Сбор материала выполнен в соответствии с методикой инвентаризации городских зеленых насаждений [2].

Учётные экземпляры деревьев были пронумерованы и нанесены на план инвентаризации в виде условных знаков (рис. 1). Деревья, относящиеся к видам, занесённым в Красную книгу, были выделены на плане красным цветом. Под соответствующим номером растение записывалось в рабочий дневник учёта зелёных насаждений.

Качественное состояние деревьев оценивалось по внешним признакам в соответствии с Методическими рекомендациями по оценке жизнеспособности деревьев и правилами их отбора и назначения к вырубке и пересадке [3]. В рабочем дневнике учёта зелёных насаждений растения распределялись по следующим категориям – без признаков ослабления, ослабленные, сильно ослабленные, усыхающие, сухостой текущего года и сухостой прошлых лет.

Всего нами было учтено и обследовано 558 деревьев: в рамках первого сектора 267 деревьев и в рамках второго 291 дерево.

Видовой состав очень разнообразный, было выявлено 28 видов деревьев (рис. 2). Из них 1/3 представлена двумя видами – ясенем обыкновенным (21 %) и робинией лжеакацией (17%).

Средний возраст деревьев в пределах обследованных нами участков составил 40 лет (рис. 3), а средний диаметр ствола на высоте 1,3 м. – 30 см. Средняя высота деревьев составила 9,9 м.

Распределение учётных экземпляров по типам посадки следующее: рядовая – 371 дерево, групповая – 135 деревьев и одиночная – 52 дерева.

На момент обследования из 558 деревьев только 109, а это всего 20% от общего количе-

ства, не имели признаков ослабления, то есть находились в хорошем состоянии.

265 деревьев, а это 48% находились в удовлетворительном состоянии (ослабленные и сильно ослабленные). Таким деревьям необходимо проведение санитарной обрезки кроны.

128 деревьев – это 23% находились в неудовлетворительном состоянии (усыхающие и сухостой). В соответствии с Методическими рекомендации по оценке жизнеспособности деревьев и правилами их отбора и назначения к вырубке и пересадке данная группа деревьев подлежит вырубке.

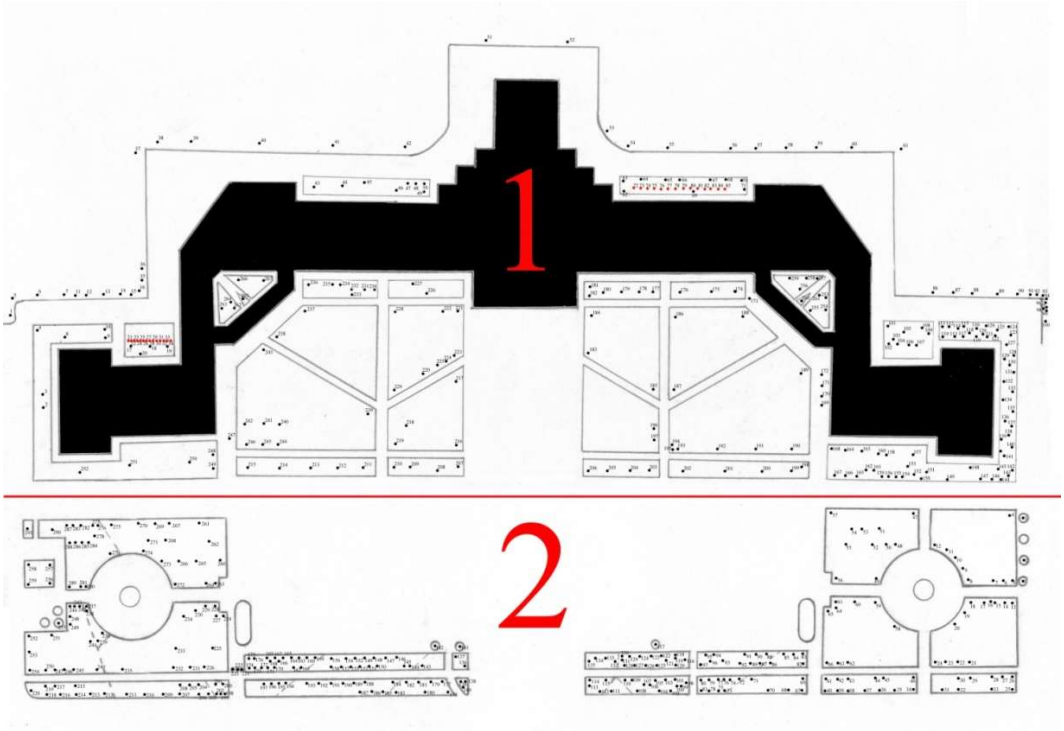


Рис. 1. Карта-схема первого и второго учетного участка. Результат инвентаризации

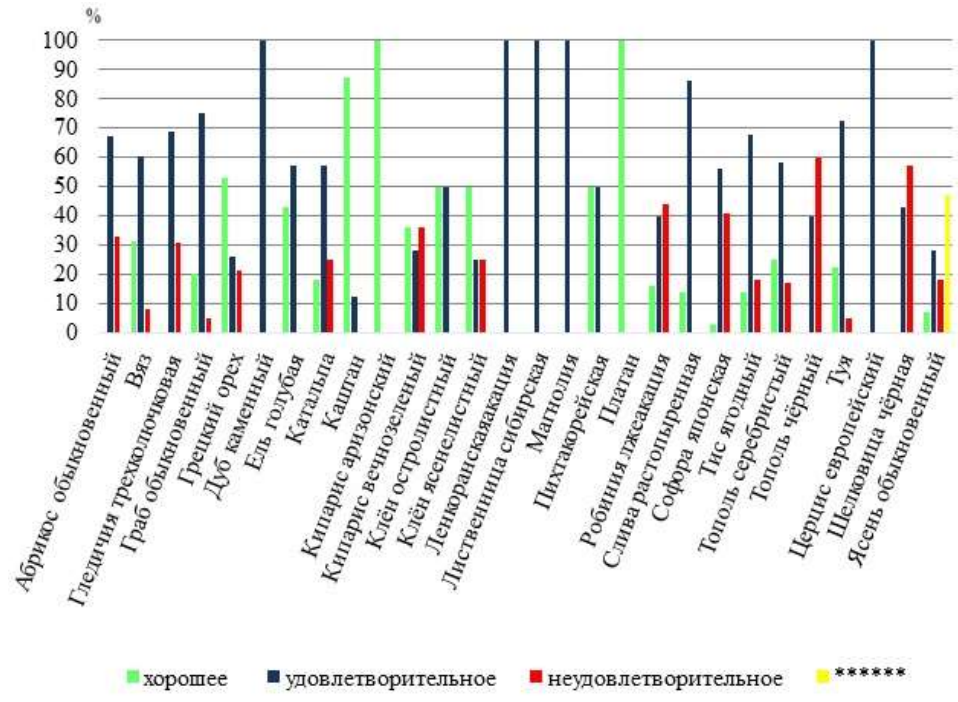


Рис. 2. Распределение видов деревьев по категориям состояния

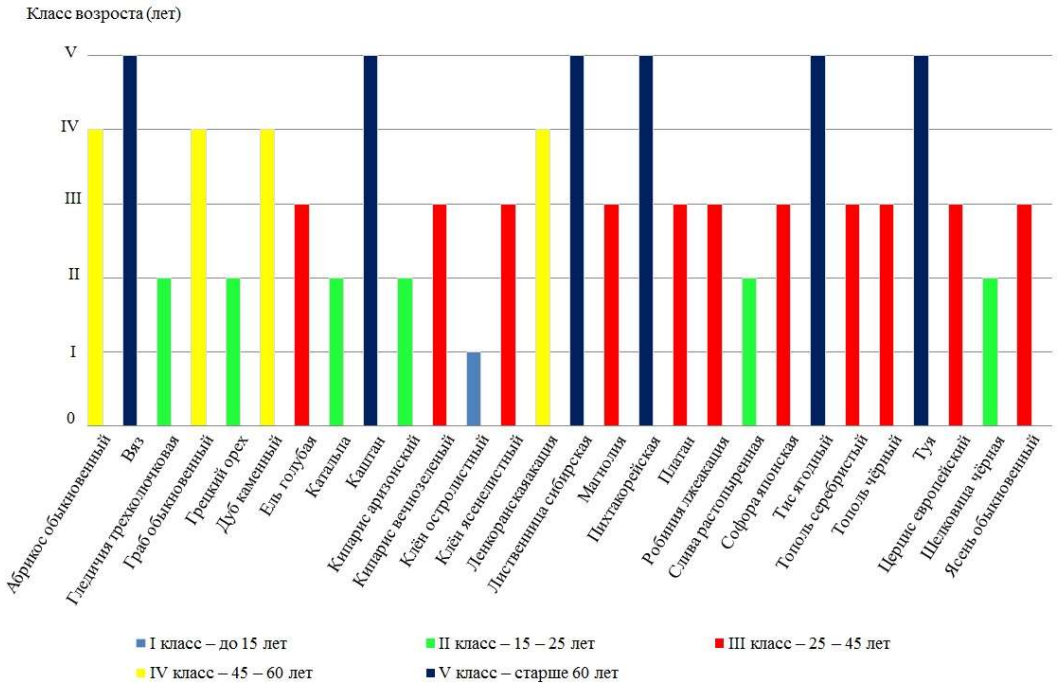


Рис. 3. Распределение видов деревьев по возрастным группам

Анализ состояния деревьев по видам позволил установить, что самое большое количество деревьев в неудовлетворительном состоянии от общего количества деревьев данного вида приходится на тополь чёрный – это 60 %. Также большой процент деревьев в неудовлетворительном состоянии от общего количества деревьев был отмечен у шелковицы чёрной – 57 % и у робинии лжеакации – 44 %.

И, наконец, 54 дерева ясеня обыкновенного, а это 9% от общего количества обследованных деревьев не могли быть оценены ввиду отсутствия листвы, которая была полностью съедена личинками пилильщика чёрного ясеневого (рис. 2).

Данный вредитель атакует ясени на территории парка ИЯЭиП уже несколько лет. Из-за мягкой зимы лёт пилильщика начинается уже в середине апреля и в середине мая практически вся листва на ясенях съедена лжегусеницами пилильщика ясеневого чёрного. Именно поэтому провести оценку деревьев ясеня в мае 2018 года не представлялось возможным. Деревья ясеня после питания вредителя, конечно, ослаблены, однако после серии летних дождей сформируют новые листовые пластинки, которые доживут до осеннего листопада. Ясеневый пилильщик имеет только одну генерацию – весеннюю.

Крупнейшая популяция этого некарантинного вредителя обитает также на Корабельной стороне: в Ушаковой балке и на Малаховом кургане, где взрослые крупные ясени являются доминантами зелёных зон.

Пилильщик ясеневый чёрный – монофаг, повреждает только ясень обыкновенный, плодовые деревья он не трогает. Птицы неохотно питаются личинками пилильщика, а из энтомофауны на сегодняшний день известен только один биоагент, паразитирующий на личинках пилильщика ясеневого чёрного - представитель паразитических наездников-ихневмонид – Rhaetus sp. Thoms. Такой узкий круг естественных врагов наряду с благоприятными погодными условия для развития фитофага позволяет этому вредителю который год подряд формировать довольно плотную популяцию в ясеневых насаждениях Севастополя.

Карантинного статуса у пилильщика ясеневого чёрного нет, поэтому применение карантинных фитосанитарных мер не является оправданным.

Обоснованием применения пестицидов на городских территориях служит только угроза полной потери декоративности насаждений в парках и скверах. Решение об обработках принимается собственником территории самостоятельно с учётом статуса территории и в обязательном соответствии со «Списком пестицидов и агрохимикатов, разрешенных к применению на территории Российской Федерации».

Одним из способов борьбы с вредителем и снижение численности популяции пилильщика ясеневого чёрного в городских условиях, кроме

обработки против листогрызущих вредителей инсектицидами из перечня разрешённых к применению на территории Российской Федерации, является механический метод: перекопка приствольных кругов деревьев в проекции кроны в июне и в ноябре на глубину штыка лопаты, а также побелка стволов ясеня на высоту 1-1,5 метра раствором извести с добавлением в качестве прилипателя жидкого мыла. Эти меры малозатратны, но не менее эффективны в борьбе с вредителем ясеня.

Из обследованных 558 деревьев на лиственные породы пришлось 448 дерева (80,3 %) и 110 деревьев хвойных пород (19,7 %). Известно, что наличие вечнозелёных насаждений значительно повышает эстетический эффект насаждений. Ярким подтверждением этому на обследованной территории является наличие двух участков с рядовой посадкой тиса ягодного, который к тому же является видом, занесённым в Красную книгу. На территории сектора № 1 было учтено 28 тисов ягодных (рис. 1).

Заключение

1. Проведённый анализ нормативно-методической базы по проведению учёта и инвентаризации зелёных насаждений в населённых пунктах позволил выработать оптимальный подход к механизмам оценки состояния древостоя парка Института ядерной энергии и промышленности.

2. Анализ состояния насаждения участков № 1 и № 2 позволяет сделать вывод о том, что эстетические качества объекта снижены. Причинами потери декоративности зелёными насаждениями является естественное старение, болезни растений и поражённость вредителями, а так же недостаточность ухода. Санитарное состояние многих деревьев критическое – 23% деревьев следует удалить.

3. Составленный план инвентаризации первого и второго учётных участков с пронумерованными деревьями, рабочий дневник учёта зелёных насаждений и данные оценки состояния насаждений, при условии проведения дальнейшей инвентаризации всего парка Института ядерной энергии и промышленности, позволят разработать систему хозяйственных мероприятий по содержанию и эксплуатации парка.

Список литературы

1. О состоянии и об охране окружающей среды города Севастополя за 2018 год: ежегодный доклад Главного управления природных ресурсов и экологии города Севастополя. 2019.
2. Методика инвентаризации городских зелёных насаждений: утв. Минстроем России: ввод в действие с 01.01.97. – М.: Академия коммунального хозяйства им. К.Д. Памфилова, 1997.
3. Методическими рекомендации по оценке жизнеспособности деревьев и правилам их отбора и назначения к вырубке и пересадке: утверждены постановлением Правительства Москвы от 30 сентября 2003 г. № 822-ПП.
4. Методическое руководство и технические условия по реконструкции городских зелёных насаждений. М.: МГУЛ, 2001. 60 с.

References

1. On the state and environmental protection of the city of Sevastopol for 2018: annual report of the Main Department of natural resources and ecology of the city of Sevastopol. 2019.
2. Method of inventory of urban green spaces: approved. Ministry of construction of Russia: commissioning from 01.01.97. - Moscow: Academy of municipal economy named after K. D. Pamfilov, 1997.
3. Methodological recommendations for assessing the viability of trees and the rules for selecting and assigning them to felling and replanting: approved by decree of the government of Moscow of September 30, 2003 No. 822-PP.
4. Methodological guidelines and technical conditions for the reconstruction of urban green buildings. Moscow: MGUL, 2001. 60 p.

УДК.621.039.74

Оценка миграции радионуклидов Pu-239 и Cs-137 через бентонитовый буферный слой пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов

Т.Н. Замыслова[1], Е.А. Магдыч[2], Т.С. Набухотняя[3]
[1,2]ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия
[3]Филиал ООО «ВО «Технопромэкспорт», ул. Чернореченская, 142, г. Севастополь, Россия
[1]Zamytanya@yandex.ru, [2]ekaterinasevastopol@yandex.ru, [3]chekalina49@mail.ru

Статья поступила 12.05.2020 г.; после доработки 14.05.2020 г.

Аннотация

Для обоснования безопасности при создании пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов требуется детальное изучение физико-механических, фильтрационных и миграционных свойств всех барьеров безопасности ПГЗРО. В статье рассмотрены факторы, влияющие на миграцию радионуклидов через барьеры безопасности, и выполнен оценочный расчет миграции Pu-239 и Cs-137 через бентонитовый буферный слой ПГЗРО. Показано, что радионуклид Pu-239 сможет пройти через данный инженерный барьер через 1000 лет при наихудших сочетаниях значений и параметров математической модели. Радионуклид Cs-137 вследствие большого значения коэффициента межфазного распределения и существенно меньшего периода полураспада не сможет выйти за пределы буферного слоя. Полученные данные могут быть использованы для оценки безопасности хранилища.

Ключевые слова: радиоактивные отходы, пункт глубинного захоронения радиоактивных отходов, миграция радионуклидов.

Valuation radionuclide migration Pu-239 and Cs-137 through bentonite buffer layer of Deep Radioactive Waste Disposal Point

T.N. Zamislova[1], E.A. Magdych[2], T.S. Nabukhotnyaya[3]
[1,2]Sevastopol State University, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia
[3]Branch of «VO TECHNOPROMEXPORT» LLC, 142 Chernorechenskaya str., Sevastopol, 299010, Russia
[1]Zamytanya@yandex.ru, [2]ekaterinasevastopol@yandex.ru, [3]chekalina49@mail.ru

Received 12.05.2020 y.; received in final form 14.05.2020 y.

Abstract

To justify the safety of creating a deep disposal point for radioactive waste, a detailed study of the physical and mechanical, filtration and migration properties of all safety barriers of DRWDP is required. The article considers the factors that affect the migration of radionuclides through security barriers, and makes an estimated calculation of the migration of Pu-239 and Cs-137 through the bentonite buffer layer of DRWDP. It is shown that Pu-239 radionuclide can pass through this engineering barrier in 1000 years with the worst combinations of values and parameters of the mathematical model. Cs-137 radionuclide will not be able to go beyond the buffer layer due to the high value of the interphase distribution coefficient and a significantly shorter half-life. The data obtained can be used to evaluate the storage security.

Keywords: radioactive waste, deep radioactive waste disposal point, migration of radionuclides

Введение

Ключевым моментом в Федеральном законе №190-ФЗ от 11.07.2011 г. «Об обращении с радиоактивными отходами» [1] является новая

стратегия обращения с накопленными радиоактивными отходами (РАО), которая предполагает переход от технологии их хранения к технологии захоронения в пунктах окончательной изоляции. При этом для минимизации негативного воздействия на человека, а также на объекты окружающей среды наиболее приемлемым методом обращения с высокоактивными отходами (ВАО) считается их изоляция в глубоких геологических формациях в течение периода их потенциальной опасности.

Целью создания пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов (ПГЗРО) является экономически обоснованное и безопасное для экологии окончательное удаление в глубокие экологические формации накопленных Госкорпорацией «Росатом» долгоживущих РАО, которые размещены во временных хранилищах, кондиционированных долгоживущих фракций РАО и РАО от будущей переработки ОЯТ на создаваемом заводе на Горно-химическом комбинате.

Создание единой государственной системы обращения с РАО предполагает также повышение требований к мониторингу и прогнозированию воздействия на окружающую среду действующих и проектируемых хранилищ РАО.

Для минимизации выхода радионуклидов за пределы объекта применяются инженерные барьеры безопасности, выполняющие функцию удержания, а функцию изоляции выполняют природные барьеры, ограничивающие воздействие отходов на человека и биосферу.

Российский проект предусматривает создание пункта глубинного захоронения РАО в Нижне-Канском массиве на глубине 525 м в гнейсовых породах на расстоянии 4,5 километрах от реки Енисей. В качестве инженерных барьеров использованы: консервирующая матрица с ВАО, металлический контейнер, буферный материал (бентонит), а в качестве геологических барьеров – монолитный гнейсовый массив, крупноблочные гнейсовые породы и осадочные породы [2] Инженерные барьеры представляют собой консервирующую матрицу, стальные оболочки, слои бетона, бентонита и других материалов. По нормативным документам, инженерные барьеры должны сохранять свою целостность хотя бы в течение 1000 лет.

Для обоснования безопасности при создании пункта глубинного захоронения РАО требуется детальное изучение физико-механических, фильтрационных и миграционных свойств всех барьеров безопасности ПГЗРО. Достоверность прогнозирования миграции радионуклидов зависит от учета тех процессов, которые отвечают за массоперенос вещества, а также от качества параметрической базы, заложенной в модель. Результаты прогнозов в свою очередь определяют принятие окончательного решения о возможности строительства подземных сооружений повышенной степени ответственности.

Постановка цели и задач научного исследования

Цель исследования – оценочный расчет миграции радионуклидов Pu-239 и Cs-137 через бентонитовый буферный слой ПГЗРО. Для достижения этой цели необходимо: 1) рассмотреть процессы, отвечающие за миграцию радионуклидов через барьеры безопасности; 2) выбрать математическую модель для расчета миграции радионуклидов; 3) выполнить расчет миграции радионуклидов Pu-239 и Cs-137 через бентонитовый буферный слой ПГЗРО.

Миграция радионуклидов через барьеры безопасности

Миграция радионуклидов в барьерной системе захоронения – это баланс между процессами переноса вещества, сорбции и осаждения. Срок, в течение которого начнется выход каждого радионуклида, и количество вышедшего вещества в основном зависят от коэффициента распределения K_d и значения предела растворимости рассматриваемых радионуклидов [3]. Кроме того, в оценке безопасности длительного хранения или окончательного глубинного захоронения высокоактивных отходов важную роль играют расчеты подвижности радионуклидов в различных материалах многослойного инженерного барьера.

Для расчетных оценок количества радиоактивных изотопов, которые в процессе хранения могут покинуть пределы капсулы, содержащей ВАО, необходимо знать величины коэффициентов диффузии основных радионуклидов в предполагаемом материале капсулы [4].

Коэффициент диффузии D, являющийся одной из наиболее важных величин, определяющих скорость диффузии, зависит от природы растворителя и растворенного вещества, от структурных факторов (размер зерна, плотность и характеристики распределения дефектов строения кристаллической решетки) и очень сильно от температуры [5].

Изменения, происходящие при хранении РАО, с течением времени оказывают влияние на миграционные свойства РАО и защитные способности физических барьеров.

При выборе способа захоронения и обеспечения условий для снижения степени распространения радионуклидов вне хранилища, большое значение придается периоду полураспада радионуклидов. Следует также принимать во внимание, что в процессе распада образуются новые радионуклиды, свойства которых в части взаимодействия с инженерными и естественными барьерами (сорбция, диффузия) могут довольно сильно отличаться от первоначально захороненных радионуклидов [6].

Основной внешней причиной, приводящей к миграции радионуклидов, является взаимодействие элементов инженерных барьеров безопасности, в том числе матрицы РАО, с подземными водами, которые разрушают ИББ и переносят радионуклиды сначала за пределы ПГЗРО, а потом сквозь горный массив на поверхность. Следовательно, породы массива и сам массив в целом должны быть, по крайней мере, малопроницаемые с низкими коэффициентами и скоростями фильтрации подземных вод.

Сложно оценить скорость фильтрации подземных вод, поскольку она будет обратно пропорционально зависеть от просветности (отношение площади открытых трещин к площади сечения поперек потока) и прямо пропорционально – от гидравлического градиента.

Просветность зависит от апертуры трещин, поэтому она, как правило, понижается с глубиной. Но этот эффект только повышает скорость фильтрации, что отчасти компенсируется понижением с глубиной коэффициента фильтрации. Таким образом, обводнение горных выработок, а точнее нарушенной при проходке зоны вокруг них и зазора до заполнителя выработок (первого ИББ) при ожидаемом притоке начнется уже на этапе эксплуатации по мере закрытия выработок. После заполнения подземными водами зоны вокруг горных выработок на их пути встают гидроизолирующие ИББ [7].

Отдельная проблема заключается в том, что упаковку РАО невозможно заполнить на 100 % барьерными материалами, особенно если она имеет сложное многослойное строение. Полости, которые изначально заполняет воздух при атмосферном давлении, имеют место как внутри материалов, обладающих пористостью или трещиноватостью, так и между слоями материалов или вследствие усадки одного из них, или вследствие необходимости оставлять технологические зазоры.

В конечном счете все эти полости будут заполнены подземной водой, что увеличит скорость деградации барьерных материалов и подвижность радионуклидов.

В результате деградации самих барьерных материалов, их пористость, а, следовательно, и пустотность упаковок будут только увеличиваться. Это будет происходить за счет растворения фаз и фазовых превращений в барьерных материалах.

Для предприятий ядерного топливного цикла сооружаются и планируются к вводу в эксплуатацию пункты глубинного захоронения радиоактивных отходов, в которых в качестве инженерного барьера используется подстилающий глиняный экран (бентонит). При этом, согласно [8], при создании инженерных барьеров используются уплотнительные глины, имеющие начальный градиент фильтрации 20 – 50 и более, а также коэффициент фильтрации не более 10^{-5} м/сут. Основным механизмом переноса радионуклидов в таких барьерах является молекулярная диффузия.

Расчет миграции радионуклидов Pu-239 и Cs-137 через бентонитовый буферный слой ПГЗРО

Для выполнения оценочного расчета миграции радионуклидов была использована модель, приведенная в работе [9].

Диффузия радионуклидов из пункта глубинного захоронения РАО возможна как через нижнюю часть барьера, так и через его боковые части. Так как площадь основания изучаемого хранилища на несколько порядков превышает площадь его боковых поверхностей, диффузией через боковые части пренебрегают.

Выдвигается предположение, что инженерный барьер является одномерной ограниченной областью $0 < x < h$, на одной границе которой (при $x = 0$) отсутствует поток радионуклидов, а на другой (при $x = h$) концентрация радионуклида равна нулю.

В жидкой фазе пористой среды барьера миграция радионуклидов происходит за счет молекулярной диффузии, которая описывается дифференциальным уравнением с частными производными (уравнением диффузии):

$$\left(n_0 + K_d\rho\right)\frac{\partial}{\partial t}C\left(t,x\right) = D\frac{\partial^2}{\partial x^2}C\left(t,x\right) \qquad (1)$$

с граничными условиями:

$$\frac{\partial}{\partial x}C\left(t,x\right) = 0 \qquad \text{при } x = 0 \qquad (2a)$$

$$C(t,x) = 0 \quad \text{при } x = h \qquad (2б)$$

и начальным условием:

$$C(t,x) = \frac{A}{ab(n_0 + K_d\rho)}\delta(x) \quad \text{при} \quad t = 0 \qquad (3)$$

где h – толщина барьера, м;

t – время, год;

x – координата вертикальной оси барьера, м;

a – длина основания хранилища, м;

b – ширина основания хранилища, м;

C (t, x) – концентрация радионуклида в жидкой фазе пористой среды, Бк/м3;

A – исходная активность области источника, Бк;

Kd – коэффициент распределения радионуклида между твердой и жидкой фазами среды (коэффициент межфазного распределения), м3/кг;

D – водный коэффициент молекулярной диффузии (чистый коэффициент диффузии или фильтрационный коэффициент диффузии), м2/год;

δ(x) – дельта-функция;

ρ – объемная плотность пористой среды, кг/м3 (масса сухого образца, деленная на объем образца);

n0 – активная пористость;

λ – постоянная распада радионуклида, 1/год:

$$\lambda = \frac{\ln(2)}{T} \qquad (4)$$

T – период полураспада, год.

Дифференциальное уравнение диффузии (1) представляет собой частный случай более общего уравнения конвективной диффузии.

Составленная модель консервативна по следующим причинам:

- начальным условием (3) предполагается, что в нулевой момент времени вся накопленная в области источника радионуклидов активность (Бк) распределяется в бесконечно тонком входном слое барьера, что приведет к резкому увеличению градиента концентрации и, следовательно, к возрастанию диффузионного потока радионуклидов как в барьере, так и на выходе из него.
- граничным условием (2б) предполагается, что вышедший из барьера поток радионуклидов (Бк/год) смешивается с потоком воды в насыщенном водоносном слое с большим расходом воды, в результате чего концентрация радионуклидов на выходе из барьера оказывается намного меньше, чем на его входе, что приводит к возрастанию градиента концентрации радионуклидов в барьере и, следовательно, к увеличению диффузионного потока радионуклидов, поступающих в водоносный горизонт.

Решением уравнения (1) со смешанной краевой задачей, определяемой формулами (2), и начальным условием (3), является функция:

$$C(t,x) = \frac{A}{ab(n_0 + K_d\rho)}\exp(-\lambda t)W(t,x) \qquad (5)$$

.

В формуле (4) распад радионуклида учтен сомножителем exp(-λt), а функция W(t,x) вычисляется по формулам, приведенным в справочнике [10].

Плотность диффузионного потока (Бк/м^{2}год) на выходе из барьера (x = h) определяется законом Фика:

$$J(t) = -D\frac{\partial}{\partial x}C(t,x) \quad \text{при } x = h \qquad (6)$$

При проведении расчетов были приняты следующие допущения:

- диффузию радионуклидов рассматривали в пределах бентонитового слоя;
- при расчете учитывали только диффузию в жидкой фазе буферного материала, т.к. диффузия в твердых телах столь мала, что ею можно пренебречь;
- процесс диффузии радионуклидов начинается через тысячу лет, когда контейнер полностью прокорродировал, причем активность в момент выхода РАО за пределы контейнера принимается равной активности в момент загрузки хранилища;
- при проведении расчетов не учитывали процессы сорбции и осаждения радионуклидов.

Исходные данные, принятые для моделирования диффузии радионуклидов через бентонитовый буферный слой, представлены в табл.1-3.

Таблица 1.*Размеры основания хранилища*

Параметр	Величина
Длина (большая сторона) a, м	200
Ширина b, м	100
Высота, м	200

Таблица 2*.Характеристики радионуклидов*

Характеристики радионуклидов	Pu-239	Cs-137
Период полураспада T, лет	2,41·10 4	30

Коэффициент межфазного распределения в барьере Kd, м3/кг	0,25	0,5
Исходная активность А, Бк	1,5·1012	5,0·1016

Таблица 3.*Параметры барьера*

Параметр	Величина
Толщина h, м	0,6
Активная пористость n0	0,1
Объемная плотность, ρ кг/м3	1,5·103
Водный коэффициент молекулярной диффузии D, м2/год	1,8·10-2

На рис.1 представлено распределение концентрации Pu-239 в жидкой фазе барьера по оси x – толщине буферного слоя для четырех значений моментов времени: 100, 200, 500 и 1000 лет. Следует отметить, что за 100 лет плутоний распространится в слой бентонита примерно на 38 см, при этом его концентрация с начального значения уменьшится примерно в 2 раза. А уже примерно через 1000 лет данный радионуклид распределится по всему слою бентонита и будет стремиться распространиться в геологическом барьере.

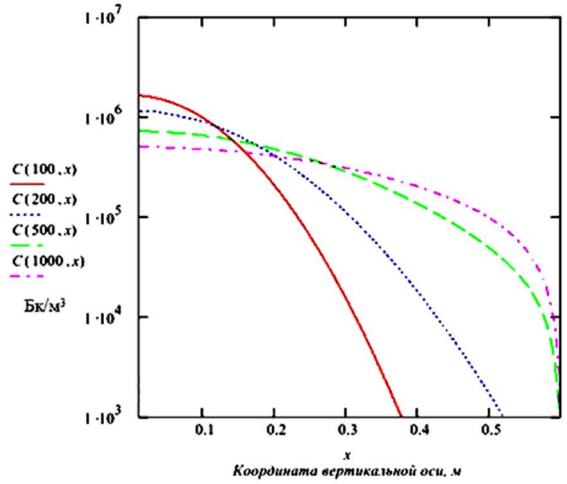


Рис. 1. Распределение концентрации Pu-239 в жидкой фазе барьера, Бк/м^3, по вертикальной оси x для четырех значений моментов времени t: 100, 200, 500 и 1000 лет

На рис. 2 показана плотность диффузионного потока Pu-239 на выходе из барьера в зависимости от времени.

Заметный выход из прокорродировавшего контейнера начинается примерно через 300 лет. До 1200 года плотность диффузионного потока возрастает, плутоний распространяется по слою бентонита, полностью насыщая его в момент максимума плотности потока. После 1200 лет начинается плавный спад параметра, объясняемый выходом плутония за буферный материал и распределением его геологической среде.

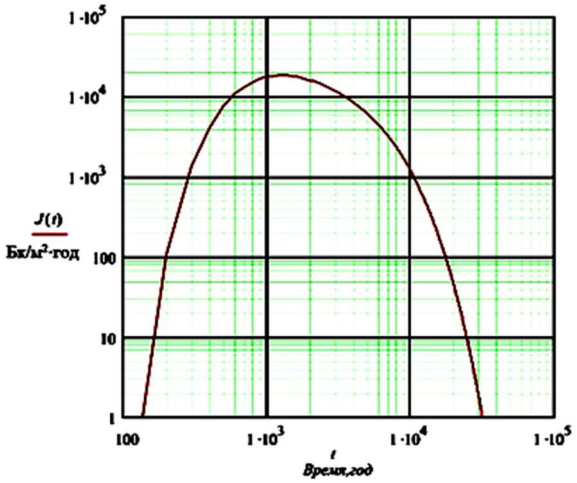


Рис.2. Плотность диффузионного потока радионуклида Pu-239 на выходе из барьера, Бк/м^2·год

На рис. 3 изображено распределение концентрации Cs-137 в жидкой фазе барьера для шести значений моментов времени: 1, 3, 10, 30, 100 и 300 лет.

Для Cs-137 были взяты меньшие промежутки времени ввиду его полного распада примерно через 300 лет. Результаты расчета показывают, что, несмотря на большой коэффициент межфазного распределения, даже через 300 лет радионуклид не сможет преодолеть бентонитовый барьер.

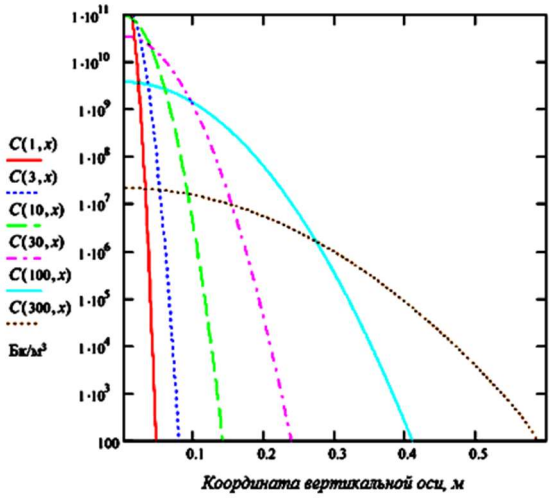


Рис. 3. Распределение концентрации Cs-137, Бк/м3, в жидкой фазе барьера по вертикальной оси x для значений моментов времени t: 1, 3, 10, 30, 100 и 300 лет

В работе была также выполнена оценка чувствительности модели к изменениям параметров. Основными параметрами модели являются: толщина барьера, коэффициент межфазного распределения и водный коэффициент молекулярной диффузии.

Показанные выше результаты расчета получены для наихудшего сочетания значений параметров модели:

- минимального значения толщины барьера;
- минимального значения коэффициента межфазного распределения;
- максимального значения водного коэффициента молекулярной диффузии.

Оценку чувствительности модели к изменениям параметров проводили только для Pu-239, т.к. Cs-137 и при наихудших параметрах не пройдет через толщину буферного материала до полного распада радионуклида.

На рис. 4 представлена плотность диффузионного потока Pu-239 при снижении значений водного коэффициента молекулярной диффузии. Можно отметить, что при снижении водного коэффициента молекулярной диффузии максимум выхода радионуклида из барьера наступает значительно позже. Так при уменьшении коэффициента в 3,6 раза (с $1{,}8\cdot10^{-2}$ до $5{,}0\cdot10^{-3}$ м^2/год) максимум достигается не через 1200 лет, а через 5100 лет.

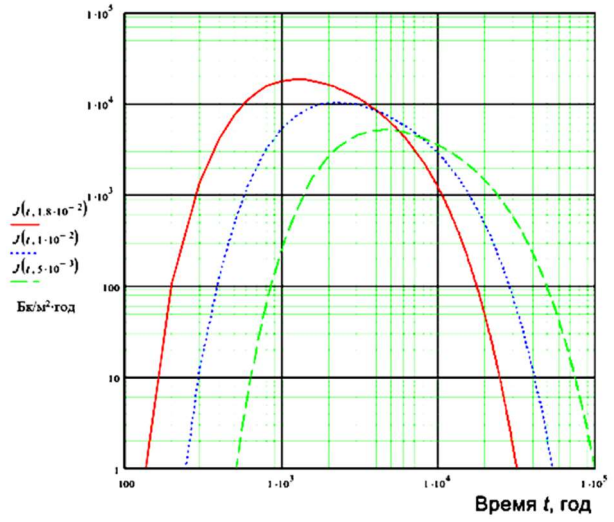


Рис. 4. Плотность диффузионного потока радионуклида Pu-239 на выходе из барьера, Бк/м^2·год, для значений водного коэффициента молекулярной диффузии D: $1{,}8\cdot10^{-2}$; $1{,}0\cdot10^{-2}$ и $5{,}0\cdot10^{-3}$ м^2/год

Толщина барьера также влияет на срок достижения максимума выхода радионуклида из барьера (рис. 5). Так, при увеличении толщины барьера от 0,6 до 1,0 м максимум выхода радионуклида уменьшается в 3 раза, а соответствующий ему момент времени увеличивается от 1200 до 3500 лет.

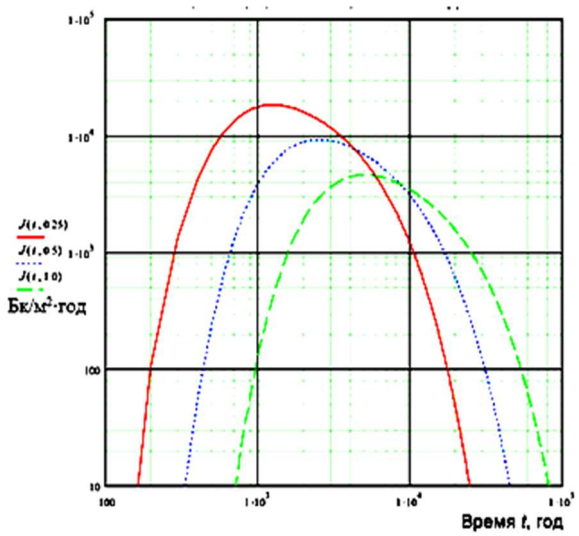


Рис. 5. Плотность диффузионного потока радионуклида Pu-239 на выходе из барьера, Бк/м^2·год, для значений толщины барьера h: 0,6; 1,0 и 1,5 м

При увеличении коэффициента межфазного распределения от 0,25 до 0,5 м^3/кг максимум выхода радионуклида уменьшается в 2 раза, а соответствующий ему момент времени возрастает от 1200 до 2500 лет (рис. 6).

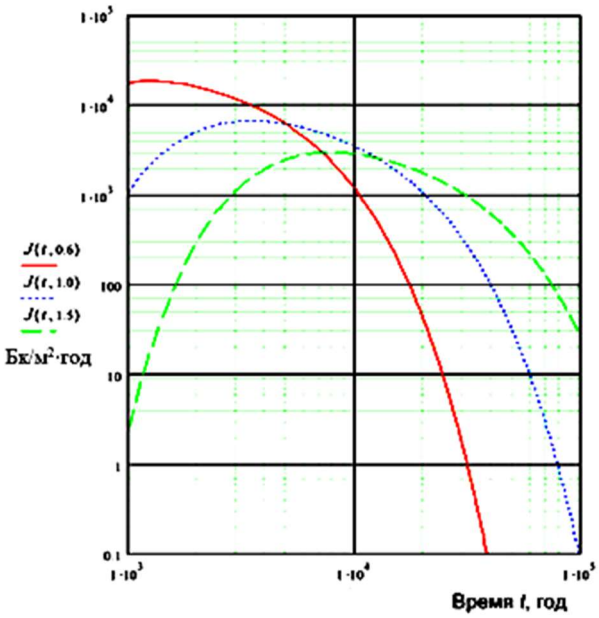


Рис. 6. Плотность диффузионного потока радионуклида Pu-239 на выходе из барьера, Бк/м2·год, для значений коэффициента межфазного распределения: 0,25; 0,5 и 1,0 м3/кг

Заключение

1. Основной внешней причиной, приводящей к миграции радионуклидов, является взаимодействие элементов ИББ, в том числе матрицы РАО, с подземными водами, которые разрушают ИББ и переносят радионуклиды сначала за пределы ПГЗРО, а потом сквозь горный массив на поверхность.

2. Параметрами, необходимыми для оценки миграции радионуклидов через барьеры безопасности, являются коэффициент межфазного распределения Kd, период полураспада и величина активности рассматриваемых радионуклидов.

3. Радионуклид Pu-239 ($T_{1/2}$ = 2,41·10^4 лет) сможет пройти через данный инженерный барьер через 1000 лет при наихудших сочетаниях значений и параметров математической модели. Радионуклид Cs-137 ($T_{1/2}$ = 30 лет) вследствие большого значения коэффициента межфазного распределения и существенно меньшего периода полураспада не сможет выйти за пределы буферного слоя. Полученные данные могут быть использованы для оценки безопасности хранилища.

Список литературы

1. Федеральный закон от 11.07.2011 №190-ФЗ «Об отходах производства и потребления» (Собрание законодательства Российской Федерации, N 29, 18.07.2011, ст.4281).
2. Кочкин Б.Т., Мальковский В.И., Юдинцев С.В. Научные основы оценки безопасности геологической изоляции долгоживущих радиоактивных отходов (Енисейский проект). М.: ИГЕМ РАН, 2017. 384 с.
3. Роль природных и инженерных барьеров при захоронении радиоактивных отходов / А. В. Изотова, Г. Н. Белозерский, В. Г. Савоненков, С. И. Шабалев // Вестник СПбГУ. Сер. 7. 2015. № 4. С. 110-123.
4. Аномальная диффузия радионуклидов в сильнонеоднородных геологических формациях / В. М. Головизнин, П. С. Кондратенко, Л. В. Матвеев и др.; под. ред. чл.-кор. РАН Л. А. Большова; Ин-т проблем безопасного развития атомной энергетики РАН. М.: Наука. 2010. 342 с.
5. Лобанов, М. Л. Методы определения коэффициентов диффузии: учеб. пособие / М. Л. Лобанов, М. А. Зорина. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2017. 100 с.
6. Пронкин Н.С., Шарафутдинов Р.Б., Гераскин Н.И. Регулирование безопасности обращения с радиоактивными отходами: Учебное пособие / Под ред. Н.С. Пронкина. М: НИЯУ МИФИ, 2011. 264 с.
7. Мартынов К. В., Захарова Е. В. Анализ локализации и сценария эволюции ПГЗРО на участке Енисейский (Красноярский край) // Радиоактивные отходы № 2 (3); Москва 2018 г. 52-62 с.
8. Гольдберг В.М. Проницаемость и фильтрация в глинах. М.: Недра. 1986. 160 с.
9. Васильев А. Д., Кондратенко П. С., Матвеев Л. В. Неравновесная модель двойной пористости для описания миграции радионуклидов на участке «Енисейский» // Радиоактивные отходы. 2018. № 1 (2). С. 76-88.
10. Полянин А.Д. Справочник по линейным уравнениям математической физики. М.: Физ.-мат. лит.: Наука/Интерпериодика. 2001. 575 с.

References

1. Federal Law on the 11th of June, 2011, № 190-FZ "*Ob obrashchenii s radioaknivnymi othodami i o vnesenii izmenenij v otdel'nye zakonodatel'nye akty Rossijskoj Federacii*" [Radioactive waste treatment and changes in defined acts of laws in Russian Federation].
2. Kochkin B. T., Malkovsky V. I., Yudintsev S. V. *Nauchnye osnovy otsenki bezopasnosti geologicheskoi izoliatsii dolgozhivushchikh radioaktivnykh otkhodov (Eniseiskii proekt)* [Scientific bases of safety assessment of geological isolation of long-lived radioactive waste (Yenisei project)]. M.: IGEM RAS, 2017. 384 p.
3. *Rol prirodnykh i inzhenernykh barerov pri zakhoronenii radioaktivnykh otkhodov* [The role of natural and engineering barriers in the disposal of radioactive waste] / A.V. Izotova, G. N. Belozersky, V. G. Savonenkov, S. I. Shabalev // St. Petersburg State University Bulletin. Series 7. 2015. No. 4. P. 110-123.
4. *Anomalnaia diffuziia radionuklidov v silnoneodnorodnykh geologicheskikh formatsiiakh* [Anomalous diffusion of radionuclides in strongly heterogeneous geological formations] / V. M. Goloviznin, P. S. Kondratenko, L. V. Matveev et al.; ed. member-corr. RAS L. A. Bolshov; Institute of problems of safe development of atomic energy of RAS. M.: Nauka. 2010. 342 p.
5. Lobanov, M. L. *Metody opredeleniia koeffitsientov diffuzii: ucheb. posobie* [Methods for the determination of diffusion coefficients: textbook] / M. L. Lobanov, M. A. Zorina. Yekaterinburg: Ural publishing house. UN-TA, 2017. 100 p.
6. Pronkin N. S., Sharafutdinov R. B., Geraskin N. I. *Regulirovanie bezopasnosti obrashcheniia s radioaktivnymi otkhodami: Uchebnoe posobie* [Regulation of safety of radioactive waste management: Textbook] / Edited By N. S. Pronkin. M: National research nuclear university MEPhI, 2011. 264 p.
7. Martynov K. V., Zakharova E. V. *Analiz lokalizatsii i stsenariia evoliutsii PGZRO na uchastke Eniseiskii (Krasnoiarskii krai)* [Analysis of localization and scenario of evolution of DRWDP at the Yeniseysky

site (Krasnoyarsk territory)] // Radioactive waste No. 2 (3); Moscow 2018 52-62 p.
8. Goldberg V. M. *Pronitsaemost i filtratsiia v glinakh* [Permeability and filtration in clays]. M.: Nedra. 1986. 160 p.
9. Vasiliev A. D., Kondratenko P. S., Matveev L. V. *Neravnovesnaia model dvoinoi poristosti dlia opisaniia migratsii radionuklidov na uchastke «Eniseiskii»* [Non-Equilibrium model of double porosity for describing the migration of radionuclides in the "Yeniseisky" site] // Radioactive waste. 2018. No. 1 (2). P. 76-88.
10. Polyanin A.D. *Spravochnik po lineinym uravneniiam matematicheskoi fiziki* [Handbook of linear equations of mathematical physics]. M.: Phys. - Mat. lit.: Nauka/Interperiodica 2001. 575 p.

УДК 502.3:669.18

Способ микробиологической деструкции стальных изделий марок Сталь-5, Сталь-20Х бактериальной культурой (Thiobacillus ferrooxidans).

К.А. Кулик[1], Н.М. Дербасова[2] ,В.М. Гавриш[3], О.П.Гавриш[4].
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия, greenpeacekarina@mail.ru[1]

Статья поступила 21.04.2020 г.;после доработки 23.04.2020 г.

Аннотация

Рассмотрен способ микробиологической деструкции стальных изделий марок Сталь-5, Сталь-20Х бактериальной культурой (thiobacillus ferrooxidans). Приведена методика проведения эксперимента и описание экспериментальной установки. Анализ результатов показал, что в течение 10 суток выявлено уменьшение диаметра образцов Сталь-5 до 26%, Сталь-20Х до 95.7% .

Ключевые слова: микробиологическая деструкция, сталь, биореактор, биокоррозия, тионовые бактерии.

Method of microbiological destruction of steel products of grades Steel-5, Steel-20X bacterial culture (Thiobacillus ferrooxidans).

K.A. Kulik[1], N.M. Derbasova[2] ,V.M. Gavrish[3], O.P. Gavrish[4].
Sevastopol State University, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, greenpeacekarina@mail.ru[1]

Received 21.04.2020 y.; received in final form 23.04.2020 y.

Abstract

A method of microbiological destruction of steel products of grades Steel-5, Steel-20X by bacterial culture (thiobacillus ferrooxidans) is considered. The method of the experiment and the description of the experimental setup are given. Analysis of the results showed that within 10 days revealed a decrease in the diameter of the samples Steel-5 to 26%, Steel-20X to 95.7% .

Key words: microbiological destruction, steel, bioreactor, biocorrosion, thion bacteria

Введение

На сегодняшний день проблема переработки стальных изделий заключается в отсутствии экологически безопасных, ресурсосберегающих способов, так как существующие традиционные методы (гидрометаллургические, пирометаллургические, механические и др.) сопровождаются образованием экологически опасных отходов, высокотемпературных выбросов в окружающую среду и сложной техно-логической схемой [1].

Одним из возможных путей решения данной проблемы является использование микробиологического метода переработки стальных изделий**,** который основан на использовании жизнедеятельности тионовых бактерий Thiobacillus ferrooxidans и реализуется с использованием минимального технологического оборудования, относительно малыми эксплуатационными расходами и обеспечением экологической безопасности[2]. Тионовые бактерии обладают мощным ферментативным аппаратом, по своей окислительной активности могут конкурировать с процессами химического окисления сульфидов 26

металлов, способны окислять с получением энергии компоненты серы а также двух валентное железо [3].

Процесс окисления соединений серы, железа бактериями сопровождается уменьшением значений pH, что способствует увеличению скорости микробиологического выщелачивания металла [4].

Целью настоящей работы является обоснование способа микробиологической переработки стальных изделий ассоциацией тионовых бактерий с преимущественным содержанием Thiobacillus ferrooxidans (T. Ferrooxidans).

Описание лабораторной установки

При проведении исследования использовали экспериментальную установку, представляющей собой биологический реактор с непрерывной подачей воздуха. Схема установки представлена на рисунке 1.

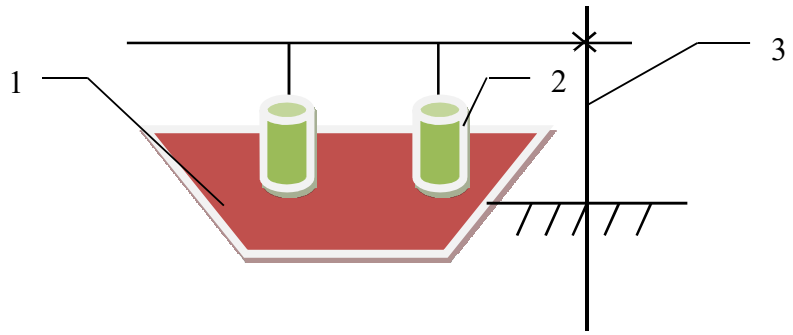


Рис.1.Схема экспериментальной установки: 1-Биореактор; 2-Образцы стальных изделий; 3-Штатив

Образцы загружали в биореактор, где одновременно происходило бактериальное выщелачивание стальных изделий ассоциацией тионовых микроорганизмов с преимущественным содержанием T. Ferrooxidans и химическое окисление ионами Fe^{3+} (полученного в результате жизнедеятельности микроорганизмов) с сопутствующими реакциями электрохимического растворения металлов [5]. Микробиологическое выщелачивание проводили в течение 10 суток. При проведении эксперимента постоянно поддерживалась температура (25 – 30 ^{0}C), контролировалось pH раствора и содержание в нем Fe^{3+}, Fe^{2+}.

Методика проведения эксперимента

Эксперимент проводили в 3 этапа: наработка бактериального раствора, подготовка образцов, микробиологическое выщелачивание [6].

На первом этапе осуществлялась наработка бактериального раствора трехвалентного сульфата железа, выполняющего функции диспергирующей жидкости, растворителя, окислителя, а также являющейся средой обитания автотрофных тионовых бактерий *T.* ferrooxidans, способных активизировать окисление железа (II) в кислой среде и использовать освобождающуюся при этом энергию для построения биомассы[3].

При наработке биораствора выбраны такие параметры как: температура среды и pH. Это факторы, от которых зависит скорость протекания биологических процессов. Наработку раствора проводили при температуре 22-24 ^{0}C и pH = 1,3 – 2,9.

Данный диапазон температуры выбран в виду того, что представленные значения, возможно поддерживать, не используя дополнительных источников тепла, что соответствует принципу экономичности. Диапазон pH = 1,3 – 2,9 обусловлен оптимальным условием развития жизнедеятельности бактерий и недопущением осаждения железосодержащих осадков.

На втором этапе образцы сплавов покрывали кислотостойкой краской. Для проведения эксперимента в качестве исходного образца №1 была использована конструкционная углеродистая сталь Ст-5, использующаяся для изготовления сварных деталей и ненесущих элементов для сварных и несварных конструкций. Сплав Ст-5 содержит: углерода - 0,23-0,37%, кремния - 0,17-0,35%, марганца - 0,5-0,8%, никеля, меди, хрома - до 0,05%.

Образец №2 представлен конструкционной легированной сталью Ст-20Х, применяющейся для изготовления деталей к которым предъявляются требования высокой поверхностной твердости и работающие в условиях износа при трении. Сплав Ст-20Х содержит: углерода - 0,17-0,24%, кремния - 0,17-0,37%, марганца - 0,5-0,8%, никеля, меди, серы, фосфора- до 0,04%, хрома – 0.7-1% [7].

Для изучения эффективности процессов микробиологического выщелачивания в определенном месте представленных образцов нарушали слой краски, обеспечивая доступ раствора к образцу. Начальный диаметр образца №1 Ст-5 составлял 10.7 мм , образца №2 Ст - 20Х - 11.8 мм.

На третьем этапе проводили биологическую деструкцию образцов. В биореактор загружали подготовленные образцы сталей, заливали бактериальным раствором, в объемном соотношении твердой фазы к жидкой 1:6, при этом непрерывно подавая воздух. В процессах микробиологической деструкции, значительную роль играет кислород, обеспечивая метаболизм бактерий и окисление металлов [8].

В процессе выщелачивания, в растворе, поддерживали оптимальные условия для микроорганизмов соблюдая температуру, pH, и содержание трехвалентного железа. Работоспособность рабочего раствора определяли по концентрации трехвалентного железа CFe^{3+}> 4 г/л и значении водородного показателя pH < 3. Поддержание pH на данном уровне обусловлено необходимым условием развития жизнедеятельности бактерий и активным выпадением в осадок трехвалентного железа при pH > 4,0 [2].

В случае превышения показателей, рабочий раствор с восстановленным в результате окислительно–восстановительных реакций двухвалентным железом, направляли на систему ферментеров, для регенерации Fe^{3+} железоокисляющими микроорганизмами.

Анализ экспериментальных данных

Оценка эффективности микробиологического выщелачивания в опытных образцах проводилась в течение 10 суток, путем измерения уменьшения диаметра образца. Усредненные результаты измерений представлены в таблице 1.

Таблица 1. *Динамика микробиологического выщелачивания образцов №1, №2.*

Время (сутки)	**Диаметр образца (мм)**	
	Образец №1 (Ст-5)	**Образец №2 (Ст-20Х)**
1	10.7	11.7
2	9.2	11.6
3	8.5	11.6
4	7.4	11.5
5	7.0	11.5
6	6.5	11.5
7	6.1	11.4
8	5.3	11.4
9	5.1	11.3
10	4.5	11.3

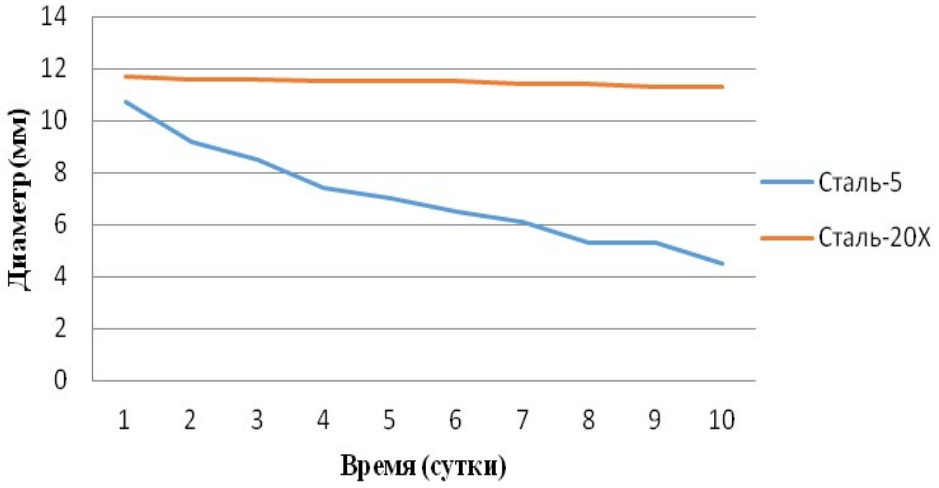


Рис. 2. Эффективность бактериального выщелачивания стальных изделий.

Результаты исследования изменения диаметров образцов при бактериальном выщелачивании (табл.1) выявили, что степень извлечения железа из образца №1 марки Сталь-5 составляет 26,4%, а образца №2 марки Сталь-20Х составляет 95.7%.

Анализ полученных данных эффективности при бактериальном выщелачивании представлены на рисунке 2.

Столь низкие значения извлечения железа из стали марки Ст-20х, можно объяснить наличием в образце большего количества легирующих добавок, повышающих прочность, коррозионную стойкость и снижающие опасность хрупкого разрушения металла.

Заключение

Полученные данные позволяют сделать вывод о возможности применения тионовых бактерий T. Ferrooxidans для переработки отходов стальных изделий. По результатам работы было выявлено, что образец 1 Ст-5 в течение 10 суток подверглась процессу микробиологической деструкции сильнее чем образец 2 Ст-20Х, диаметр исходных образцов уменьшился: Ст-5 с 10.7 до 4.5 мм, а Ст-20Х с 11.7 до 11.3 мм. Эффективность деструкции обусловлена химическим составом образцов.

Результаты работы дополняют информацию по микробиологической деструкции стальных изделий и будут полезны для решения проблем выбора материалов в биотехнологиях, а также оценки экологических ситуаций в металлических конструкциях.

Список литературы

1. Валуев Д.В., Гизатулин Р.А. Технологии переработки металлургических отходов: учебное пособие / Д.В. Валуев; Юргинский технологический институт. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – С.196.
2. Чайка Т.В. Исследования разделения карбида вольфрама и кобальта в результате микробиологической деструкции вольфрамо - кобальтовых отходов./Т.А.Чайка, Н.М. Дербасова М.В. Гавриш// Зб. наук. пр СНУЯЕтаП. – Севастополь: СНУЯЭиП, 2013. – Вып. 3 (69). – С.125 – 130.
3. Чайка Т.В. Переработка твердосплавных изделий методом биологического выщелачивания / Т.В. Чайка, Н.М. Дербасова // Зб. наук. пр. СНУЯЕтаП. – Севастополь: СНУЯЭиП, 2012. – Вып. 4 (44). – С.194 – 200.
4. Kip N., Van Veen J.A. The dual role of microbes in corrosion // The ISME Journal: International Society for microbial ecology. – 2015. – Vol. 9, no. 3. – P. 542–551.
5. Кузякина Т.И. Биотехнология извле-чения металлов из сульфидных руд / Т.И. Кузякина, Т.С. Хайнасова, О.О. Левенец // Вестник КРАУНЦ. Науки о земле.– Петропавловск–Камчатский, 2008. – Вып. 12. – № 2. – С. 76–86.
6. Строганов В.Ф., Сагадеев Е.В. Биоповреждение строительных ма-териалов: Учебное пособие Казань: Изд-во Казанск. гос.–/В.Ф. Строганов, Е.В. Сагадеев. 61 с–архитект.-строит. университета, 2018.-С.34-45.
7. Ю.Г. Драгунов Марочник сталей и сплавов. 4-е изд., / Ю.Г. Драгунов, А.С. Зубченко, Ю.В. Каширский Дегтярев А.Ф., Жаров В.В., Колосков М.М., Орлов А.С., Скоробогатых В.Н – М.: 2014.-С.56;195.
8. Соколова Т.С. Влияние тионовых бактерий на коррозию стали / Т.С. Соколова, В.Д. Коновалова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Серия «Химическая технология и биотехнология», 2017, № 2. С. 7–18.

References

1. Valuev D.V., Gizatulin R.A. Technologies for processing metallurgical waste: a training manual / D.V. Valuev; Yurginsky Institute of Technology. - Tomsk: Publishing house of the Tomsk Polytechnic University, 2012. - P.196.
2. Seagull T.V. Studies of the separation of tungsten carbide and cobalt as a result of microbiological destruction of tungsten - cobalt waste / T.A. Chaika, N.M. Derbasova M.V. Gavrish // Zb. sciences. pr. - Sevastopol: SNUYaEiP, 2013. - Issue. 3 (69). - P.125 - 130.
3. Seagull T.V. Processing carbide products by the method of biological leaching / T.V. Seagull, N.M. Derbasova // Zb. sciences. pr. - Sevastopol: SNUYaEiP, 2012. - Issue. 4 (44). - P.194 - 200.
4. Kip N., Van Veen J.A. The dual role of microbes in corrosion // The ISME Journal: International Society for microbial ecology. - 2015. - Vol. 9, no. 3. - P. 542–551.
5. Kuzyakina T.I. Biotechnology for the extraction of metals from sulfide ores / T.I. Kuzyakina, T.S. Khainasova, O.O. Levenets // Bulletin of KRAUNTS. Earth Sciences. - Petropavlovsk-Kamchatsky, 2008. - Issue. 12. - No. 2. - P. 76–86.
6. Stroganov V.F., Sagadeev E.V. Biological damage to building materials: Textbook Kazan: Kazan Publishing House. state.□ / V.F. Stroganov, E.V. Sagadeev. 61 c□architect.-builds. University, 2018.-P.34-45.
7. Yu.G. Dragunov Marochnik steels and alloys. 4th ed., / Yu.G. Dragunov, A.S. Zubchenko, Yu.V. Kashirsky Degtyarev A.F., Zharov V.V., Koloskov M.M., Orlov A.S., Skorobogatykh V.N .-- M .: 2014.-P.56; 195.
8. Sokolova T.S. The effect of thionic bacteria on steel

corrosion / TS. Sokolova, V.D. Konovalova // Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Series “Chemical Technology and Biotechnology”, 2017, No.2. P. 7–18.

УДК 631.95:631.438(470.333)

Результаты радиологического обследования почв сельскохозяйственных угодий Брянской области

А.А. Романенко
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия, alrom60@yandex.ru

Статья поступила 30.04.2020 г.; после доработки 07.05.2020 г.

Аннотация

Исследования показали, что уровни радиоактивного загрязнения со временем снижаются. При этом наибольшее снижение отмечается на пашне. В частности, плотность загрязнения почвы на 01.01.2018 года уменьшилась по сравнению с 1986-1988годами на пашне в 2,5 раза, на сенокосах и пастбищах в 1,9 раза. Это снижение обосновано радиоактивным распадом цезия-137, различной миграцией его по профилю почвы на пашне и сенокосах и пастбищах и выносом радионуклидов растениями.

Ключевые слова: плотность загрязнения, радионуклид, пашня, сенокосы, пастбища, почва, сельскохозяйственные угодья.

Results of radiological survey of soils of agricultural lands of the Bryansk region

A.A. Romanenko
Sevastopol State University, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, alrom60@yandex.ru

Received 30.04.2020 y.; received in final form 07.05.2020 y.

Abstract

Studies have shown that levels of radioactive contamination decrease over time. At the same time, the greatest decrease is observed in arable land. In particular, the density of soil pollution on 01.01.2018 in comparison with 1986-1988 period decreased 2.5 times on arable land and 1.9 times on hayfields and pastures. This decrease is justified by the radioactive decay of cesium-137, its different migration along the soil profile on arable land and hayfields and pastures, as well as the removal of radionuclides by plants.

Keywords: Pollution density, radionuclide, arable land, hayfields, pastures, soil, agricultural land.

Введение

Авария на Чернобыльской АЭС по многообразию и длительности последствий остается самой масштабной техногенной катастрофой. Она обусловила изменение подходов к ведению хозяйства, созданию новой нормативно-законодательной базы, а также создание новых структур и исследовательских центров [2].

Со времени аварии прошло более 30 лет. Однако радионуклиды все еще остаются в окружающей среде и все еще представляют угрозу для здоровья людей. Принятые контрмеры значительно уменьшили загрязнение продукции растениеводства и животноводства, однако часть их остается с превышением допустимых уровней [3].

Каждая авария имеет свою специфику, которая зависит от изотопного состава, климатических и почвенных условий, состава растительности. Поэтому изучение динамики загрязнения цезием-137 сельскохозяйственных угодий Брянской области имеет как научный так и практический интерес.

Цель и методы исследования

Целью данного исследования является оценка загрязнения цезием-137 районов Брянской области, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате аварии на Чернобыльской АЭС. Объектом исследований является сельскохозяйственные угодья.

Методами исследований были анализ библиографических данных, статистической информации, сравнения, табличный.

Изложение основного материала

В результате аварии на Чернобыльской АЭС в Брянской области были загрязнены Клинцовский, Климовский, Новозыбковский, Злынковский, Стародубский, Красногорский и Гордеевский районы [4].

Эти районы находятся в умеренной климатической зоне. Средняя температура зимы - -5^{O}C, весны - +5^{O}C, лета +18^{O}C, осени - +1^{O}C. Максимальная температура достигает иногда +35^{O}C, как правило, в июле-месяце, зимой может падать до - 20^{O}C [6]. Стоит отметить и относительно высокий уровень атмосферной влажности – до 80%, уровни атмосферного давления – 740 – 770 мм. рт. ст. Настоящая весна (снеготаяние, паводки) начинаются к концу марта.

Почвы, в основном, легкого механического состава, бедные калием и фосфором, небогатые гумусом и с кислой реакцией почвенного раствора, что способствует повышенному поступлению радионуклидов из почвы в растения [1].

По результатам радиологического обследования почв в контрмерах нуждается 127,7 тыс. га, что составляет 7,6% от всех сельскохозяйственных угодий области, где 69, 4 тыс. га пашня, а 57,7 тыс. га – естественные кормовые угодья. Плотность загрязнения цезием-137 этих почв составляет свыше 185 кБк/м^2 [6]. Сравнивая радиационную ситуацию с до аварийным периодом отмечается превышение уровня радиоактивного загрязнения почв 1985 года порядка в 110 раз [5,6].

На 01. 01. 2018 г. средневзвешенный показатель плотности загрязнения почв ^{137}Cs на сельскохозяйственных угодьях составляет 55,5 кБк/м^2, в т.ч. на пашне – 44,2 кБк/м^2, естественных кормовых угодьях – 100,1 кБк/м^2 . Наиболее высокий уровень содержания ^{137}Cs в почве (344,3 кБк/м^2) выявлен в Новозыбковском районе.

Табличные данные также показывают, что на пашне содержание радионуклидов снижается гораздо быстрее, чем на естественных сенокосах и пастбищах. В частности на пашне содержание радионуклидов уменьшилось в 2,5 раза, а на сенокосах и пастбищах – в 1,9 раза. Это различие можно объяснить перераспределением радионуклидов на пашне по пахотному горизонту и миграцией части их в ниже лежащие слои почвы, в отличие от естественных угодий, где цезий-137 до 80% сосредоточен в 10 см слое, а ниже пахотного слоя находится незначительное его концентрация.

Таблица 1 *Динамика загрязнения цезием-137 сельскохозяйственных угодий Брянской области (1986-2018гг.) [6]*

Угодья	Годы обследования	Обследованная площадь		Средневзвешенная плотность загрязнения	Кратность снижения
		Тыс.га	%	кБк/м^2	
Всего с/х угодий	1986 - 88	1756,7	100	132,1	2,4
	На 01.01.2018 г.	1664,2	100	55,5	
В т.ч. пашни	1986 - 88	1267,4	100	111,4	2,5
	На 01.01.2018 г.	1251,4	100	44,2	
Сенокосы + пастбища	1986 - 88	489,3	100	185,7	1,9
	На 01.01.2018 г.	412,8	100	100,1	

Заключение

Таким образом, снижение радиоактивного загрязнения почв сельскохозяйственных угодий обусловлено радиоактивным распадом, миграцией радионуклидов по профилю почвы и их выносом с растительной продукцией.

Список литературы

1. Белоус, Н. М. Агрохимическое обеспечение производства растениеводческой продукции на техногенно загрязненных почвах / Н. М. Белоус // 75 лет Географической сети опытов с удобрениями: материалы Всероссийского совещания научных учреждений – участников Географической сети опытов с удобрениями / под ред. акад. РАН В. Г. Сычева. – М.: ВНИИА, 2016. – С. 28-32.
2. Василенков, В.Ф. Удаление радиации в загрязненных цезием населенных пунктах. /В.Ф. Васи-

ленков, С.В. Василенков // Проблемы энергообеспечения, информации и автоматизации, безопасности и природопользования в АПК. Сб. материалов международной научно-практической конференции. – Брянск. Изд. Брянской ГСХА, 2014 – С. 66-77.
3. Василенков С.В. Технологии и технические решения по реабилитации радиоактивно загрязненных цезием территорий. Автореф. дис. на соискание ученой степени доктора техн. наук. М., 2017. 51 с.
4. Федеральный закон "О радиационной безопасности населения" от 09.01.1996 N 3-ФЗ. Электронный ресурс. Источник доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_8797
5. Косолапова Э.В. Многообразие последствий Чернобыльской катастрофы// С*борник* научных трудов. Материалы IXX-й международной научно-технической конференции «*Конструирование*, использование и *надежность машин сельскохозяйственного* назначения», 2017. С.75 – 83.
6. Природные ресурсы и окружающая среда Брянской области. Годовой доклад об экологической ситуации в Брянской области в 2017 году. Брянск. 2018. 260 с.

References

1. Belous, N. M. Agrochemical support of crop production on technogenic contaminated soils / N. M. Belous / / 75 years of the Geographical network of experiments with fertilizers: materials of the all-Russian meeting of scientific institutions-participants of the Geographical network of experiments with fertilizers / ed. The RAS V. G. Sychev. - Moscow: VNIIA, 2016. - Pp. 28-32..
2. Vasilenko, V. F. Removal of radiation in contaminated with cesium settlements. / V. F. Vasilenkov, S. V. Vasilenkov / / Problems of energy supply, information and automation, safety and environmental management in agriculture. Collection of materials of the international scientific and practical conference. – Bryansk. Ed. Bryansk gsha, 2014-Pp. 66-77.
3. Vasilenkov S. V. Technologies and technical solutions for rehabilitation of radioactively contaminated territories with cesium. Abstract. dis. for the degree of doctor of technology. sciences'. Moscow, 2017. 51 PP.
4. Federal law "on radiation safety of the population" of 09.01.1996 N 3-FZ. Electronic resource. Access source: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_8797 J. *Singular perturbation methods in control: analy*
5. Kosolapova E. V. Diversity of consequences of the Chernobyl disaster / / Collection of scientific works. Proceedings of the ixxth international scientific and technical conference "Design, use and reliability of agricultural machines", 2017. P. 75 – 83.
6. Natural resources and environment of the Bryansk region. Annual report on the environmental situation in the Bryansk region in 2017. Bryansk. 2018. 260 PP.

УДК 502.55

Оценка качества атмосферного воздуха района размещения основной площадки Акционерного общества «Интер РАО – Электрогенерация»

А.А. Фадова, Г.В. Кучерик, Е.В. Заблоцкая
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия
Fadova.small-kafka@yandex.ru;Galina_kucherik@mail.ru; Evere82@mail.ru

Статья поступила 18.05.2020 г.; после доработки 20.05.2020 г.

Аннотация

В статье приведены результаты оценки качества атмосферного воздуха района размещения площадки Акционерного общества «Интер РАО – Электрогенерация», находящаяся в г. Гусиноозерск. Изучен технологический цикл объекта исследования, определены основные источники загрязнения атмосферы и основные загрязняющие вещества. Проведен расчет рассеивания загрязняющих веществ с учетом фоновых концентрации, а также других предприятий вносящих вклад в загрязнение атмосферного воздуха г. Гусиноозерска. На основании анализа расчетов рассеивания определено, что на границе жилой застройки и нормируемых территорий ни по одному веществу не наблюдается превышение ПДК.

Ключевые слова: загрязнение атмосферного воздуха, расчет рассеивания, тепловая электростанция.

Assessment of air quality in the area of accommodation main site of the joint stock company «Inter RAO – Elektrogeneratsiya»

A.A. Fadova, G.V. Kucherik, E.V. Zablotskaya
Sevastopol state university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia.
Fadova.small-kafka@yandex.ru;Galina_kucherik@mail.ru; Evere82@mail.ru

Received 18.05.2020 y.; received in final form 20.05.2020 y.

Abstract

The article presents the results of air quality assessment of the area of the site location of the Joint-Stock Company "Inter RAO - Electric Power Plants", located in the city of Gusinoozersk. The technological cycle of the object of study was studied, the main sources of air pollution and the main pollutants were identified. The calculation of the dispersion of pollutants was carried out taking into account background concentrations, as well as other enterprises contributing to atmospheric air pollution in the city of Gusinoozersk. Based on the analysis of dispersion calculations, it was determined that at the boundary of residential buildings and normalized territories there is no excess of MPC for any substance.

Keywords: air pollution, dispersion calculation, thermal power plant

Введение

Проблема загрязнения атмосферного воздуха городов является острой экологической проблемой России.

Наблюдения за загрязнением атмосферного воздуха в Российской Федерации проводятся в 246 городах на 667 станциях, из них регулярные наблюдения выполняются в 221 городе на 611

станциях [1]. В 46 городах Российской Федерации (21% от числа городов с регулярными наблюдениями за загрязнением атмосферного воздуха на сети Росгидромета) уровень загрязнения воздуха в 2018 г. оценивался как высокий и очень высокий (ИЗА > 7), в 60% городов – как низкий [1].

В городах с высоким и очень высоким уровнями загрязнения атмосферного воздуха проживает 13,4 млн человек, что составляет 12 % городского населения Российской Федерации. Сравнение уровней загрязнения воздуха в городах на территориях федеральных округов показывает, что более половины городов (57%) с высоким и очень высоким уровнем загрязнения расположены в Сибирском федеральном округе (в том числе в республике Бурятия). Значения средних концентраций наиболее распространенных примесей в целом по городам Российской Федерации проиллюстрированы на рис.1 [1].

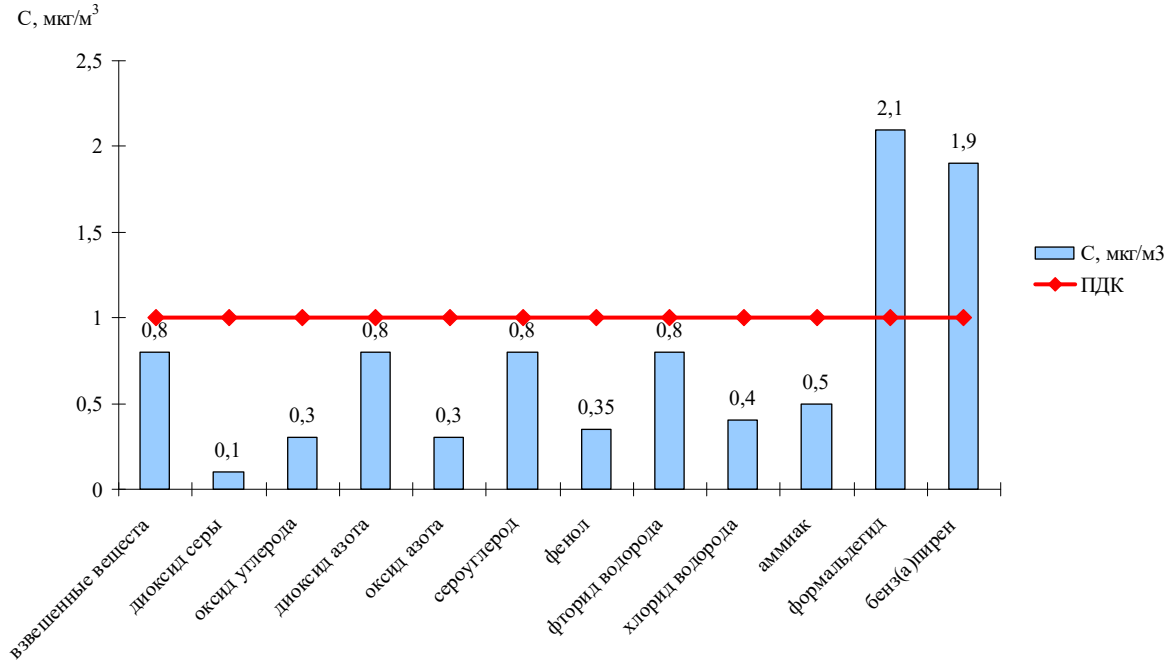


Рис. 1. Значения средних концентраций наиболее распространенных примесей в целом по городам РФ

Как видно из рис. 1, средняя за год концентрация бенз(а)пирена в атмосферном воздухе городов Российской Федерации в 2018 г. превысила ПДК в 1,9 раза; концентрации других веществ были ниже 1 ПДК. В целом по Российской Федерации в 2018 г. 143 города (58% городов, где проводятся наблюдения) с общим населением 56,0 млн человек характеризовались превышением значений средних за год концентраций 1 ПДК в атмосферном воздухе хотя бы по одному ингредиенту; из указанного количества городов в 52 выявлено превышение по взвешенным веществам, в 56 – по бенз(а)пирену, в 50 – по диоксиду азота.

Значения средних из максимальных концентраций рассматриваемых примесей, кроме диоксида серы и оксида азота, в целом по городам Российской Федерации в 2018 г. превысили 1 ПДК. Значения по аммиаку, диоксиду азота, оксиду углерода, фенолу, формальдегиду, фториду водорода, взвешенным веществам и сероуглероду отмечены в интервале 1,2-1,7 ПДК, по сероводороду и хлориду водорода превысили ПДК в 2,0-2,4 раза, по этилбензолу – в 4,3 раза, по бенз(а)пирену – в 8,2 раза. В целом по Российской Федерации в 2018 г. 37 городов (15% городов, где проводятся наблюдения) с общим населением 12,6 млн. человек характеризовались превышением значений максимальных концентраций 10 ПДК в атмосферном воздухе хотя бы по одному ингредиенту; из указанного количества городов в 4 выявлено превышение по сероводороду, в 32 – по бенз(а)пирену, в 1 городе – по диоксиду азота, свинцу, ксилолу и этилбензолу. Всего в 2018 г. выявлено 219 случаев превышения 10 ПДК по различным загрязняющим веществам. Концентрации бенз(а) пирена превышали уровень 5 ПДК в 49 городах с общим населением 13,3 млн чел. Значения средних из максимальных концентраций примесей в целом проиллюстрированы на рис. 2 [1].

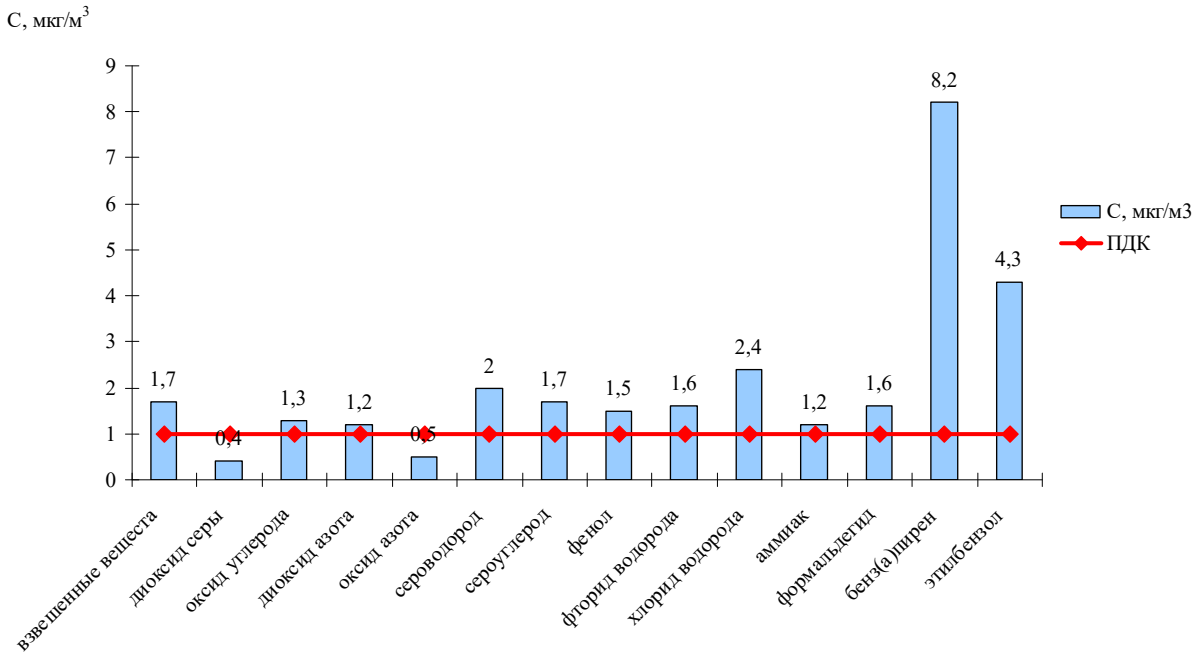


Рис. 2. Значения средних из максимальных концентраций примесей

Составленный Росгидрометом Приоритетный список городов с наибольшим уровнем загрязнения в 2018 г. включает 22 города с общим числом жителей 5,1 млн. человек [1]. В список включены города с очень высоким уровнем загрязнения воздуха, для которых комплексный индекс загрязнения атмосферы (ИЗА) равен или выше 14.

Наибольшие концентрации бенз(а)пирена в городах Российской Федерации отмечались в холодный период с началом отопительного сезона, поскольку поступление данного загрязняющего вещества в атмосферный воздух происходит в основном в результате сгорания топлива. Например в Дальневосточном федеральном округе 2018 г. оказался самым теплым за всю историю метеонаблюдений. Установившаяся теплая погода позволила топливно-энергетическим предприятиям работать не в полную мощность, что способствовало снижению загрязнения воздуха бенз(а)пиреном и другими загрязняющими веществами.

В отраслевом разрезе в Приоритетный список городов Российской Федерации с наибольшим уровнем загрязнения атмосферного воздуха вошли: 7 городов – с предприятиями черной, цветной и алюминиевой промышленности, 7 городов – с предприятиями машиностроения, 9 городов – с предприятиями лесной и деревообрабатывающей промышленности, 4 города – с предприятиями угольной и горнодобывающей промышленности, 7 городов – с предприятиями химической и нефтеперерабатывающей промышленности, 3 города – с предприятиями целлюлозно-бумажной промышленности, а также 5 городов, где основными источниками выбросов являются предприятия топливно-энергетического комплекса.

Во всех городах Приоритетного списка вклад в очень высокий уровень загрязнения атмосферного воздуха вносит бенз(а)пирен, в наибольших количествах поступающий в воздух в результате сжигания твердого топлива; существенный вклад в загрязнение воздуха в 9 городах вносят также взвешенные вещества, а в 5 городах – формальдегид, в 4 городах – диоксид азота, в 3 городах – приземный озон, в 3 городах – взвешенные частицы PM10.

Изучив вышеизложенные данные можно сделать вывод об ухудшении состояния атмосферного воздуха городов в последние годы. Следует также учесть, что содержание загрязняющих веществ в атмосферном воздухе формируется преимущественно под влиянием промышленных выбросов, большой вклад в которые вносится предприятиями топливно-энергетического комплекса.

Постановка задачи

Объектом исследования послужила основная площадка Акционерного общества «Интер РАО – Электрогенерация», находящаяся в городе Гусиноозерске.

Филиал «Гусиноозерская ГРЭС» АО «Интер

РАО – Электрогенерация» является тепловой электрической станцией конденсационного типа предназначенной для выработки и обеспечения электрической энергией. ГРЭС также обеспечивает теплом в виде горячей воды промышленность и жилищно-коммунальный сектор города Гусиноозерск. Основными тепловыми агрегатами паротурбинной электростанции является паровой котел и паровая турбина.

Цель работы заключалась в оценке качества атмосферного воздуха района размещения площадки.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- изучить технологический цикл объекта исследования, определить основные источники загрязнения атмосферы и основные загрязняющие вещества;
- провести расчет рассеивания загрязняющих веществ с учетом фоновых концентрации, а также других предприятий вносящих вклад в загрязнение атмосферного воздуха г. Гусиноозерска;
- сделать анализ расчетов рассеивания на границе жилой застройки и нормируемых территорий.

Описание исследования

Площадки филиала «Гусиноозерская ГРЭС» Акционерного общества «Интер РАО – Электрогенерация» (далее Гусиноозерская ГРЭС), расположены в Республике Бурятии, г. Гусиноозерск. Основным видом деятельности является производство электроэнергии, что соответствует коду ОКВЭД 35.11. В радиусе 25 км от ГРЭС расположено 19 населенных пунктов (таблица 1).

Таблица 1. *Характеристика расположения ближайших населенных пунктов*

Название населенного пункта	Местоположение от дымовой трубы ГО ГРЭС	Количество		Площадь, км^2
		население, чел	дворов	
Ягодное	Север – 12 км	245	110	0,5
Тохой	Северо-восток – 11.5 км	2747	842	3
Тухум	Восток – 4.5 км	нет данных	8	0,4
Гусиноозерск	Юго-восток – 2 км	нет данных	нет данных	8,5
Ардасан	Северо-восток – 17 км	136	46	0,5
Жаргаланта	Северо-восток – 19.5 км	210	273	2,5
Средний Убукун	Северо-восток – 24.5 км	299	132	1,6
Харгана	Северо-восток – 34 км	915	270	1,8
Сутой	Восток – 26 км	нет данных	89	1,1
Новоселенгинск	Юго-восток – 25 км	2070	727	2,2
Бургастай	Юго-восток – 34 км	123	29	0,4
Цайдам	Юго-запад – 23,5 км	нет данных	82	0,8
Гусиное Озеро	Юго-запад – 25 км	991	нет данных	3,1
Темник	Юго-запад – 40км	нет данных	193	1,7
Муртой	Юго-запад – 17,3 км	нет данных	2	0,2
Бараты	Юго-запад – 10 км	197	2,84	1,9
ст.Загустай	Северо-запад – 3,4 км	58	66	0,3
Заозерный	Северо-запад – 4,5 км	317	747	0,4
Пионерский	Северо-запад – 9,5 км	нет данных	28	0,4
Всего				31,3

Территория площадки граничит:

- с северо-западной стороны – с ФКУ Исправительная колония №1 УФСИН России по Республике Бурятия;
- с остальных сторон – с территориями промышленного назначения.

На основной промплощадке расположены:

- главный корпус (блок 1,2,3,4) – котельный цех, турбинный цех, электроцех;
- главный корпус (блок 5,6) – котельный цех, турбинный цех, электроцех;
- блок административно-управленческих зданий;
- цеха вспомогательного производства – топливно-транспортный цех (ТТЦ), электрический цех (ЭЦ), химический цех (ХЦ), гидротехнический цех (ГТЦ), отдел материально-технического снабжения и управления запасами (ОМТСиУЗ), цех централизованного ремонта (ЦЦР), прачечная [2].

Основными источниками образования загрязняющих веществ на Гусиноозерской ГРЭС

являются именно энергетические котлы.

Производство электроэнергии на ГРЭС осуществляется по паросиловому циклу: источником энергии является топливо (уголь), сжигаемое в котлах генерирующих высокопотенциальный пар с температурой 540°С и давлением 140 кг/см^2, приводящий во вращение ротор турбины. Последняя непосредственно соединена с электрическим генератором, вырабатывающим электроэнергию [2].

В качестве основного топлива для котлов Гусиноозерской ГРЭС используются угли Окино-Ключевского месторождения и смесь углей Тугнуйского, Окино-Ключевского, Баин-Зурхе и Загустайского рождений [2].

Растопка котлов после плановых и аварийных остановок осуществляется мазутом.

Для уменьшения расхода мазута при растопке котлов используется технология плазменного розжига. На котлах 5,6 установлены плазмотроны типа ЭДП-212.

Установки плазменного безмазутного розжига котлов разработаны Отраслевым центром плазменно-энергетических технологий РАО «ЕЭС России» г. Гусиноозерск.

Также в котлотурбинном цеху осуществляется обезвреживание отходов термическим методом. Данным методом обезвреживаются следующие отходы:

- отходы минеральных масел трансформаторных, не содержащих галогены;
- отходы минеральных масел индустриальных;
- шлам очистки емкостей и трубопроводов от нефти и нефтепродуктов;
- отходы минеральных масел компрессорных;
- отходы минеральных масел моторных;
- отходы минеральных масел трансмиссионных;
- песок, загрязненный нефтью или нефтепродуктами (содержание нефти или нефтепродуктов 15% и более);
- песок, загрязненный нефтью или нефтепродуктами (содержание нефти или нефтепродуктов менее 15%).

В процессе работы котлотурбинного цеха в атмосферный воздух выбрасываются такие вещества как азота диоксид, азот (II) оксид, углерод (сажа), сера диоксид, углерод оксид, бенз/а/пирен, мазутная зола электростанций, пыль неорганическая, содержащая 70-20% двуокиси кремния (зола угольная).

Отвод дымовых газов от котлоагрегатов осуществляется двумя дымовыми трубами. Труба I очереди имеет высоту 190 м и диаметр устья 9 м, труба II очереди – высоту 300 м и диаметр устья 12 м.

На основной площадке Гусиноозерской ГРЭС установлены различные газоочистные установки в общем количестве 12 шт с различной степенью очистки на источниках выбросов (от 93,3% до 99,2%).

Пылегозоочистное оборудование улавливает такие вещества как: углерод (сажа), пыль неорганическая: 70-20% SiO_2, пыль неорганическая: до 20% SiO_2, мазутная зола теплоэлектростанций.

В соответствии с Федеральным законом «Об охране окружающей среды 10.01.2002 N 7-ФЗ» [3] и методическим пособием по расчету, нормированию и контролю выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух (Дополненное и переработанное), Санкт-Петербург. 2012 г. [4], была проведена инвентаризация источников выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух.

Количество источников загрязнения атмосферы (ИЗАВ) на основной площадке хозяйствующего субъекта Гусиноозерской ГРЭС – 70 (39 неорганизованных и 31 организованный), выбрасывающих 34 загрязняющих вещества (ЗВ).

Основными загрязняющими веществами по валовому выбросу являются: сера диоксид (ангидрид сернистый) (52,26%); пыль неорганическая: 70-20% SiO_2 (17,21%); азота диоксид (азот (IV) оксид) (16,24%); углерод оксид (10,5%). Суммарный валовый выброс по всем загрязняющим веществам составляет 79288,090279 т/год.

В результате функционирования хозяйствующего субъекта в атмосферный воздух выделяются загрязняющие вещества, представленные в таблице 2 согласно перечню и кодам веществ, загрязняющих атмосферный воздух [5].

Для детального рассмотрения воздействия выбросов от основной площадки Гусиноозерской ГРЭС был проведен расчет рассеивания загрязняющих веществ с учетом фоновых концентрации, а также других предприятий вносящих вклад в загрязнение атмосферного воздуха г. Гусиноозерска.

Расчет рассеивания выполнен на ЭВМ с применением программы УПРЗА "Эколог" 4.50.3, разработанной фирмой "Интеграл" г. Санкт-Петербург в соответствии с Приказом Минприроды России от 06 июня 2017 г. №273 "Об утверждении методов расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе" [6].

Основным направлением применения ЭВМ при нормировании выбросов является расчет

суммарного загрязнения атмосферы от всех источников всеми веществами с суммирующим вредным действием и с учетом фонового загрязнения.

***Таблица 2**. Загрязняющие вещества, выделяющиеся в атмосферный воздух в результате функционирования хозяйствующего субъекта*

Загрязняющее вещество		Используемый критерий	Значение критерия мг/м^3	Класс опасности	Суммарный выброс вещества	
код	наименование				г/с	т/год
0123	диЖелезо триоксид (Железа оксид) (в пересчете на железо)	ПДК с/с	0,040	3	0,1185674	0,114380
0143	Марганец и его соединения	ПДК м/р	0,010	2	0,0027926	0,005851
0150	Натрий гидроксид	ОБУВ	0,010		0,0031253	0,063787
0164	Никель оксид (в пересчете на никель)	ПДК с/с	0,001	2	0,0000076	0,000042
0203	Хром	ПДК с/с	0,002	1	0,0011334	0,002426
0301	Азота диоксид (Азот (IV) оксид)	ПДК м/р	0,200	3	512,27574	12880,209
0302	Азотная кислота (по молекуле HNO3)	ПДК м/р	0,400	2	0,0015170	0,002790
0303	Аммиак	ПДК м/р	0,200	4	0,0005920	0,002664
0304	Азот (II) оксид (Азота оксид)	ПДК м/р	0,400	3	83,2448268	2093,03427
0316	Соляная кислота	ПДК м/р	0,200	2	0,0004320	0,000908
0322	Серная кислота (по молекуле H2SO4)	ПДК м/р	0,300	2	0,0064027	0,116510
0328	Углерод (Сажа)	ПДК м/р	0,150	3	40,6774733	871,951375
0330	Сера диоксид (Ангидрид сернистый)	ПДК м/р	0,500	3	1606,65674	41434,1012
0333	Дигидросульфид (Сероводород)	ПДК м/р	0,008	2	0,0007308	0,000158
0337	Углерод оксид	ПДК м/р	5,000	4	398,219455	8322,71811
0342	Фториды газообразные	ПДК м/р	0,020	2	0,0069015	0,016006
0344	Фториды плохо растворимые	ПДК м/р	0,200	2	0,0028427	0,004927
0703	Бенз/а/пирен (3,4-Бензпирен)	ПДК с/с	1,00e-06	1	0,0009008	22,771247
1061	Этанол (Спирт этиловый)	ПДК м/р	5,000	4	0,0190940	0,015201
1317	Ацетальдегид	ПДК м/р	0,010	3	0,0003840	0,000097
1325	Формальдегид	ПДК м/р	0,050	2	0,0073333	0,000015
1401	Пропан-2-он (Ацетон)	ПДК м/р	0,350	4	0,0022780	0,005422
1555	Этановая кислота (Уксусная кислота)	ПДК м/р	0,200	3	0,0003840	0,000097
2704	Бензин (в пересчете на углерод)	ПДК м/р	5,000	4	0,0109246	0,008580
2732	Керосин	ОБУВ	1,200		9,8766005	14,752435
2735	Масло минеральное нефтяное	ОБУВ	0,050		0,0355210	0,042288
2754	Углеводороды предельные С12-С19	ПДК м/р	1,000	4	0,1522678	0,032543
2904	Мазутная зола теплоэлектростанций	ПДК с/с	0,002	2	0,0390609	0,041134
2908	Пыль неорганическая: 70-20% SiO2	ПДК м/р	0,300	3	640,768534	13642,1570
2909	Пыль неорганическая: до 20% SiO2	ПДК м/р	0,500	3	1,4027991	5,874728
2930	Пыль абразивная (Корунд белый, Монокорунд)	ОБУВ	0,040		0,0349200	0,011614
2952	Пыль текстолита	ОБУВ	0,040		0,0190000	0,032832
3721	Мучная пыль	ПДК м/р	1,000	4	0,0004128	0,000105
Всего веществ : 33					3293,58971	79288,0902
в том числе твердых : 14					683,071570	14543,0315
жидких/газообразных : 19					2610,51814	64745,0587
	Группы веществ, обладающих эффектом комбинированного вредного действия:					
6204	(2) 301 330					

Исходными данными для расчета загрязнения атмосферы послужили:

- материалы инвентаризации выбросов вредных веществ в атмосферу;
- климатологическая характеристика местности;
- параметры выбросов и ситуационная карта-схема расположения источников выбросов хозяйствующих субъектов осуществляющих деятельность в районе расположения площадки.

Фоновые концентрации загрязняющих веществ в атмосферном воздухе приняты согласно данным, представленным в справке Бурятского ЦГМС филиала ФГБУ Забайкальское: диоксид серы - 0,022 мг/м^3; диоксид азота - 0,070 мг/м^3.

Согласно [4] «при отсутствии официальных данных по фоновым концентрациям загрязняющих веществ, представляемых Росгидрометом на основе наблюдений на сети мониторинга загрязнения атмосферного воздуха или Росприроднадзором на основе сводных расчетов загрязнения атмосферы выбросами промышленностями и автотранспорта, учет фона при проведении расчетов загрязнения атмосферы и нормировании выбросов не выполняется.

Исключение составляют хозяйствующие субъекты, расположенные в городах (населенных пунктах) с численностью населения до 100 тыс. человек. В этих случаях используются значения фоновых концентраций ряда ЗВ, приведенные в документе «Временные рекомендации. Фоновые концентрации для городов и поселков, где отсутствуют наблюдения за загрязнением атмосферы», который разрабатывает ГКО им. А.И. Воейкова и утверждает Росгидромет».

Официальные данные по фоновым концентрациям следующих веществ отсутствуют в районе размещения хозяйствующего субъекта:

Поскольку в г. Гусиноозерске органами Росгидромета не ведутся регулярные наблюдения за фоновым содержанием углерода (сажа), пыли неорганической, содержащей 70-20 % двуокиси кремния, пыли неорганической, содержащей до 20% двуокиси кремния, пыли абразивной, пыли текстолита, то в качестве фоновых концентрации приняты выбросы загрязняющих веществ предприятиями находящимися в зоне влияния выбросов основной площадки.

В зоне влияния выбросов основной площадки находится следующие предприятия: площадка №2 – Золоотвалы (1 и 2 очереди), площадка №6 – автотранспортный цех, Филиала «Гусиноозерская ГРЭС» АО «Интер РАО - Электрогенерация», ООО «Гусиноозерское литье», ИП «Калашников», ООО «Лотос».

В совместном расчете рассеивания учтены выбросы от данных предприятий. Сведения о выбросах приняты согласно письму Забайкальского межрегионального управления Росприроднадзора от 10.03.2020 № 07-28/2913 о выдаче расчетных фоновых концентрации загрязняющих веществ.

Для каждого источника определены опасная скорость ветра, максимальная концентрация выброса в долях ПДК и расстояние, на котором достигается максимальная концентрация.

Согласно анализа расчетов рассеивания на границе жилой застройки и нормируемых территорий ни по одному веществу не наблюдается превышение ПДК. Разработка мероприятий по снижению выбросов хозяйствующего субъекта не требуется.

В соответствии с п. 9.1.1. Приказа Минприроды России от 28.02.2018 №74 «Об утверждении требований к содержанию программы производственного экологического контроля, порядка и сроков представления отчета об организации и о результатах осуществления производственного экологического контроля», существующие выбросы должны контролироваться.

Контролю подлежат вещества, включенные в Перечень загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды, утвержденный Распоряжением Правительства Российской Федерации от 08 июля 2015 года №1316-р. Необходимый контроль следует вести согласно план-графику контроля нормативов ПДВ на источниках выброса.

Согласно п. 9.1.2 Приказа Минприроды №74 расчетные методы контроля используются для определения показателей загрязняющих веществ в выбросах стационарных источников в случае, если выбросы формируют приземные концентрации загрязняющих веществ или групп суммации в атмосферном воздухе на границе территории объекта менее 0,1 ПДК.

Согласно п. 3.3.2. [7]: Контроль выбросов следует проводить по той методике, согласно которой эти выбросы были определены, а при использовании расчетных методов контролируются основные параметры, входящие в расчетные формулы.

Контроль за соблюдением нормативов ПДВ осуществляется либо по договору со сторонней организацией, имеющей лицензию на проведение подобных работ, либо на предприятии организуется подразделение по контролю с необхо-

димым штатом и инструментальным обеспечением с соответствии с нормативными документами.

Заключение

В результате проведенных изысканий по оценке качества атмосферного воздуха района размещения площадки, было определено, что на границе жилой застройки и нормируемых территорий ни по одному веществу не наблюдается превышение ПДК.

В основу системы контроля должно быть положено определение величин выбросов вредных веществ в атмосферу от источников и сопоставление их с установленными для них величинами ПДВ, в целях недопущения превышения установленных нормативов и соблюдения качества атмосферного воздуха.

Список литературы

1. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2018 году». М.: Минприроды России; НПП «Кадастр», 2019. - 844 с;
2. Проект ПДВ Площадки №1 Акционерного общества «Интер РАО – Электрогенерация» // ООО «Биосфера», 2020. – 446 с.
3. Об охране окружающей среды : Федер. закон № 7 [принят Гос. Думой 20.12..2001 (ред. от 27.12.2019)] // 2020. – 147 с.
4. Методическое пособие по расчету, нормированию и контролю выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух : (доп. и перераб.). - СПб.: ОАО «НИИ Атмосфера», 2012. - 224 с.
5. Перечень и коды веществ, загрязняющих атмосферный воздух / НИИ «Атмосфера». Изд. 8-ое перебаб. и доп. – СПб.: «Интеграл», 2010. – 491 с.
6. Об утверждении методов расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе. Приказ М-ва природных ресурсов и экологии РФ от 06 июня 2017 г. № 273. Зарегистрирован в Минюсте РФ 10 августа 2017 г. № 47734.
7. Об утверждении требований к содержанию программы производственного экологического контроля, порядка и сроков представления отчета об организации и о результатах осуществления производственного экологического контроля: приказ М-ва природных ресурсов и экологии РФ от 28 февраля 2018 г. № 74. Зарегистрирован в Минюсте РФ 3 апреля 2018 г., № 50598.

References

1. Gosudarstvennyiy doklad «O sostoyanii i ob ohrane okruzhayuschey sredyi Rossiyskoy Federatsii v 2018 godu» [State report “On the State and Environmental Protection of the Russian Federation in 2018” [accepted by the Minprirodyi Rossii], NPP «Kadastr», Moscow, 2019, 844 p.
2. Proekt PDV Ploschadki No. 1 Aktsionernogo obschestva «Inter RAO – Elektrogeneratsiya» [Project MPE of the Site No. 1 of the Joint Stock Company «Inter RAO – Elektrogeneratsiya»] // «Biosfera» Ltd, 2020, 446 p.
3. Ob ohrane okruzhayuschey sredyi : Feder. zakon No. 7 [prinyat Gos. Dumoy 20.12..2001 (red. ot 27.12.2019)] [On Environmental Protection: Feder. Law No. 7 [accepted by the State Duma 12/12/2001]], 2020, 147 p.
4. Metodicheskoe posobie po raschetu, normiro-vaniyu i kontrolyu vyibrosov zagryaznyayuschih veschestv v atmosfernyiy vozduh : (dop. i pererab.). [Methodological manual for calculation, regulation and control of emissions of pollutants into the air], SPb.: OOH «NII Atmosfera», 2012, 224 p.
5. Perechen i kodyi veschestv, zagryaznyayuschih atmosfernyiy vozduh / NII «Atmosfera». Izd. 8-oe perebab. i dop. [List and codes of substances polluting atmospheric air], SPb.: «Integral», 2010, 491 p.
6. Ob utverzhdenii metodov raschetov rasseiva-niya vyibrosov vrednyih (zagryaznyayuschih) veschestv v atmosfernom vozduhe [On approval of calculation methods for dispersion of emissions of harmful (polluting) substances in the air], in Prikaz M-va prirodnyih resusov i ekologii RF ot 06 iyunya 2017 g. No. 273. Zaregistrirovan v Minyuste RF 10 avgusta 2017 g. No. 47734.
7. Ob utverzhdenii trebovaniy k soderzhaniyu programmyi proizvodstvennogo ekologicheskogo kontrolya, poryadka i srokov predstavleniya otcheta ob organizatsii i o rezultatah osuschestvleniya proizvodstvennogo ekologicheskogo kontrolya [On approval of the requirements for the content of the production environmental control program, the procedure and deadlines for submitting a report on the organization and on the results of industrial environmental control], in Prikaz M-va prirodnyih resursov i ekologii RF ot 28 fevralya 2018 g. No. 74. Zaregistrirovan v Minyuste RF 3 aprelya 2018 g., No. 50598

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ В ЖУРНАЛЕ «ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ТЕХНОЛОГИИ»

Журнал входит в национальную библиографическую базу данных РИНЦ.

В журнале публикуются результаты исследований по следующим направлениям:

- тепловые и ядерные энергетические установки;
- электротехнические комплексы и сети;
- нетрадиционные и возобновляемые источники энергии;
- 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.

Принимаются статьи на русском и английском языках.

Статья должна быть структурирована и содержать:

– постановку проблемы, ее связь с актуальными научными или практическими заданиями;
– анализ последних исследований и публикаций, в которых начато решение данной проблемы;
– выделение нерешенных ранее частей общей проблемы, которой посвящается данная статья;
– формулирование целей статьи (постановка задачи);
– изложение основного материала с полным обоснованием полученных научных результатов;
– выводы по данному исследованию и перспективы дальнейших поисков в данном направлении.

К статье должно прилагаться:

– два экземпляра рукописи статьи, выполненной в соответствии с требованиями, первый экземпляр, подписанный всеми авторами;
– оригинал экспертного заключения о возможности опубликования данной работы в открытой печати;
– рецензия, подписанная доктором наук или кандидатом наук;
– информация об авторах статьи (заголовок статьи, фамилия, имя и отчество (полностью), должность, ученая степень, полный почтовый адрес, контактные телефоны и адреса электронной почты);
– компакт-диск с текстовым файлом.

ОФОРМЛЕНИЕ СТАТЬИ

При подготовке статьи в журнал авторы должны руководствоваться стандартом «Оригиналы авторские и текстовые издательские» (ОСТ 29.115—88). К авторским оригиналам, передаваемым для издания, предъявляются следующие требования.

Статья должна содержать:

– шифр УДК; название статьи; инициалы и фамилии авторов;
– место работы каждого автора с полным почтовым адресом;
– аннотацию на русском языке (4-5 строк), отображающую цель проведенных исследований и основные результаты;
– ключевые слова;
– индекс UDC (УДК для англ. блока);
– заглавие (на английском языке);
– фамилии и инициалы авторов (на английском языке);

– место работы каждого автора с полным почтовым адресом (на английском);
– аннотация на английском языке с заголовком «Abstract»;
– ключевые слова (на английском языке, соответствующие русскоязычному набору);
– статья на языке оригинала;
– список литературных источников на русском языке (6-20 ссылок);
– список литературных источников на латинице: тот же список, что и в статье, но с транслитерацией фамилий и слов, записанных по-русски, и с переводом на английский язык неанглоязычных названий источников).

ОПИСАНИЕ МАКЕТА СТАТЬИ

Статья должна представляться также в электронном виде файлом, подготовленном в текстовом процессоре MS Word в режиме разметки страницы. Файл следует сохранять с расширением *. doc(или *.rtf) без макросов.

Имя файла должно начинаться фамилией контактирующего автора на латинице. Основной текст набирается шрифтом «Times New Roman» (11 пт) через интервал с автоматической расстановкой переносов в две колонки с расстоянием между ними 10 мм.

Ширины верхнего поля – 27 мм, нижнего – 23 мм, левого и правого – 18 мм, первый ряд — отступ 0,75 см.

Название статьи – шрифт 16 пт, ФИО – шрифт 14 пт. Сведения об авторах, аннотация, ключевые слова, список литературы – шрифт 10 пт.

Рисунки выполняются в графических редакторах и (или) процессорах (Paint, PhotoShop, CorelDraw и т.п.) в с разрешением 300dip.

Шаблон статьи и требования по ее оформлению приведены на сайте СевГУ: https://www.sevsu.ru/.

Статьи, не удовлетворяющие шаблону и требованиям к оформлению, рассматриваться не будут.

Более детальную информацию можно получить в редакции журнала:

ИЯЭиП, ул. Курчатова, 7. Севастополь, 299015, Российская Федерация. E-mail nauchnyyzhurnal@mail.ru, телефон. +7(8692) 71-01-64.

ISSN 2413-5526

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
«ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ТЕХНОЛОГИИ»
Том 6 № 2

SCIENTIFIC MAGAZINE
«POWER PLANTS AND TECHNOLOGIES»
Vol. 6 No 2

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 22.06.2020. Изд. № 27/20. Зак. 16/20. Тираж 65 экз.
Объем 18,5 п.л. Усл. печ. л. 17,20. Уч.-изд. л. 18,13. Формат бумаги 60 х 84 1/8

РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»