

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИИ И ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Кафедра «Ядерные энергетические установки»

В.В. Шаповаленко, К.Б. Матузаев

**ОСНОВЫ ТЕОРИИ  
И МЕТОДЫ РАСЧЕТА  
ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕАКТОРОВ  
(СБОРНИК ЗАДАЧ)**

**Учебное пособие**

Севастополь  
СевГУ  
2022

**УДК 621.039.51 (075.8)**

**ББК 31.46я73**

**Ш241**

**Р е ц е н з е н т ы :**

**О. Ю. Кочнов** – д-р техн. наук, профессор  
кафедры «Ядерные энергетические установки»

**А.А. Скидан** – канд. техн. наук, доцент,  
заведующий кафедрой «Система управления и контроля АЭС»

**Шаповаленко В.В.**

**Ш241** Основы теории и методы расчета ядерных энергетических реакторов (сборник задач): учебное пособие / В.В. Шаповаленко, К.Б. Матузаев ; Севастопольский государственный университет, Институт ядерной энергии и промышленности, кафедра «Ядерные энергетические установки». – Севастополь: СевГУ, 2022. – 104 с.: ил. – Текст : электронный.

Предназначено для студентов очного отделения для решения задач на практических занятиях, а также освоения методики теплового расчета для реакторов с водным и жидкометаллическим охлаждением по дисциплине «Теплогидравлический расчет ядерных реакторов».

УДК 621.039.51 (075.8)

ББК 31.46я73

Рассмотрено и рекомендовано на заседании кафедры «Ядерные энергетические установки», протокол № 7 от 28 февраля 2022 г.

Изд. № 128/2022. Объем 6,5 п.л. Усл. печ. л. 6,04. Уч.-изд. л. 6,37.  
РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»

© ФГАОУ ВО «Севастопольский  
государственный университет», 2022

## СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Расчет остаточных тепловыделений                                                                                       | 5  |
| 1.1 Методика расчета остаточных тепловыделений                                                                            | 5  |
| 1.2 Перечень задач с примерами их решения                                                                                 | 7  |
| 2. Расчет коэффициента теплоотдачи при однофазном теплообмене и при кипении теплоносителя                                 | 13 |
| 2.1 Термодинамические свойства воды и водяного пара                                                                       | 13 |
| 2.2 Основные формулы для расчета коэффициента теплоотдачи                                                                 | 15 |
| 2.2.1 Коэффициент теплоотдачи при охлаждении твэла однофазным водным потоком (поверхностное и кипение в объеме)           | 15 |
| 2.2.2 Коэффициент теплоотдачи при охлаждении твэла кипящим водным потоком                                                 | 17 |
| 2.2.3 Коэффициент теплоотдачи при охлаждении твэла газовым теплоносителем                                                 | 19 |
| 2.2.4 Коэффициент теплоотдачи при охлаждении однофазным жидкометаллическим потоком                                        | 20 |
| 2.3 Перечень задач с примерами их решения                                                                                 | 22 |
| 3. Расчет температуры теплоносителя в активной зоне реактора                                                              | 28 |
| 3.1 Расчет температуры теплоносителя по радиусу активной зоны                                                             | 28 |
| 3.2 Расчет температуры теплоносителя по высоте активной зоны                                                              | 28 |
| 3.3 Расчет температуры теплоносителя на входе и выходе из активной зоны реактора                                          | 29 |
| 3.4 Перечень задач с примерами их решения                                                                                 | 30 |
| 4. Расчет тепловыделений в активной зоне                                                                                  | 33 |
| 4.1 Основные формулы для расчета тепловыделений                                                                           | 33 |
| 4.2 Перечень задач с примерами их решения                                                                                 | 35 |
| 5. Расчет температуры в элементах конструкции твэла                                                                       | 39 |
| 5.1 Определение температуры по радиусу оболочки твэла                                                                     | 39 |
| 5.2 Определение температуры в газовом зазоре по радиусу твэла                                                             | 39 |
| 5.3 Определение температуры по радиусу топливной таблетки                                                                 | 40 |
| 5.4 Последовательность расчета температур в элементах конструкции твэла по его высоте                                     | 40 |
| 5.4.1 Определение линейной тепловой нагрузки по высоте твэла                                                              | 40 |
| 5.4.2 Определение температуры теплоносителя в ТВС по высоте                                                               | 41 |
| 5.4.3 Определение температуры в топливной таблетке, газовом зазоре, оболочке по высоте твэла                              | 41 |
| 5.4.4 Определение координаты с максимальной температурой в ядерном топливе и на поверхности твэла по высоте активной зоны | 43 |
| 5.5 Материалы, применяемые в конструкции тепловыделяющего элемента                                                        | 44 |
| 5.5.1 Свойства аустенитных нержавеющей сталей                                                                             | 44 |

|                                                                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.5.2 Свойства циркониевых сплавов                                                                                   | 45 |
| 5.5.3 Материалы, используемые в газовом зазоре твэла                                                                 | 46 |
| 5.5.4 Теплофизические характеристики ядерного топлива                                                                | 47 |
| 5.6 Характеристики ядерных реакторов и ТВС                                                                           | 48 |
| 5.7 Перечень задач с примерами их решения                                                                            | 50 |
| 6. Оценка теплотехнической надежности активной зоны                                                                  | 58 |
| 6.1 Методика расчета критической тепловой нагрузки и коэффициента запаса до кризиса теплоотдачи                      | 58 |
| 6.2 Перечень задач с примерами их решения                                                                            | 60 |
| 7. Расчет гидравлических потерь давления при движении однофазного и двухфазного потоков                              | 63 |
| 7.1 Методика расчета гидравлических сопротивлений в контуре                                                          | 63 |
| 7.2 Гидравлические потери при движении однофазного потока                                                            | 63 |
| 7.3 Гидравлические потери в канале при движении двухфазного потока                                                   | 65 |
| 7.4 Перечень задач с примерами их решения                                                                            | 72 |
| Литература                                                                                                           | 77 |
| Приложение А. Тепловой расчет водо-водяного реактора под давлением (ВВЭР)                                            | 79 |
| Приложение Б. Тепловой расчет реактора, работающего на быстром спектре нейтронов с жидкометаллическим теплоносителем | 88 |
| Приложение В. Тепловой расчет реактора РБМК-1000                                                                     | 97 |

## 1 Расчет остаточных тепловыделений

### 1.1 Методика расчета остаточных тепловыделений

Мощность остаточных тепловыделений  $Q_{\beta\gamma}$  складывается из мощности запаздывающих источников энергии:  $\beta$ -частиц и  $\gamma$ -квантов, испускаемых осколками деления, что составляет около 7 % генерируемой мощности реактора.

Величина мощности остаточных тепловыделений зависит от мощности реактора перед его остановом, времени его работы на этой мощности, времени расхолаживания. Спад по времени остаточных тепловыделений зависит от качественного и количественного состава накопившихся продуктов деления и их времени жизни.

Таким образом, спад тепловыделения, обусловленный осколочной активностью, в любой момент времени после останова реактора определяется выражением

$$E(t) = \sum_{i=1}^n E_i \cdot N_i(t) \exp(-\lambda_i t), \quad (1.1)$$

где  $E_i$  – энергия распада соответствующего вида, Дж;  $N_i$  – ядерная концентрация  $i$ -го  $\beta$ - или  $\gamma$ -активного продукта деления в момент  $t$  после останова ядерного реактора.

Мощность остаточных тепловыделений рассчитывается по формуле

$$Q_{\beta\gamma} \approx 4.26 \cdot 10^{-13} \sum_{f5} \Phi_{\tau} \varepsilon V_{\tau} \int_{t_{cm}}^{t_{cm}+t_p} t^{-1.2} dt \approx 2.13 \cdot 10^{-12} \sum_{f5} \Phi_{\tau} \varepsilon V_{\tau} [t_{cm}^{-0.2} - (t_{cm} + t_p)^{-0.2}], \quad (1.2)$$

$Q_p = \sum_{f5} \Phi_{\tau} \varepsilon V_{\tau} E_f$  – тепловая мощность ядерного реактора, МВт;  $E_f = 3.2 \cdot 10^{-11}$  – энергия деления, Дж;  $t_{cm}$  – время расхолаживания;  $t_p$  – время работы реактора, измеряется в секундах.

Чаще в расчетах используется не абсолютная, а относительная мощность остаточных тепловыделений  $Q_{\beta\gamma} / Q_p$ , которая может быть определена через формулу

$$Q_{\beta\gamma} / Q_p = 0.1 \left\{ (t_{ct} + 10)^{-0.2} - (t_{ct} + t_p + 10)^{-0.2} \right\} - 0.87 \left\{ (t_{ct} + 2 \cdot 10^7)^{-0.2} - (t_{ct} + t_p + 2 \cdot 10^7)^{-0.2} \right\} \quad (1.3)$$

где  $t_{cm}$  – время расхолаживания;  $t_p$  – время работы реактора, измеряется в секундах, а мощность остаточных тепловыделений  $Q_{\beta\gamma}$ , тепловая мощность реактора  $Q_p$  измеряется в Вт.

В упрощенном виде относительная мощность остаточных тепловыделений рассчитывается по формуле

$$Q_{\beta\gamma} / Q_p \approx 0.066 [t_{cm}^{-0.2} - (t_{cm} + t_p)^{-0.2}]. \quad (1.4)$$

Графическая иллюстрация этой зависимости показана на рисунке 1.1.

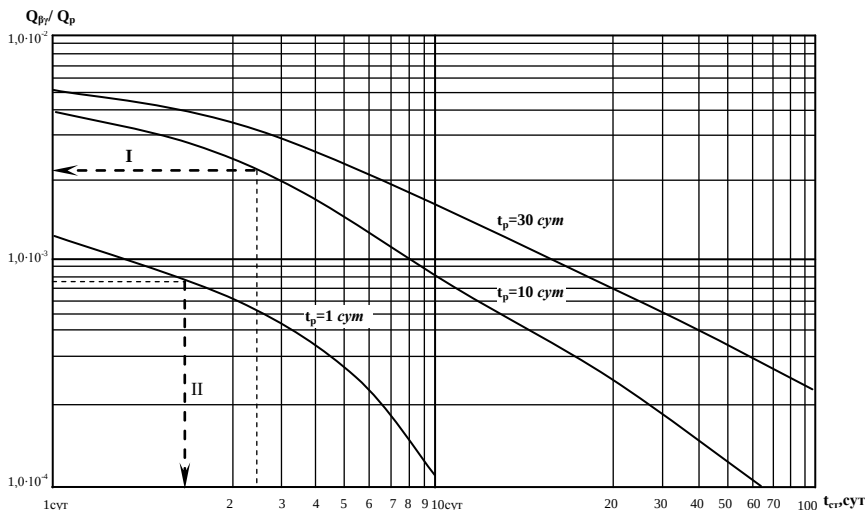


Рис. 1.1 - Номограмма для расчетной оценки мощности остаточных тепловыделений

С помощью номограммы можно решать задачи двух типов.

**Первый тип:** по времени стоянки реактора  $t_{ст}$  и времени работы реактора до останова  $t_p$  с номограммы снимается значение относительной мощности остаточного тепловыделения  $Q_{\beta\gamma}/Q_p$  в нужный момент времени  $t_{ст}$  после останова. Затем после умножения относительной мощности остаточного тепловыделения  $Q_{\beta\gamma}/Q_p$  на мощность реактора  $Q_p$ , с которой он работал до останова, получают абсолютную величину мощности  $Q_{\beta\gamma}(t_{ст})$ .

**Второй тип:** по известной мощности работы реактора  $Q_p$  и мощности остаточных тепловыделений  $Q_{\beta\gamma}$ , находится отношение  $Q_{\beta\gamma}/Q_p$ , по величине которого и времени работы реактора  $t_p$  находится время стоянки  $t_{ст}$ , в течение которого мощность остаточных тепловыделений спадает до уровня  $Q_{\beta\gamma}$ .

Если реактор до останова работал на разных уровнях мощности, расчет остаточных тепловыделений может выполняться двумя способами.

**Первый способ** (грубая оценка) заключается в том, что время стоянки реактора считается равным  $t_{ст}$  (хотя распад накопленных после каждого режима радиоактивных осколков деления частично происходит и во время работы реактора), а мощность реактора берется усредненной по энерговыработке во всех режимах работы реактора до останова:

$$\bar{Q}_p = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{pi} \cdot t_{pi}}{\sum_{i=1}^n t_{pi}} \text{ МВт}, \quad (1.5)$$

где  $i = 1, 2, \dots, n$  – номера режимов работы на постоянных мощностях.

Далее по значениям  $t_p = \sum_{i=1}^n t_{pi}$  и заданного  $t_{ct}$  по номограмме (рис.1.1) определяют величину относительной мощности остаточного тепловыделения, а по ней – абсолютную величину мощности остаточного тепловыделения в рассматриваемый момент стоянки реактора по формуле

$$Q_{\beta\lambda} = \left( \frac{Q_{\beta\lambda}}{Q_p} \right) \cdot \overline{Q_p}, \text{ MBm.} \quad (1.6)$$

**Второй способ** (более точная оценка) заключается в том, что мощность остаточного тепловыделения является суммой величин мощностей остаточных тепловыделений после каждого режима работы реактора, то есть

$$Q_{\beta\lambda_i} = \sum_{i=1}^n Q_{\beta\lambda_i}, \quad (1.7)$$

где  $Q_{\beta\lambda_i}$  - мощность остаточного тепловыделения после i-го режима работы.

Мощность остаточного тепловыделения после каждого (i-го) режима работы реактора определяется с помощью номограммы по фактическому времени работы  $t_{pi}$  на фактической мощности  $Q_{pi}$ , а «временем стоянки»  $t_{pi}^*$  считается время фактической стоянки реактора плюс время его работы во всех режимах после i-го режима, то есть

$$t_{cm i}^* = t_{cm} + \sum_{i=1}^n t_{pi}, \quad (1.8)$$

т.к. это время для предыдущего режима при определении остаточных тепловыделений - есть время, когда происходит распад накопленных осколков деления при работе на мощности в i-м режиме работы ЯР. Далее определяется мощность остаточных тепловыделений от работы ЯР на i-м режиме:

$$Q_{\beta\lambda_i} = Q_{pi} \cdot \left( \frac{Q_{\beta\lambda}}{Q_p} \right)_i. \quad (1.9)$$

## 1.2 Перечень задач с примерами их решения

### Задача № 1

Реактор ВВЭР-1000 работал на мощности 60 % от номинальной в течение 10-ти суток, а затем на мощности 100 % еще одни сутки. Определить мощность остаточных тепловыделений через 6 суток после останова реактора приближенным способом.

**Дано:**

ВВЭР-1000

$$Q_n = 3000 \text{ МВт}$$

$$Q_{p1} = 0,6 \cdot Q_n = 0,6 \cdot 3000 = 1800 \text{ МВт}$$

$$Q_{p2} = Q_n = 3000 \text{ МВт}$$

$$t_{p1} = 10 \text{ суток}$$

$$t_{p2} = 1 \text{ суток}$$

$$t_{\text{ст}} = 6 \text{ суток}$$

**Определить  $Q_{\beta\gamma}$  ?****Решение****Приближенный способ определения остаточных тепловыделений**

1. Определяется средняя мощность реактора

$$\overline{Q_p} = \frac{\sum Q_{pi} \cdot t_{pi}}{\sum t_{pi}} = \frac{1800 \cdot 10 + 3000 \cdot 1}{10 + 1} = \frac{21000}{11} = 1910 \text{ МВт.}$$

2. По графику рис.1.1 определяется отношение

$$\frac{Q_{ост}}{Q_p} = (t_p = 11 \text{ сут.}, t_{см} = 6 \text{ сут.}) = 1,35 \cdot 10^{-3}.$$

3. Вычисляется мощность остаточных тепловыделений

$$Q_{ост} = \overline{Q_p} \cdot \frac{Q_{ост}}{Q_p} = 1910 \cdot 1,35 \cdot 10^{-3} = 2,58 \text{ МВт.}$$

**Ответ:** Мощность остаточных тепловыделений составляет  $Q_{\beta\gamma} = 2,58 \text{ МВт}$ .**Задача № 2**

Реактор ВВЭР-1000 работал на мощности 80 % от номинальной в течение 5-ти суток, затем на мощности 50 % еще 10 суток, после чего был остановлен. Определить, через какое время после останова ЯР мощность остаточных тепловыделений составит 1,5 МВт.

**Дано:**

ВВЭР-1000

$$Q_n = 3000 \text{ МВт}$$

$$Q_{p1} = 0,8 \cdot Q_n = 0,8 \cdot 3000 = 2400 \text{ МВт}$$

$$Q_{p2} = 0,5 \cdot Q_n = 0,5 \cdot 3000 = 1500 \text{ МВт}$$

$$Q_{ост} = 1,5 \text{ МВт}$$

$$t_{p1} = 5 \text{ суток}$$

$t_{p2} = 10$  суток

**Определить  $t_{ст.}$ ?**

### Решение

1. Определяется средняя мощность ЯР за весь период работы

$$Q_p = \overline{Q_p} = \frac{\sum Q_{pi} \cdot t_{pi}}{\sum t_{pi}} = \frac{2400 \cdot 5 + 1500 \cdot 10}{5 + 10} = 1800 \text{ МВт.}$$

2. Определяется отношение

$$\frac{Q_{ост}}{Q_p} = \frac{1,5}{1800} = 8,34 \cdot 10^{-4}.$$

3. Определяется по графику номограммы рис. 1.1 время, через которое мощность остаточных тепловыделений уменьшится до величины  $Q_{ост} = 1,5$  МВт.

$$t_{ст} = f\left(\frac{Q_{ост}}{Q_p} = 8,34 \cdot 10^{-4}; t_p = 15 \text{ сут}\right). \text{ Из графика (рис. 1.1) } t_{ст} \approx 14 \text{ сут.}$$

**Ответ:** время расхолаживания  $t_{ст} \approx 14$  суток.

### Задача № 3

Ядерный реактор работал на мощности 100 МВт в течение 10-ти суток. Какой нужно обеспечить расход теплоносителя (воды) через активную зону, чтобы не допустить его кипения через сутки после останова? Давление в первом контуре при расхолаживании равно 1,0 МПа, температура теплоносителя на входе в реактор равна 80 °С.

**Дано:**

ВВЭР

$$Q_n = 100 \text{ МВт}$$

$$P = 1,0 \text{ МПа}$$

$$t_{вх} = 80 \text{ °С.}$$

$$t_p = 10 \text{ суток}$$

$$t_{ст} = 24 \text{ часа}$$

**Определить  $G$  - ?**

### Решение

1. Определим отношение мощности остаточных тепловыделений к мощности реактора из графика номограммы (рис.1.1) при  $t_p = 10$  сут.  $t_{ст} = 1$  сут.

$$\text{при } t_p = 10 \text{ сут } t_{ct} = 1 \text{ сут } \frac{Q_{ост}}{Q_p} = 4,0 \cdot 10^{-3}.$$

2. Определим мощность остаточных тепловыделений

$$Q_{ост} = \left( \frac{Q_{ост}}{Q_p} \right) \cdot Q_p = 4,0 \cdot 10^{-3} \cdot 100000 = 400 \text{ кВт.}$$

3. Определим расход воды через активную зону, чтобы не допустить его кипения через сутки после останова

$$G = \frac{Q_{ост}}{C_p(t_{вых} - t_{ex})} = \frac{400}{4,194(169,88 - 80)} = 1,06 \text{ кг/с}$$

Из таблиц термодинамических свойств воды и пара определяем теплофизические характеристики воды. Для решения данной задачи принимается расположение расходомера на входе в ядерный реактор. Значение удельной изобарной теплоемкости при температуре воды  $t_{вх} = 80^\circ \text{C}$  при давлении  $p = 1 \text{ МПа}$ ,  $C_p(p = 1 \text{ МПа}; t_{вх} = 80^\circ \text{C}) = 4,194 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{K)}$ . Чтобы не допустить кипения, температура на выходе из ядерного реактора должна быть на  $10^\circ \text{C}$  ниже температуры кипения при заданном давлении. Если температура кипения теплоносителя  $t_s(p = 1 \text{ МПа}) = 179,88^\circ \text{C}$ , тогда температура на выходе из ядерного реактора принимается  $169,88^\circ \text{C}$ .

**Ответ:**  $G = 1,06 \text{ кг/с}$ .

#### Задача № 4

Реактор ВВЭР-1000 работал на мощности и остановлен  $Q_1 = 0,5 Q_n \text{ кВт}$ ,  $t_1 = 10 \text{ сут}$ ,  $Q_2 = 0,8 Q_n \text{ кВт}$ ,  $t_2 = 20 \text{ сут}$ ,  $t_{ct} = 7 \text{ сут}$ . Определить приближенным и точным способом остаточные тепловыделения  $Q_{ост.}$ , сравнить и обосновать результаты расчета.

#### Задача № 5

Реактор ВВЭР-1000 работал на мощности и остановлен  $Q_1 = 0,8 Q_n \text{ кВт}$ ,  $t_1 = 30 \text{ сут}$ ,  $Q_2 = 0,7 Q_n \text{ кВт}$ ,  $t_2 = 10 \text{ сут}$ ,  $t_{ct} = 10 \text{ сут}$ . Определить точным методом остаточные тепловыделения  $Q_{ост.}$

#### Задача №6

Реактор ВВЭР-1000 работал на мощности и остановлен  $Q_1 = 0,6 Q_n \text{ кВт}$ ,  $t_1 = 10 \text{ сут.}$ ,  $Q_2 = Q_n \text{ кВт}$ ,  $t_2 = 1 \text{ сут}$ ,  $t_{ct} = 6 \text{ сут}$ . Определить точным методом остаточные тепловыделения  $Q_{ост.}$

#### Задача № 7

Реактор ВВЭР-1000 работал на мощности и остановлен  $Q_1 = 0,7 Q_n \text{ кВт}$ ,  $t_1 = 60 \text{ сут}$ ,  $Q_2 = 0,9 Q_n \text{ кВт}$ ,  $t_2 = 5 \text{ сут}$ ,  $t_{ct} = 10 \text{ сут}$ . Определить приближенным способом остаточные тепловыделения  $Q_{ост.}$ , МВт.

**Задача № 8**

Реактор ВВЭР-1000 работал на мощности 80 % от номинальной в течение 5 суток, затем на мощности 50 % еще 10 суток, после чего был остановлен. Определить через какое время после останова ЯР мощность остаточных тепловыделений составит 2,5 МВт.

**Задача № 9**

Реактор ВВЭР-1000 работал на мощности 80 % от номинальной в течение 10 суток. В конце десятых суток произошла авария ППУ. Определить количество воды, необходимой для залива активной зоны ЯР через 1 час и через 1 сутки после аварии, если температура воды на входе 60 °С, на выходе 250 °С и давление поддерживается на уровне 15 МПа.

**Задача № 10**

Рассчитать мощность остаточных тепловыделений, используя формулу (1.4), если время работы реактора 30 суток, время расхолаживания реактора 2 суток, средняя мощность работы реактора 2100 МВт.

**Задача №11**

Оценить, с какой скоростью будет расти температура внутри твэла, извлеченного из активной зоны через 1 месяц после останова реактора, который до этого работал на средней мощности 60 МВт в течение 2-х месяцев. Количество твэлов в активной зоне – 5000 штук. Каждый твэл содержит 1500 г  $\text{UO}_2$ . Удельная теплоемкость  $\text{UO}_2$  составляет  $c_p = 0,56$  ккал/(кг·°С).

**Задача №12**

Средняя мощность ядерного реактора за 30 сут работы равна 80 МВт. Через какое время после останова ЯР можно осуществить расхолаживание активной зоны расходом воды 2м<sup>3</sup>/ч при температуре на входе 50°С и нормальном давлении в контуре?

**Задача № 13**

ЯР работал на мощности 70 МВт в течение 5-ти суток. Через 2 суток после останова при температуре теплоносителя (воды) в реакторе 50 °С остановили циркуляционный насос первого контура. Давление снизили до атмосферного. Оценить, через какое время нужно снова пустить насос, чтобы не допустить объемного кипения теплоносителя, если объем воды в реакторе 1 м<sup>3</sup>.

**Задача № 14**

После перегрузки топливных сборок LWR и их удаления из реактора они были установлены в бассейн охлаждения. В бассейне размещено 25 т топлива, ширина бассейна 10 м, длина 20 м, глубина воды в нем составляет 10 м. После 1 месяца выдержки происходит прекращение нормальной подачи воды в бассейн (мощность тепловыделения из 1 т топлива после 1 месяца выдержки составляет

70 кВт). Через какое время уровень воды понизится на 0,5 м из-за выпаривания? Предположите, что температура воды в момент прекращения подачи составляет 25 °С, а объем топливных элементов пренебрежимо мал по сравнению с объемом воды в бассейне. Предположите, что удельная теплоемкость воды составляет 4,19 кДж/(кг·К), плотность 1000 кг/м<sup>3</sup>, а скрытая теплота парообразования 2,25 МДж/кг. Потерями тепла в бассейне пренебречь.

### Задача № 15

Реактор с тепловой мощностью 4 ГВт выведен из эксплуатации. Определить мощность остаточного тепловыделения через 1000 часов и через 1 год после останова реактора, если до этого он работал в течение 1 года. Остановленный реактор охлаждается водой из системы снятия остаточного тепловыделения, имеющей температуру 20 °С. Рассчитать расход воды в системе снятия остаточного тепловыделения, достаточной для того, чтобы температура воды не превышала 40 °С в состоянии реактора через 1000 часов и через 1 год после его останова. Определить скорость прокачки воды через активную зону в этих случаях, если ее проходное сечение по теплоносителю составляет 0,5 м<sup>2</sup>. Принять удельную теплоемкость воды равной 4,19 кДж/(кг·К).

## 2 Расчет коэффициента теплоотдачи при однофазном теплообмене и при кипении теплоносителя

### 2.1 Термодинамические свойства воды и водяного пара [2]

Термодинамические свойства воды указаны в таблице 2.1 обычным шрифтом, для водяного пара выделены.

Таблица 2.1 - Термодинамические свойства воды и водяного пара

| $t$<br>°C | Параметры воды и пара при давлении   |               |               |                                      |               |               |                                      |               |               |
|-----------|--------------------------------------|---------------|---------------|--------------------------------------|---------------|---------------|--------------------------------------|---------------|---------------|
|           | <b>8 МПа</b>                         |               |               | <b>9 МПа</b>                         |               |               | <b>10 МПа</b>                        |               |               |
|           | $t_s = 294.98$                       |               |               | $t_s = 303.35$                       |               |               | $t_s = 310.96$                       |               |               |
|           | $v' = 0.0013843 \quad v'' = 0.02349$ |               |               | $v' = 0.0014179 \quad v'' = 0.02016$ |               |               | $v' = 0.0014526 \quad v'' = 0.01800$ |               |               |
|           | $i' = 1317.5 \quad i'' = 2757.5$     |               |               | $i' = 1364.2 \quad i'' = 2741.8$     |               |               | $i' = 1408.6 \quad i'' = 2724.4$     |               |               |
|           | $r = 1440.0$                         |               |               | $r = 1377.6$                         |               |               | $r = 1315.8$                         |               |               |
|           | v                                    | i             | s             | v                                    | i             | s             | v                                    | i             | s             |
| 250       | 0.0012440                            | 1085.8        | 2.7840        | 0.0012423                            | 1085.9        | 2.7817        | 0.0012406                            | 1085.9        | 2.7794        |
| 260       | 0.0012687                            | 1134.6        | 2.8762        | 0.0012667                            | 1134.4        | 2.8737        | 0.0012648                            | 1134.3        | 2.8711        |
| 270       | 0.0012964                            | 1184.6        | 2.9691        | 0.0012940                            | 1184.3        | 2.9663        | 0.0012917                            | 1184.0        | 2.9634        |
| 280       | 0.0013277                            | 1236.2        | 3.0633        | 0.0013249                            | 1235.6        | 3.0600        | 0.0013221                            | 1235.2        | 3.0567        |
| 290       | 0.0013639                            | 1289.8        | 3.1594        | 0.0013604                            | 1289.0        | 3.1555        | 0.0013570                            | 1288.2        | 3.1517        |
| 300       | <b>0.02425</b>                       | <b>2785.4</b> | <b>5.7918</b> | 0.0014022                            | 1344.9        | 3.2539        | 0.0013978                            | 1343.7        | 3.2494        |
| 310       | <b>0.02560</b>                       | <b>2834.7</b> | <b>5.8771</b> | <b>0.02142</b>                       | <b>2781.8</b> | <b>5.7463</b> | 0.0014472                            | 1402.6        | 3.3513        |
| 320       | <b>0.02682</b>                       | <b>2878.1</b> | <b>5.9510</b> | <b>0.02268</b>                       | <b>2833.5</b> | <b>5.8341</b> | <b>0.01924</b>                       | <b>2782.0</b> | <b>5.7120</b> |
| 330       | <b>0.02793</b>                       | <b>2917.5</b> | <b>6.0169</b> | <b>0.02381</b>                       | <b>2878.7</b> | <b>5.9098</b> | <b>0.02042</b>                       | <b>2835.4</b> | <b>5.8014</b> |
| 340       | <b>0.02897</b>                       | <b>2953.9</b> | <b>6.0768</b> | <b>0.02484</b>                       | <b>2919.6</b> | <b>5.9771</b> | <b>0.02147</b>                       | <b>2882.1</b> | <b>5.8782</b> |
| 350       | <b>0.02995</b>                       | <b>2988.3</b> | <b>6.1324</b> | <b>0.02579</b>                       | <b>2957.5</b> | <b>6.0383</b> | <b>0.02242</b>                       | <b>2924.2</b> | <b>5.9464</b> |
| 360       | <b>0.03089</b>                       | <b>3021.3</b> | <b>6.1849</b> | <b>0.02669</b>                       | <b>2993.2</b> | <b>6.0953</b> | <b>0.02330</b>                       | <b>2963.3</b> | <b>6.0086</b> |
| $t$<br>°C | Параметры воды и пара при давлении   |               |               |                                      |               |               |                                      |               |               |
|           | <b>11 МПа</b>                        |               |               | <b>12 МПа</b>                        |               |               | <b>13 МПа</b>                        |               |               |
|           | $t_s = 318.04$                       |               |               | $t_s = 324.64$                       |               |               | $t_s = 330.81$                       |               |               |
|           | $v' = 0.0014887 \quad v'' = 0.01597$ |               |               | $v' = 0.0015267 \quad v'' = 0.01425$ |               |               | $v' = 0.0015670 \quad v'' = 0.01277$ |               |               |
|           | $i' = 1451.2 \quad i'' = 2705.4$     |               |               | $i' = 1492.6 \quad i'' = 2684.8$     |               |               | $i' = 1533.0 \quad i'' = 2662.4$     |               |               |
|           | $r = 1254.2$                         |               |               | $r = 1192.2$                         |               |               | $r = 1129.4$                         |               |               |
|           | v                                    | i             | s             | v                                    | i             | s             | v                                    | i             | s             |
| 250       | 0.0012389                            | 1085.9        | 2.7771        | 0.0012373                            | 1086.0        | 2.7748        | 0.0012356                            | 1086.1        | 2.7726        |
| 260       | 0.0012628                            | 1134.3        | 2.8686        | 0.0012609                            | 1134.2        | 2.8661        | 0.0012590                            | 1134.1        | 2.8636        |
| 270       | 0.0012894                            | 1183.8        | 2.9605        | 0.0012872                            | 1183.5        | 2.9577        | 0.0012850                            | 1183.3        | 2.9550        |
| 280       | 0.0013194                            | 1234.7        | 3.0535        | 0.0013167                            | 1234.3        | 3.0305        | 0.0013141                            | 1233.9        | 3.0472        |
| 290       | 0.0013536                            | 1287.5        | 3.1480        | 0.0013504                            | 1286.8        | 3.1444        | 0.0013472                            | 1286.1        | 3.1408        |
| 300       | 0.0013936                            | 1342.6        | 3.2450        | 0.0013895                            | 1341.5        | 3.2407        | 0.0013855                            | 1340.5        | 3.2365        |
| 310       | 0.0014416                            | 1400.9        | 3.3459        | 0.0014362                            | 1399.3        | 3.3407        | 0.0014310                            | 1397.8        | 3.3356        |
| 320       | <b>0.01625</b>                       | <b>2720.3</b> | <b>5.5782</b> | 0.0014941                            | 1461.5        | 3.4464        | 0.0014869                            | 1459.2        | 3.4400        |
| 330       | <b>0.01754</b>                       | <b>2785.9</b> | <b>5.6880</b> | <b>0.01501</b>                       | <b>2727.6</b> | <b>5.5643</b> | 0.0015600                            | 1526.9        | 3.5532        |
| 340       | <b>0.01864</b>                       | <b>2840.4</b> | <b>5.7776</b> | <b>0.01620</b>                       | <b>2793.4</b> | <b>5.6725</b> | <b>0.01402</b>                       | <b>2738.8</b> | <b>5.5589</b> |
| 350       | <b>0.01961</b>                       | <b>2888.1</b> | <b>5.8547</b> | <b>0.01721</b>                       | <b>2848.4</b> | <b>5.7615</b> | <b>0.01511</b>                       | <b>2804.0</b> | <b>5.6644</b> |
| 360       | <b>0.02049</b>                       | <b>2931.2</b> | <b>5.9234</b> | <b>0.01810</b>                       | <b>2896.6</b> | <b>5.8383</b> | <b>0.01604</b>                       | <b>2858.9</b> | <b>5.7518</b> |

## Продолжение таблицы 2.1

| $t$ ,<br>°C | Параметры воды и пара при давлении                          |               |               |                                                             |               |               |                                                              |               |               |
|-------------|-------------------------------------------------------------|---------------|---------------|-------------------------------------------------------------|---------------|---------------|--------------------------------------------------------------|---------------|---------------|
|             | <b>14 МПа</b>                                               |               |               | <b>15 МПа</b>                                               |               |               | <b>16 МПа</b>                                                |               |               |
|             | <b><math>t_s=336.63</math></b>                              |               |               | <b><math>t_s=342.12</math></b>                              |               |               | <b><math>t_s=347.32</math></b>                               |               |               |
|             | <b><math>v'=0.0016104</math>   <math>v''=0.01149</math></b> |               |               | <b><math>v'=0.0016580</math>   <math>v''=0.01035</math></b> |               |               | <b><math>v'=0.0017101</math>   <math>v''=0.009330</math></b> |               |               |
|             | <b><math>i'=1572.8</math>   <math>i''=2638.3</math></b>     |               |               | <b><math>i'=1612.2</math>   <math>i''=2611.6</math></b>     |               |               | <b><math>i'=1651.5</math>   <math>i''=2582.7</math></b>      |               |               |
|             | <b><math>r=1065.5</math></b>                                |               |               | <b><math>r=999.4</math></b>                                 |               |               | <b><math>r=931.2</math></b>                                  |               |               |
|             | v                                                           | i             | s             | v                                                           | i             | s             | v                                                            | i             | s             |
| 250         | 0.0012340                                                   | 1086.1        | 2.7704        | 0.0012324                                                   | 1086.2        | 2.7682        | 0.0012308                                                    | 1086.3        | 2.7660        |
| 260         | 0.0012572                                                   | 1134.1        | 2.8612        | 0.0012553                                                   | 1134.0        | 2.8587        | 0.0012535                                                    | 1134.0        | 2.8563        |
| 270         | 0.0012828                                                   | 1183.1        | 2.9523        | 0.0012807                                                   | 1182.9        | 2.9496        | 0.0012786                                                    | 1182.8        | 2.9469        |
| 280         | 0.0013115                                                   | 1233.5        | 3.0441        | 0.0013090                                                   | 1233.1        | 3.0411        | 0.0013065                                                    | 1232.8        | 3.0381        |
| 290         | 0.0013441                                                   | 1285.5        | 3.1373        | 0.0013410                                                   | 1284.9        | 3.1338        | 0.0013381                                                    | 1284.3        | 3.1304        |
| 300         | 0.0013816                                                   | 1339.5        | 3.2324        | 0.0013779                                                   | 1338.6        | 3.2284        | 0.0013742                                                    | 1337.7        | 3.2245        |
| 310         | 0.0014260                                                   | 1396.4        | 3.3307        | 0.0014212                                                   | 1395.0        | 3.3259        | 0.0014165                                                    | 1393.7        | 3.3213        |
| 320         | 0.0014801                                                   | 1457.0        | 3.4338        | 0.0014736                                                   | 1455.0        | 3.4279        | 0.0014674                                                    | 1453.0        | 3.4222        |
| 330         | 0.0015497                                                   | 1523.5        | 3.5449        | 0.0015402                                                   | 1520.3        | 3.5371        | 0.0015312                                                    | 1517.3        | 3.5296        |
| 340         | <b>0.01201</b>                                              | <b>2672.6</b> | <b>5.4297</b> | 0.0016323                                                   | 1594.6        | 3.6592        | 0.0016175                                                    | 1589.6        | 3.6484        |
| 350         | <b>0.01323</b>                                              | <b>2753.5</b> | <b>5.5606</b> | <b>0.01148</b>                                              | <b>2693.8</b> | <b>5.4450</b> | <b>0.009782</b>                                              | <b>2618.5</b> | <b>5.3071</b> |
| 360         | <b>0.01422</b>                                              | <b>2817.4</b> | <b>5.6624</b> | <b>0.01258</b>                                              | <b>2771.3</b> | <b>5.5685</b> | <b>0.01107</b>                                               | <b>2717.8</b> | <b>5.4653</b> |

| $t$ ,<br>°C | Параметры воды и пара при давлении                           |               |               |                                                              |               |               |                                                              |        |        |
|-------------|--------------------------------------------------------------|---------------|---------------|--------------------------------------------------------------|---------------|---------------|--------------------------------------------------------------|--------|--------|
|             | <b>17 МПа</b>                                                |               |               | <b>18 МПа</b>                                                |               |               | <b>19 МПа</b>                                                |        |        |
|             | <b><math>t_s=352.26</math></b>                               |               |               | <b><math>t_s=356.96</math></b>                               |               |               | <b><math>t_s=361.44</math></b>                               |        |        |
|             | <b><math>v'=0.0017690</math>   <math>v''=0.008401</math></b> |               |               | <b><math>v'=0.0018380</math>   <math>v''=0.007534</math></b> |               |               | <b><math>v'=0.0019231</math>   <math>v''=0.006700</math></b> |        |        |
|             | <b><math>i'=1691.6</math>   <math>i''=2550.8</math></b>      |               |               | <b><math>i'=1733.4</math>   <math>i''=2514.4</math></b>      |               |               | <b><math>i'=1778.2</math>   <math>i''=2470.1</math></b>      |        |        |
|             | <b><math>r=859.2</math></b>                                  |               |               | <b><math>r=781.0</math></b>                                  |               |               | <b><math>r=691.9</math></b>                                  |        |        |
|             | v                                                            | i             | s             | v                                                            | i             | s             | v                                                            | i      | s      |
| 250         | 0.0012293                                                    | 1086.4        | 2.7639        | 0.0012277                                                    | 1086.5        | 2.7617        | 0.0012262                                                    | 1086.7 | 2.7596 |
| 260         | 0.0012517                                                    | 1134.0        | 2.8540        | 0.0012500                                                    | 1134.0        | 2.8516        | 0.0012483                                                    | 1134.0 | 2.8493 |
| 270         | 0.0012765                                                    | 1182.6        | 2.9443        | 0.0012745                                                    | 1182.5        | 2.9417        | 0.0012725                                                    | 1182.4 | 2.9391 |
| 280         | 0.0013041                                                    | 1232.4        | 3.0352        | 0.0013017                                                    | 1232.1        | 3.0323        | 0.0012994                                                    | 1231.9 | 3.0294 |
| 290         | 0.0013352                                                    | 1283.8        | 3.1271        | 0.0013324                                                    | 1283.2        | 3.1238        | 0.0013296                                                    | 1282.8 | 3.1206 |
| 300         | 0.0013707                                                    | 1336.9        | 3.2206        | 0.0013672                                                    | 1336.1        | 3.2168        | 0.0013639                                                    | 1335.3 | 3.2131 |
| 310         | 0.0014120                                                    | 1392.4        | 3.3167        | 0.0014077                                                    | 1391.3        | 3.3123        | 1.0014035                                                    | 1390.1 | 3.3079 |
| 320         | 0.0014615                                                    | 1451.2        | 3.4166        | 0.0014558                                                    | 1449.5        | 3.4113        | 0.0014503                                                    | 1447.9 | 3.4060 |
| 330         | 0.0015229                                                    | 1514.6        | 3.5225        | 0.0015150                                                    | 1512.0        | 3.5157        | 0.0015075                                                    | 1509.6 | 3.5092 |
| 340         | 0.0016042                                                    | 1585.0        | 3.6384        | 0.0015920                                                    | 1580.9        | 3.6291        | 0.0015807                                                    | 1577.2 | 3.6204 |
| 350         | 0.001728                                                     | 1668.7        | 3.7736        | 0.001704                                                     | 1660.9        | 3.7582        | 0.001683                                                     | 1654.2 | 3.7448 |
| 360         | <b>0.009616</b>                                              | <b>2653.6</b> | <b>5.3475</b> | <b>0.008135</b>                                              | <b>2569.8</b> | <b>5.2011</b> | 0.001871                                                     | 1756.8 | 3.9080 |

| $t_s$ , °C        | 240  | 260  | 280  | 300   | 310  | 320  | 330  | 340  | 350  | 360  | 370   |
|-------------------|------|------|------|-------|------|------|------|------|------|------|-------|
| $\sigma_s$ , МН/м | 28.4 | 23.7 | 19.0 | 14.37 | 12.1 | 9.88 | 7.71 | 4.64 | 3.68 | 1.89 | 0.396 |

Абсолютное давление  $p$ , МПа, Температура  $t$ , °CТемпература насыщения  $t_s$ , °CУдельный объем  $v$ , м<sup>3</sup>/кгУдельный объем воды на линии насыщения  $v'$ , м<sup>3</sup>/кгУдельный объем сухого насыщенного пара  $v''$ , м<sup>3</sup>/кгУдельная энтальпия  $i$ , кДж/кгУдельная энтальпия воды на линии насыщения  $i'$ , кДж/кгУдельная энтальпия сухого насыщенного пара  $i''$ , кДж/кгСкрытая теплота парообразования  $r$ , кДж/кгУдельная энтропия  $s$ , кДж/кг

Поверхностное натяжение воды на линии насыщения  $\sigma_s$ , мН/м

Таблица 2.2 - Зависимость коэффициента динамической вязкости воды  $\mu$ , мкПа·с от температуры при давлениях 15 и 20 МПа

| $P$ ,<br>МПа | $\mu$ , мкПа·с при температурах, °C |       |       |      |      |      |      |      |      |      |
|--------------|-------------------------------------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|
|              | 250                                 | 260   | 270   | 280  | 290  | 300  | 310  | 320  | 330  | 340  |
| 15           | 108.9                               | 104.5 | 100.3 | 96.2 | 92.2 | 88.3 | 84.3 | 80.2 | 75.7 | 70.6 |
| 20           | 110.2                               | 105.8 | 101.7 | 97.7 | 93.8 | 90.1 | 86.3 | 82.4 | 78.4 | 74.1 |

Коэффициент динамической вязкости воды  $\mu = \nu \cdot \rho$ , мкПа·с

Таблица 2.3 - Изобарная теплоемкость воды  $c_p$ , кДж/кг·°C в области  $p=15\ldots 20$  МПа

| $P$ ,<br>МПа | $c_p$ , кДж/кг·°C при температурах, °C |       |       |       |      |      |      |      |      |      |
|--------------|----------------------------------------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|
|              | 250                                    | 260   | 270   | 280   | 290  | 300  | 310  | 320  | 330  | 340  |
| 15           | 4.735                                  | 4.831 | 4.948 | 5.09  | 5.27 | 5.50 | 5.80 | 6.23 | 6.89 | 8.14 |
| 16           | 4.724                                  | 4.818 | 4.932 | 5.07  | 5.24 | 5.46 | 5.75 | 6.15 | 6.75 | 7.82 |
| 17           | 4.714                                  | 4.807 | 4.916 | 5.05  | 5.21 | 5.43 | 5.70 | 6.08 | 6.63 | 7.57 |
| 18           | 4.704                                  | 4.794 | 4.901 | 5.03  | 5.19 | 5.39 | 5.65 | 6.01 | 6.52 | 7.35 |
| 19           | 4.694                                  | 4.782 | 4.887 | 5.01  | 5.17 | 5.36 | 5.61 | 5.95 | 6.42 | 7.17 |
| 20           | 4.684                                  | 4.772 | 4.873 | 4.997 | 5.15 | 5.33 | 5.57 | 5.89 | 6.33 | 7.01 |

Таблица 2.4 - Зависимость коэффициента теплопроводности воды  $\lambda$  Вт/м·°C от температуры при давлениях 15 и 20 МПа

| $P$ ,<br>МПа | Коэффициент теплопроводности воды и пара Вт/м·°C при температурах, °C |        |        |        |        |        |        |        |        |     |
|--------------|-----------------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-----|
|              | 250                                                                   | 260    | 270    | 280    | 290    | 300    | 310    | 320    | 330    | 340 |
| 15           | 0.6352                                                                | 0.6237 | 0.6107 | 0.5961 | 0.5798 | 0.5616 | 0.5416 | 0.5198 | 0.4962 |     |
| 20           | 0.6410                                                                | 0.6300 | 0.6177 | 0.6039 | 0.5885 | 0.5715 | 0.5529 | 0.5327 | 0.5111 |     |

## 2.2 Основные формулы для расчета коэффициента теплоотдачи

### 2.2.1 Коэффициент теплоотдачи при охлаждении твэла однофазным водным потоком

Коэффициент теплоотдачи характеризует процесс передачи тепла от более нагретого тела к менее нагретому телу путем конвективного теплообмена, может быть определен через формулу Ньютона - Рихмана:

$$\alpha = q / (t_{об} - t_{ж}), \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)} \quad (2.1)$$

где  $q$  – средние тепловыделения с единицы площади поверхности твэла Вт/м<sup>2</sup>;

$t_{об}$  – средняя температура нагрева поверхности оболочки твэла, °C;

$t_{ж}$  – средняя температура теплоносителя в ядре потока, °C;

Коэффициент теплоотдачи можно рассчитать и через Критерии подобия, учитывающие особенности протекания теплообменных процессов:

$$\alpha = \frac{\lambda}{d_s} \cdot Nu, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}. \quad (2.2)$$

Число Нуссельта:

$$Nu = 0.023 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.4}, \quad (2.3, a)$$

где  $Nu$  – число Нуссельта характеризует интенсивность теплоотдачи,

$Pr$  – число Прандтля характеризует изменение теплофизических характеристик потока в зависимости от изменения его температуры и давления;

$Re$  – число Рейнольдса характеризует режим движения теплоносителя. Для однофазного потока при  $Re < 2300$  режим течения потока ламинарный (поступательный), при  $Re > 2300$  режим течения потока турбулентный (вихревой);

$$\text{Число Нуссельта : } Nu = \frac{\alpha \cdot d_g}{\lambda}; \quad (2.3,6)$$

$$\text{Число Прандтля: } Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{\mu}{\rho} \cdot \frac{\rho \cdot c_p}{\lambda} = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda}. \quad (2.4)$$

где  $\nu = \mu / \rho$  - коэффициент кинематической вязкости,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot C_p} - \text{коэффициент температуропроводности, } \text{м}^2/\text{с};$$

$\rho$  - плотность воды,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$\mu = \nu \cdot \rho$  - коэффициент динамической вязкости воды,  $\text{Па} \cdot \text{с}$ ;

$\lambda$  - коэффициент теплопроводности воды,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$

$C_p$  - удельная изобарная теплоемкость воды,  $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$

$$\text{Число Рейнольдса: } Re = \frac{w \cdot d_g}{\nu} = \frac{w \cdot \rho \cdot d_g}{\mu}, \quad (2.5)$$

$$Re = \frac{G \cdot d_g}{S_{\text{тн}} \cdot \mu}, \quad Re = \frac{4G}{\mu \cdot \Pi_r}. \quad (2.6)$$

где  $w$  - скорость движения потока,  $\text{м}/\text{с}$ ;

$d_g$  - эквивалентный диаметр ТВС,  $\text{м}$ .

$\nu$  - коэффициент кинематической вязкости,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;

$\rho$  - плотность воды,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$\mu$  - коэффициент динамической вязкости воды,  $\text{Па} \cdot \text{с}$ ;

$G$  - расход теплоносителя через канал,  $\text{кг}/\text{с}$ .

$S_{\text{тн}}$  - площадь сечения для прохода теплоносителя через канал,  $\text{м}^2$ ;

$\Pi_r$  (смоченный периметр) – периметр всех элементов, омываемых теплоносителем в канале,  $\text{м}$ ;

$$\text{Эквивалентный диаметр канала сложного сечения: } d_g = \frac{4 \cdot S_{\text{тн}}}{\Pi_r} \text{ м}. \quad (2.7)$$

$$\text{Термические сопротивления теплоотдачи: } R_\alpha = \frac{1}{\alpha \cdot \pi \cdot d_{\text{мбл}}}, (\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт} \quad (2.8)$$

Расход теплоносителя через активную зону реактора:

$$G_{\text{мбл}} = \frac{Q_p}{(i_{\text{вх}} - i_{\text{вх}}) N_{\text{мбл}}} \text{ кг}/\text{с}, \quad (2.9)$$

где  $Q_p$  – тепловая мощность реактора, кВт;

$N_{твс}$  – количество ТВС в ядерном реакторе, шт.;

$i_{вх}$  – удельная энтальпия воды на входе в активную зону реактора, кДж/кг;

$i_{вых}$  – удельная энтальпия воды на выходе из активной зоны реактора, кДж/кг;

Скорость движения теплоносителя в ТВС:  $w(z) = \frac{G_{твс}}{S_{тн} \cdot \rho(z)}$  м/с, (2.10)

где  $G_{твс}$  – расход теплоносителя через тепловыделяющую сборку, кг/с,

$S_{тн}$  – площадь сечения для прохода теплоносителя через тепловыделяющую сборку (ТВС), м<sup>2</sup>;

$\rho$  – средняя плотность водного теплоносителя, определяемая по средней температуре в ядре потока, кг/м<sup>3</sup>.

## 2.2.2 Коэффициент теплоотдачи при охлаждении твэла кипящим водным потоком (поверхностное и кипение в объеме)

Поверхностное пузырьковое кипение возникает, если температура наружной оболочки твэла превышает температуру насыщения. Поверхностное пузырьковое кипение характеризуется появлением пузырьков пара на поверхности оболочки твэла, что приводит к турбулизации вязкого пограничного слоя и улучшению условий теплоотдачи при этом в ядре потока теплоноситель недогрет до кипения.

При поверхностном кипении и вынужденном движении жидкости коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha_{\text{пов.кипение}} = \alpha_{\text{кон}} \cdot \sqrt{1 + (\alpha_{\text{кин}} / \alpha_{\text{кон}})^2}, \quad (2.11)$$

где  $\alpha_{\text{кон}}$  – коэффициент теплоотдачи при конвекции, определяемый по (2.1);

$\alpha_{\text{кин}}$  – коэффициент теплоотдачи при кипении недогретой жидкости, определяемый по формуле Н.Г. Рассохина при давлении  $p = 8 \dots 20$  МПа:

$$\alpha_{\text{кин}} = 0,027 (q - q_{\text{н.к}})^{2/3} p^{1.33}, \quad (2.12)$$

где  $p$  – давление теплоносителя, бар;

$q$  – текущий тепловой поток наружной оболочки твэла, Вт/м<sup>2</sup>;

$q_{\text{н.к}}$  – тепловой поток, соответствующий режиму поверхностного кипения, определяемый как  $q_{\text{н.к}} = \alpha_{\text{кон}} (t_s - t_{\text{тн}})$ , Вт/м<sup>2</sup>, где  $t_s$  – температура насыщения, °C;  $t_{\text{тн}}$  – температура теплоносителя в ядре потока, °C.

Температура оболочки твэла в режимах поверхностного и объемного кипения определяется по формуле

$$t_{\text{об}} = t_s + q / \alpha_{\text{пов.кипение}}, \quad t_{\text{об}} = t_s + q / \alpha_{\text{кипение в объеме}} \quad (2.13)$$

где  $\alpha_{\text{пов.кипение}}$  – коэффициент теплоотдачи, рассчитываемый по формулам для режима поверхностного кипения,  $\alpha_{\text{кипение в объеме}}$  – коэффициент теплоотдачи, рассчитываемый по формулам для режима кипения в большом объеме.

Кроме того, для определения коэффициента теплоотдачи в режимах поверхностного и объемного кипения могут быть использованы следующие формулы:

$$\alpha_{\text{кип}} = \frac{q^{0,7}}{0.367 - 0.00126(t_s - 100)} \quad (2.14)$$

$q \leq 2,3 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$ ;  $3 \leq P \leq 20 \text{ МПа}$ ;  $\alpha$ , Вт/м<sup>2</sup>·К

$$\alpha_{\text{кип}} \approx 3.4 \cdot q^{2/3} \cdot p^{0.18} (1 - 0.0045p) \quad (2.15)$$

где  $q$ , Вт/м<sup>2</sup>;  $P$ , Па;  $\alpha$ , Вт/м<sup>2</sup>·К;

$$\alpha_{\text{кип}} = 0.577 q^{0.7} P^{0.15} \quad (2.16)$$

где  $q$ , Вт/м<sup>2</sup>;  $P$ , Па;  $\alpha$ , Вт/м<sup>2</sup>·К;

Ниже приводится методика расчета эквивалентного диаметра ТВС различного конструктивного исполнения.

#### Эквивалентный диаметр ТВС:

$$d_g = \frac{4 \cdot S_{\text{TH}}}{\Pi_{\Gamma}} \text{ м.} \quad (2.17)$$

где  $S_{\text{TH}}$  - площадь сечения для прохода теплоносителя через тепловыделяющую сборку (ТВС), м<sup>2</sup>;

$\Pi_{\Gamma}$  (смоченный периметр) - периметр всех элементов, входящих в конструкцию ТВС, омываемых теплоносителем, м;

Гидравлический (смоченный) периметр для разной формы ТВС, м:  
**шестигранная бесчехловая ТВС ВВЭР:**

$$\Pi_{\Gamma} = \pi(n_{\text{ТВЭ}} \cdot d_{\text{ТВЭ}} + n_p \cdot d_p + d_{\text{ц}}); \quad (2.18)$$

**шестигранная чехловая ТВС ВВЭР:**

$$\Pi_{\Gamma} = \pi(n_{\text{ТВЭ}} \cdot d_{\text{ТВЭ}} + n_p \cdot d_p + d_{\text{ц}}) + 2\sqrt{3}(h_{\text{кл}} - 2\delta_{\text{ТВС}}); \quad (2.19)$$

**шестигранная бесчехловая ТВС с уголками ВВЭР:**

$$\Pi_{\Gamma} = \pi(n_{\text{ТВЭ}} \cdot d_{\text{ТВЭ}} + n_p \cdot d_p + d_{\text{ц}}) + 12b, \quad (2.20)$$

где  $b$  – номер стандартного уголка (ширина его стороны), м.

**квадратного сечения, бесчехловая ТВС РВР:**

$$\Pi_{\Gamma} = \pi(n_{\text{ТВЭ}} \cdot d_{\text{ТВЭ}} + n_p \cdot d_p + d_{\text{ц}}); \quad (2.21)$$

**круглого сечения, чехловая ТВС судовых ВВЭР**

$$\Pi_{\Gamma} = \pi(D_{\text{ТВС}} - 2 \cdot \delta_{\text{меч}}) + \pi(n \cdot d); \quad (2.22)$$

где  $D_{\text{ТВС}}$  – наружный диаметр трубы с учетом толщины чехла, м;

$\delta_{\text{ТВС}}$  - толщина чехла трубы, м;

$n$  - количество каналов и ТВЭЛОВ, шт.

$d$  - наружный диаметр каналов, различного назначения и ТВЭЛОВ, входящий в состав конструкции ТВС, м.

Площадь проходного сечения теплоносителя в ТВС, м<sup>2</sup>:

**шестигранная бесчехловая ТВС ВВЭР:**

$$S_{TH} = \frac{\sqrt{3}}{2} h_{кл}^2 - \frac{\pi}{4} (n_{ТВЭ} d_{ТВЭ}^2 + n_p d_p^2 + d_{ц}^2), \text{ м}^2 \quad (2.23)$$

**шестигранная чехловая ТВС ВВЭР:**

$$S_{TH} = \frac{\sqrt{3}}{2} (h_{кл} - 2\delta_{ТВС})^2 - \frac{\pi}{4} (n_{ТВЭ} d_{ТВЭ}^2 + n_p d_p^2 + d_{ц}^2), \text{ м}^2 \quad (2.24)$$

где  $n_{ТВЭ}$  - число ТВЭлов в одной ТВС, шт.;  
 $d_{ТВЭ}$  - наружный диаметр твэла, м;  
 $n_p$  - число направляющих труб под пэлы в одной ТВС, шт.;  
 $d_p$  - наружный диаметр труб под пэлы ОР СУЗ, м;  
 $d_{ц}$  - наружный диаметр центральной трубы ТВС, м;  
 $h_{кл}$  - размер ТВС «под ключ», м;  
 $\delta_{ТВС}$  - толщина чехла ТВС, м.

**квадратного сечения, бесчехловая ТВС PWR:**

$$S_{TH} = a^2 - \frac{\pi}{4} \cdot (d_{ТВЭ}^2 \cdot n_{ТВЭ} + d_p^2 \cdot n_p + d_{ц}^2 \cdot n_{ц}), \text{ м}^2 \quad (2.25)$$

$a$  – сторона квадрата, если ТВС бесчехловая, квадратного сечения.

**квадратного сечения, чехловая ТВС:**

$$S_{TH} = a^2 - \frac{\pi}{4} \cdot (d_{ТВЭ}^2 \cdot n_{ТВЭ} + d_p^2 \cdot n_p + d_{ц}^2 \cdot n_{ц}), \text{ м}^2 \quad (2.26)$$

$a$  – внутренний размер стороны чехла квадратного сечения, если ТВС чехловая, квадратного сечения.

**круглого сечения, чехловая ТВС судовых ВВЭР**

$$S_{TH} = \frac{\pi(D_{твс} - 2\delta_{твс})^2}{4} - \frac{\pi}{4} \cdot (d^2 \cdot n), \text{ м}^2 \quad (2.27)$$

где  $D_{твс} = D_{внутр} + 2\delta_{твс}$  – наружный диаметр трубы с учетом толщины чехла, м;

$D_{внутр} = D_{твс} - 2\delta_{твс}$  – внутренний диаметр трубы - чехла, м;

$\delta_{твс}$  - толщины чехла трубы, м;

$n$  - количество каналов и твэлов, шт.

$d$  - наружный диаметр каналов, различного назначения и твэлов, входящий в состав конструкции ТВС, м.

Все физические характеристики воды ( $\rho$ ,  $\mu$ ,  $C_p$ ,  $\lambda$ ) берутся из табл. 2.1, 2.2, 2.3, 2.4 по параметрам ядра потока (давлению и температуре теплоносителя) в рассматриваемом сечении  $z$ .

### 2.2.3 Коэффициент теплоотдачи при охлаждении поверхности твэла газовым теплоносителем

В случае охлаждения поверхности твэла газом (воздухом) коэффициент теплоотдачи может быть определен из уравнения:

$$\alpha = \frac{q}{(t_{стенки} - t_g)}, \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) \quad (2.28)$$

где  $t_{\text{стенки}}$  – температура на внешней поверхности твэла, °C;  
 $t_{\text{г}}$  – температура охлаждающего газа (воздуха), °C;  
 $q$  – тепловыделение на поверхности твэла, кВт/м<sup>2</sup>.

Коэффициент теплоотдачи может быть рассчитан по формуле:

$$\alpha = \frac{\lambda}{d_{\text{э}}} \cdot Nu, \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C}. \quad (2.29)$$

где

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности охлаждающей среды, Вт/(м·K);  
 $d_{\text{э}}$  – эквивалентный диаметр равный наружному диаметру твэла, м.  
 $Nu$  – число Нуссельта.

Число Нуссельта для отвода тепла от поверхности твэла вбок, охлаждаемая газовым (воздушным) потоком, рассчитывается через зависимости:

$$Nu = 0,59 Ra^{1/4} \text{ при } Ra < 10^9 \quad (2.30)$$

$$Nu = 0,1 Ra^{1/3} \text{ при } Ra > 10^9 \quad (2.31)$$

Число Рэлея ( $Ra$ ) – критерий подобия, характеризующий отношение потока тепла в жидкости или газе за счёт подъёмной (архимедовой) силы, возникающей вследствие неравномерности поля температуры у поверхности тела, к теплопроводности среды, определяется по формуле

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot L^3}{2 \cdot \nu \cdot a}, \quad (2.32)$$

где  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения;

$\beta$  – коэффициент объемного расширения воздуха, 1/K;

$L$  – участок равный высоте обогреваемой части твэла, м;

$\nu$  – кинематическая вязкость охлаждающей среды, м<sup>2</sup>/с;

$a$  – коэффициент температуропроводности охлаждающей среды, м<sup>2</sup>/с;

$\Delta T = (t_{\text{стенки}} - t_{\text{г}})$  – разность температуры поверхности тела и среды, в данном случае разность температур между температурой нагрева поверхности твэла  $t_{\text{стенки}}$  и температурой окружающей среды (газообразного потока)  $t_{\text{г}}$ , °C.

#### 2.2.4 Коэффициент теплоотдачи при охлаждении однофазным жидкометаллическим потоком

Расчет коэффициента теплоотдачи при охлаждении жидкометаллическим теплоносителем:

$$\alpha = \frac{\lambda}{d_{\text{э}}} Nu, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{K)} \quad (2.33)$$

Расчет числа Нуссельта для жидкометаллического натриевого теплоносителя высокой очистки:

$$Nu = 5 + 0.025 Pe^{0.8}, \text{ при } Pe < 4 \cdot 10^3, \quad Pr = 0.004 \div 0.04 \quad (2.34)$$

$$Nu = 7.5 + 0.005 Pe, \text{ при } Pe = 4 \cdot 10^3 \div 2 \cdot 10^4 \quad (2.35)$$

На интенсивность теплоотдачи значительное влияние оказывает отсутствие примесей в жидкометаллическом теплоносителе. Чем выше чистота жидко-

металлического теплоносителя, тем выше число Нуссельта и коэффициент теплоотдачи.

Число Пекле характеризует соотношение между конвективным и молекулярным процессами переноса тепла в потоке жидкости, а также является критерием подобия для процессов конвективного теплообмена. Жидкометаллический теплоноситель в данном случае рассматривается как жидкость.

Определяется Число Пекле:

$$Pe = Pr \cdot Re = \frac{\mu \cdot C_p}{\lambda} \cdot \frac{\omega \cdot \rho \cdot d_s}{\mu} = \frac{C_p \cdot \rho \cdot d_s \cdot \omega}{\lambda} = \frac{d_s \cdot \omega}{a} \quad (2.36)$$

где  $a$  - коэффициент температуропроводности,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;

$\rho$  - плотность потока,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$\mu = \nu \cdot \rho$  - коэффициент динамической вязкости,  $\text{Па} \cdot \text{с}$ ;

$d_s$  - эквивалентный диаметр канала,  $\text{м}$ ;

$\lambda$  - коэффициент теплопроводности,  $\text{Вт}/\text{м} \cdot ^\circ\text{C}$ ;

$C_p$  - удельная изобарная теплоемкость,  $\text{Дж}/\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}$ ;

$\omega$  - скорость движения потока,  $\text{м}/\text{с}$ .

В таблице 2.5 представлены теплофизические характеристики жидкого натрия, в таблице 2.6 теплофизические свойства жидкого свинца

Таблица 2.5 - Свойства жидкого натрия [3]

| $t, ^\circ\text{C}$ | $\rho, \text{кг}/\text{м}^3$ | $C_p, \text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$ | $\lambda, \text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{K})$ | $\mu, 10^{-3}, \text{Па} \cdot \text{с}$ | $\nu, 10^{-7}, \text{м}^2/\text{с}$ | $a, 10^{-7}, \text{м}^2/\text{с}$ | $Pr, 10^{-3}$ | $\sigma, 10^{-3}, \text{Н}/\text{м}$ |
|---------------------|------------------------------|---------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|---------------|--------------------------------------|
| 450                 | 845,1                        | 1269                                        | 68,76                                          | 259,2                                    | 3,068                               | 638,7                             | 4,803         | 162                                  |
| 460                 | 842,7                        | 1267                                        | 68,28                                          | 255,5                                    | 3,033                               | 636,8                             | 4,762         | 161                                  |
| 470                 | 840,3                        | 1266                                        | 67,79                                          | 252,0                                    | 2,999                               | 634,8                             | 4,724         | 160                                  |
| 480                 | 837,9                        | 1264                                        | 67,31                                          | 248,5                                    | 2,967                               | 632,8                             | 4,688         | 159                                  |
| 490                 | 835,5                        | 1263                                        | 66,82                                          | 245,3                                    | 2,936                               | 630,7                             | 4,655         | 158                                  |
| 500                 | 833,1                        | 1262                                        | 66,34                                          | 242,1                                    | 2,906                               | 628,6                             | 4,624         | 157                                  |
| 510                 | 830,7                        | 1260                                        | 65,85                                          | 239,0                                    | 2,878                               | 626,4                             | 4,594         | 156                                  |
| 520                 | 828,3                        | 1259                                        | 65,37                                          | 236,1                                    | 2,851                               | 624,1                             | 4,567         | 155                                  |
| 530                 | 825,8                        | 1258                                        | 64,88                                          | 233,2                                    | 2,825                               | 621,8                             | 4,542         | 154                                  |
| 540                 | 823,4                        | 1258                                        | 64,4                                           | 230,5                                    | 2,799                               | 619,5                             | 4,519         | 153                                  |
| 550                 | 821,0                        | 1257                                        | 63,91                                          | 227,8                                    | 2,775                               | 617,1                             | 4,497         | 152                                  |

Таблица 2.6 - Свойства жидкого свинца [3]

| $t, ^\circ\text{C}$ | $\rho, \text{кг}/\text{м}^3$ | $C_p, \text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$ | $\lambda, \text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{K})$ | $\nu, 10^{-7}, \text{м}^2/\text{с}$ | $a, 10^{-7}, \text{м}^2/\text{с}$ | $Pr, 10^{-3}$ |
|---------------------|------------------------------|---------------------------------------------|------------------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|---------------|
| 450                 | 10530                        | 147,3                                       | 15,33                                          | 19,19                               | 9,69                              | 1,96          |
| 460                 | 10520                        | 147,3                                       | 15,35                                          | 18,86                               | 9,7                               | 1,93          |
| 470                 | 10500                        | 147,3                                       | 15,38                                          | 18,53                               | 9,73                              | 1,89          |
| 480                 | 10490                        | 147,3                                       | 15,40                                          | 18,22                               | 9,75                              | 1,85          |
| 490                 | 10480                        | 147,3                                       | 15,42                                          | 17,92                               | 9,78                              | 1,81          |
| 500                 | 10470                        | 147,3                                       | 15,45                                          | 17,62                               | 9,82                              | 1,78          |
| 510                 | 10460                        | 147,3                                       | 15,47                                          | 17,34                               | 9,86                              | 1,74          |
| 520                 | 10440                        | 147,3                                       | 15,49                                          | 17,06                               | 9,91                              | 1,71          |
| 530                 | 10430                        | 147,3                                       | 15,51                                          | 16,79                               | 9,96                              | 1,67          |
| 540                 | 10420                        | 147,3                                       | 15,54                                          | 16,54                               | 10,02                             | 1,64          |
| 550                 | 10410                        | 147,3                                       | 15,56                                          | 16,29                               | 10,08                             | 1,60          |

$t$  – температура жидкометаллического теплоносителя,  $^\circ\text{C}$ ;

$\rho$  – плотность жидкометаллического теплоносителя,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$C_p$  - удельная изобарная теплоемкость, кДж/кг·°C;  
 $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·K);  
 $\mu$  – коэффициент динамической вязкости, Па·с;  
 $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости, м<sup>2</sup>/с;  
 $a$  - коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с;  
 $Pr$  – число Прандтля ;  
 $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения, Н/м.

#### Плотность жидкого свинца

$$\rho = 11072 - 1.2 \cdot t, \text{ кг/м}^3 \quad (2.37)$$

#### Коэффициент теплопроводности жидкого свинца:

$$\lambda = 14.3 + 0.0023t \text{ при } 400-550 \text{ }^\circ\text{C} \quad (2.38)$$

$$\lambda = 34.89 - 0.073t + 6.9 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 \text{ при } 550-700 \text{ }^\circ\text{C} \quad (2.39)$$

#### Число Прандтля рассчитывается по формуле

$$Pr \cdot 10^2 = 4.25 - 6.27 \cdot 10^{-3}t + 2.67 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 \pm 2\% \quad (2.40)$$

Все формулы (2.37-2.40) применимы для диапазона температур от 400...700 °C.

## 2.3 Перечень задач с примерами их решения

### Задача № 1

Поток воды движется в трубе диаметром 16 мм со скоростью 5 м/с, давлением 15 МПа и средней температурой 310 °C . Найти коэффициент теплоотдачи  $a$  . Для решения задачи воспользоваться таблицами 2.1 - 2.4.

#### Дано:

$$d_3 = 16 \text{ мм}$$

$$P_{\text{тн}} = 15 \text{ МПа}$$

$$t_{\text{тн}} = 310 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\omega = 5 \text{ м/с}$$

#### Определить: $a$ ?

#### Решение

1. Определить коэффициент теплоотдачи

$$\alpha = \frac{\lambda}{d_3} \cdot Nu, \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C} .$$

2. Определить число Нуссельта

$$Nu(z) = 0,023 \cdot (Re(z))^{0,8} \cdot (Pr(z))^{0,4} .$$

3. Определить число Прандтля

$$Pr(z) = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\mu}{\rho} \cdot \frac{C_p \cdot \rho}{\lambda} = \frac{\mu \cdot C_p}{\lambda} = \frac{84,3 \cdot 10^{-6} \cdot 5,8}{0,5416 \cdot 10^{-3}} = 0,9 .$$

4. Определить число Рейнольдса

$$Re = \frac{\omega \cdot d_s}{\mu \cdot g} = \frac{5,0 \cdot 16,0 \cdot 10^{-3}}{84,3 \cdot 10^{-6} \cdot 0,0014212} = 667740.$$

4. Произвести расчет коэффициента теплоотдачи

$$\alpha = \frac{\lambda}{d_s} \cdot Nu = 0,023 \frac{\lambda}{d_s} (Re(z))^{0,8} \cdot (Pr(z))^{0,4} = 0,023 \frac{0,5416 \cdot 10^{-3}}{0,016} \cdot 667740^{0,8} \cdot 0,9^{0,4} = 34,09$$

, кВт/м<sup>2</sup> · °С

Теплофизические свойства воды определяются из таблиц 2.1 - 2.4:

$g$  (P=15 МПа; t=310 °С) = 0,0014212 м<sup>3</sup>/кг - удельный объем воды (табл.2.1)

$\mu$  (P=15 МПа; t=310 °С) = 84,3 мкПа · с = 84,3 · 10<sup>-6</sup> Па · с (табл. 2.2)

$C_p$ , (P=15 МПа; t=310 °С) = 5,8 кДж/кг · °С (табл. 2.3)

$\lambda$  (P=15 МПа; t=310 °С) = 0,5416 Вт/м · °С = 0,5416 · 10<sup>-3</sup> кВт/м · °С (табл. 2.4)

$d_s$  = 16 мм = 16 · 10<sup>-3</sup> м

**Ответ:**  $\alpha = 34,09$  кВт/м<sup>2</sup> · °С

## Задача № 2

Определить коэффициент теплоотдачи и температуру наружной поверхности стенки трубки испарителя при кипении на ней воды под давлением 4,0 МПа. Тепловая нагрузка поверхности нагрева  $q = 4 \cdot 10^5$  Вт/м<sup>2</sup>.

**Дано:**

P = 4,0 МПа

$q = 3,2 \cdot 10^5$  Вт/м<sup>2</sup>

**Определить:**  $\alpha_{кип}$ ,  $t_{об}$  - ?

### Решение

1. Расчет коэффициента теплоотдачи при кипении воды:

$$\alpha_{кип} = 0,577 \cdot q^{0,7} \cdot p^{0,15},$$

$$\alpha_{кип} = 0,577 \cdot (3,2 \cdot 10^5)^{0,7} \cdot (4 \cdot 10^6)^{0,15} = 40280,03, \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°С}$$

2. Расчет температуры стенки при кипении воды на ее поверхности:

$$t_{об} = t_s + q / \alpha_{кип} = 250,33 + (4 \cdot 10^6) / 40280,03 = 349,63 \text{ °С}.$$

**Ответ**  $\alpha_{кип} = 40280,03 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°С}$ ;  $t_{об} = 349,63 \text{ °С}$

## Задача № 3

Рассчитайте значение числа Пекле для жидкометаллического натриевого теплоносителя при движении его внутри трубки диаметром 2 см при температуре натрия 450 °С и скорости движения потока  $\omega = 3$  м/с.

**Дано:**

$$t_{\text{Na}} = 450 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\omega = 3 \text{ м/с}$$

$$d_{\text{экв}} = 0,02 \text{ м}$$

**Определить: Re-?**

**Решение**

1. Расчет числа Пекле при охлаждении поверхности жидкометаллическим натриевым теплоносителем:

Из таблицы 2.2.2 при температуре натрия  $t = 450 \text{ }^{\circ}\text{C}$  определяем плотность  $\rho = 845,1 \text{ кг/м}^3$ ; теплоемкость  $C_p = 1269,0 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$ ; теплопроводность  $\lambda = 68,76 \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$ . Далее производим расчет числа Пекле (Pe).

$$Pe = \text{Pr} \cdot \text{Re} = \frac{\mu \cdot C_p}{\lambda} \cdot \frac{\omega \cdot \rho \cdot d_{\text{э}}}{\mu} = \frac{C_p \cdot \rho \cdot d_{\text{э}} \cdot \omega}{\lambda}$$

$$Pe = \text{Pr} \cdot \text{Re} = \frac{C_p \cdot \rho \cdot d_{\text{э}} \cdot \omega}{\lambda} = \frac{1269,0 \cdot 845,1 \cdot 0,02 \cdot 3}{68,76} = 935,8$$

**Ответ :**  $Pe = 935,8$ .

**Задача № 4**

Поток воды с давлением 18 МПа и средней температурой  $290 \text{ }^{\circ}\text{C}$  движется в трубе диаметром 14 мм со скоростью 3 м/с. Определить коэффициент теплоотдачи.

**Задача № 5**

Поток воды движется в ТВС с размерами: размер под ключ  $h_{\text{кл}} = 234 \text{ мм}$ , наружный диаметр твэл  $d_{\text{твэ}} = 9,1 \text{ мм}$ , количество твэлов  $n_{\text{твэ}} = 312 \text{ шт.}$ , наружный диаметр направляющих каналов  $d_p = 12,6 \text{ мм}$  их количество  $n_p = 18 \text{ шт.}$ , наружный диаметр центрального канала  $d_{\text{ц}} = 11,2 \text{ мм}$ , количество  $n_{\text{ц}} = 1 \text{ шт.}$  и свойствами потока  $P = 15 \text{ МПа}$ ,  $t_{\text{ср}} = 270 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $w = 3 \text{ м/с}$ . Определить критерий Рейнольдса Re .

**Задача № 6**

Поток воды движется через ТВС  $d_{\text{экв}} = 0,01 \text{ м}$ ,  $P = 16 \text{ МПа}$ ,  $t_{\text{ср}} = 300 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $w = 4 \text{ м/с}$ . Определить число Нуссельта Nu ?

**Задача № 7**

Поток воды движется в трубке  $d_{\text{вн}} = 16 \text{ мм}$ ,  $P = 17 \text{ МПа}$ ,  $t_{\text{ср}} = 280 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{Re} = 360000$ . Определить коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  .

**Задача № 8**

Поток воды движется через ТВС с давлением 17 МПа и средней температурой  $300 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Определить число Прандтля.

**Задача № 9**

Реактор ВВЭР-1000 работал на мощности 75 % от номинальной. Определить коэффициент теплоотдачи, если  $t_{ог} = 350\text{ }^{\circ}\text{C}$  средняя температура водного теплоносителя  $t_{тн} = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ , диаметр твэла 9,1 мм, количество твэлов в одной ТВС 312 шт., количество ТВС в активной зоне 163 шт., высота активной зоны 3,68 м, доля тепла выделяемая в ТВС составляет 0,95.

**Задача № 10**

Поток воды давлением 16 МПа и средней температурой 280  $^{\circ}\text{C}$  движется в трубе диаметром 16 мм со скоростью 5 м/с. Определить коэффициент теплоотдачи.

**Задача № 11**

Поток воды движется в трубе диаметром 16 мм с давлением 18 МПа и средней температурой 310  $^{\circ}\text{C}$ . Рейнольдс потока  $Re = 640000$ . Найти коэффициент теплоотдачи.

**Задача № 12**

Поток воды движется через ТВС с давлением 18 МПа и средней температурой 290  $^{\circ}\text{C}$ , эквивалентный диаметр 0,01 м, скорость теплоносителя 5 м/с. Определить число Нуссельта.

**Задача № 13**

Рассчитайте эквивалентный диаметр бесчехловой шестигранной тепловыделяющей сборки при исходных параметрах: наружный диаметр твэла  $d_{\text{твэл}}^{\text{н}} = 9,1\text{ мм}$  их количество  $n_{\text{твэл}} = 312\text{ шт.}$ , наружный диаметр канала под стержни регулирования  $d_{\text{р}}^{\text{н}} = 12,6\text{ мм}$  их количество  $n_{\text{р}} = 18\text{ шт.}$ , наружный диаметр центрального стержня под измерительный канал энерговыделения  $d_{\text{ц}}^{\text{н}} = 13,0\text{ мм}$ , количество  $n_{\text{ц}} = 1\text{ шт.}$ , размер ТВС под «ключ»  $h_{\text{кл}} = 235,0\text{ мм}$ .

**Задача № 14**

Рассчитайте эквивалентный диаметр чехловой шестигранной тепловыделяющей сборки при исходных параметрах: наружный диаметр твэла  $d_{\text{твэл}}^{\text{н}} = 9,1\text{ мм}$  их количество  $n_{\text{твэл}} = 312\text{ шт.}$ , наружный диаметр канала под стержни регулирования  $d_{\text{р}}^{\text{н}} = 12,6\text{ мм}$  их количество  $n_{\text{р}} = 18\text{ шт.}$ , наружный диаметр центрального стержня под измерительный канал энерговыделения  $d_{\text{ц}}^{\text{н}} = 13,0\text{ мм}$ , количество  $n_{\text{ц}} = 1\text{ шт.}$ , размер ТВС под «ключ»  $h_{\text{кл}} = 238,0\text{ мм}$ , толщина чехла  $\delta_{\text{твс}} = 1,5\text{ мм}$ .

**Задача № 15**

Рассчитайте эквивалентный диаметр бесчехловой квадратной тепловыделяющей сборки при исходных параметрах: наружный диаметр твэла  $d_{\text{твэл}}^{\text{н}} = 9,5\text{ мм}$  их количество  $n_{\text{твэл}} = 264\text{ шт.}$ , наружный диаметр канала под стержни регулирования  $d_{\text{р}}^{\text{н}} = 12,0\text{ мм}$  их количество  $n_{\text{р}} = 12\text{ шт.}$ , наружный диа-

метр центрального стержня под измерительный канал энерговыделения  $d_{\text{ц}}^{\text{н}}=14,0$  мм, количество  $n_{\text{ц}}=1$  шт., размер ТВС под «ключ»  $h_{\text{кл}}=230,0$  мм.

### Задача № 16

Рассчитайте эквивалентный диаметр для чехловой тепловыделяющей сборки с круглым поперечным сечением при исходных параметрах: наружный диаметр чехловой ТВС  $D_{\text{твс}}=0,053$  м, толщина чехла  $\delta_{\text{твс}}=0,001$  м. В ТВС расположены твэлы с наружным диаметром  $d_{\text{твэл}}^{\text{н}}=0,006$  м в количестве  $n_{\text{твэл}}=31$  шт., борно-бериллиевые стрежни и борные стержни с наружным диаметром  $d_{\text{бс}}^{\text{н}}=d_{\text{ббс}}^{\text{н}}=0,004$  м в количестве  $n_{\text{бс}}=n_{\text{ббс}}=3$  шт.

### Задача № 17

Рассчитайте смоченный периметр для квадратной чехловой тепловыделяющей сборки с круглым поперечным сечением при исходных параметрах: наружный диаметр чехловой ТВС  $D_{\text{твс}}=0,053$  м, толщина чехла  $\delta_{\text{твс}}=0,001$  м. В ТВС расположены твэлы с наружным диаметром  $d_{\text{твэл}}^{\text{н}}=0,006$  м в количестве  $n_{\text{твэл}}=31$  шт, борно-бериллиевые стрежни и борные стержни с наружным диаметром  $d_{\text{бс}}^{\text{н}}=d_{\text{ббс}}^{\text{н}}=0,004$  м в количестве  $n_{\text{бс}}=n_{\text{ббс}}=3$  шт.

### Задача № 18

Рассчитайте для воды коэффициент теплоотдачи при давлении 15 МПа, температуре теплоносителя на входе  $t_{\text{вх}}=290$  °С и выходе  $t_{\text{вых}}=320$  °С из активной зоны, эквивалентный диаметр ТВС  $d_{\text{э}}=0,01$  м, внешний диаметр твэла 9 мм, скорость движения теплоносителя 5 м/с. Определить термические сопротивления теплоотдачи. Как изменится коэффициент теплоотдачи если:

- 1) увеличить диаметр твэла в 2 раза;
- 2) увеличить давление теплоносителя 18 МПа,  $t_{\text{вых}}=290$  °С  $t_{\text{вх}}=320$  °С;
- 3) Увеличить температуру теплоносителя в активной зоне  $t_{\text{вх}}=295$  °С  $t_{\text{вых}}=325$  °С при давлении  $P=15$  МПа;
- 4) увеличить скорость движения потока в активной зоне в 2 раза.

### Задача № 19

Вода движется при давлении 16 МПа, температуре теплоносителя на входе  $t_{\text{вх}}=270$  °С и выходе  $t_{\text{вых}}=290$  °С из активной зоны, эквивалентный диаметр ТВС  $d_{\text{э}}=0,01$  м,  $d_{\text{твэл}}=9,5$  мм, скорость движения теплоносителя 5 м/с. Определить термические сопротивления теплоотдачи.

### Задача № 20

Определить коэффициент теплоотдачи при вынужденном движении кипящей воды в равномерно обогреваемой трубке внутренним диаметром  $d=16$  мм при следующих условиях: скорость циркуляции двухфазной смеси  $w_0=3,0$  м/с, давление  $p=0,2$  МПа, тепловая нагрузка поверхности  $q_F=8 \cdot 10^5$  Вт/м<sup>2</sup>.

**Задача № 21**

Определить тепловую нагрузку поверхности нагрева при пузырьковом кипении в большом объеме воды под давлением 3 МПа, если температура поверхности нагрева  $t_{\text{ст}} = 245^\circ\text{C}$ .

**Задача № 22**

Рассчитайте и сравните значение числа Пекле при охлаждении поверхности твэла наружным диаметром 9,6 мм жидким натрием, жидким свинцом при температуре нагрева потока  $480^\circ\text{C}$  со скоростью движения потока 3 м/с. Необходимые характеристики теплоносителя возьмите из таблицы 2.2.2 и 2.2.3.

### 3 Расчет температуры теплоносителя в активной зоне реактора

#### 3.1 Расчет температуры теплоносителя по радиусу активной зоны

Среднее значение температуры теплоносителя в ядре потока можно определить из выражения

$$\overline{t_{mn}} = t_{o\phi} - q / \alpha, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (3.1)$$

где  $\alpha$  - коэффициент теплоотдачи от стенки ТВЭЛ к жидкости, Вт/м<sup>2</sup> · °C;

$q$  - тепловая нагрузка от ТВЭЛ Вт/м<sup>2</sup>,

$t_{o\phi}$  - средняя температура наружной поверхности оболочки ТВЭЛ, °C.

#### 3.2 Расчет температуры теплоносителя по высоте активной зоны

Расчетная температура теплоносителя в наиболее нагруженной ТВС может быть определена по формуле

$$t_{mn}(z) = t_{ex} + \frac{Q_p}{2G_{az} G_p} \left( 1 + \frac{\sin \frac{\pi \cdot z}{H_{\text{эф}}}}{\sin \frac{\pi \cdot H_{az}}{2H_{\text{эф}}}} \right). \quad (3.2)$$

где  $H_{\text{эф}} = H_{az} + 2 \cdot \delta$  - эффективная высота активной зоны, м;

$H_{az}$  - высота активной зоны, м;

$\delta = 0,1$  м - торцевая эффективная добавка при наличии отражателя.

Если в формулу (3.2) подставить выражение  $Q_p = G_{az} \cdot \overline{C_p} (t_{\text{вых}} - t_{\text{ex}})$ , то тогда

$$t_{mn}(z) = t_{mn}^{\text{ex}} + \frac{t_{mn}^{\text{вых}} - t_{mn}^{\text{ex}}}{2} \left( 1 + \frac{\sin \frac{\pi \cdot z}{H_{\text{эф}}}}{\sin \frac{\pi \cdot H_{az}}{2H_{\text{эф}}}} \right). \quad (3.3)$$

Расчет максимальной температуры теплоносителя по высоте в наиболее нагруженной ТВС:

$$t_{\text{тн}}^{\text{max}}(z) = t_{mn}^{\text{ex}} + \frac{\Delta t_{mn} \cdot K_R \cdot K_{\Delta t}}{2} \left( 1 + \frac{\sin \frac{\pi \cdot z}{H_{\text{эф}}}}{\sin \frac{\pi \cdot H_{az}}{2H_{\text{эф}}}} \right), \quad (3.4)$$

где  $\Delta t_{mn} = t_{\text{вых}} - t_{\text{ex}}$  - нагрев теплоносителя в активной зоне, °C;

$t_{\text{ex}}, t_{\text{вых}}$  - температура теплоносителя на входе и выходе из активной зоны, °C;

$G_{az}$  - расход теплоносителя через активную зону, кг/с;

$\overline{C_p}$  - удельная теплоемкость, определяемая по давлению и температуре

теплоносителя в ядре потока, кДж/кг · °C;

$K_{\Delta t}$  - коэффициент, учитывающий влияние условий охлаждения топливных элементов, допуски при изготовлении, неточности расчета и другие отклонения.

Радиальный коэффициент неравномерности тепловыделений в активной зоне:

$$K_R = \frac{2,31}{1 + \frac{2\delta_3}{R_{az} + \delta_3}} \quad (3.5)$$

где  $\delta_3 = (0,6 \dots 0,8) \cdot 0,15$  м – радиальная эффективная добавка при наличии отражателя толщиной 0,15 м.

$R_{az}$  – радиус активной зоны, м.

Условие теплотехнической надежности активной зоны ЯР:  $t_{\text{тн}}^{\text{max}} < t_s$  при этом должен обеспечиваться запас до кипения  $\Delta t_s = t_s - t_{\text{тн. вых.}}^{\text{max}}$ . Нагрев теплоносителя в активной зоне  $\Delta t_{\text{тн}} = t_{\text{вых}} - t_{\text{вх}}$  определяется с учетом оптимальных термических напряжений материала оболочки твэла.

### 3.3 Расчет температуры теплоносителя на входе и выходе из активной зоны реактора

Температура теплоносителя на выходе из активной зоны реактора, °С:

$$t_{\text{вых}} = \frac{Q_p}{G_{az} \cdot C_p} + t_{\text{вх}} \quad (3.6)$$

Температура теплоносителя на входе в активную зону реактора, °С

$$t_{\text{вх}} = t_{\text{вых}} - \frac{Q_p}{G_{az} \cdot C_p} \quad (3.7)$$

Формулы расчета расхода теплоносителя через активную зону реактора с однофазным потоком теплоносителя (вода, газ, жидкий металл), кг/с:

$$G_{az} = Q_p / (i_{\text{вых}} - i_{\text{вх}}) \text{ и } G_{az} = Q_p / (C_p \cdot (t_{\text{вых}} - t_{\text{вх}})), \quad (3.8)$$

$i_{\text{вых}}$  – энтальпия теплоносителя на выходе из активной зоны реактора кДж/кг;

$i_{\text{вх}}$  – энтальпия теплоносителя на входе в активную зону реактора, кДж/кг;

$t_{\text{вых}}$  – температура теплоносителя на выходе из активной зоны реактора, °С;

$t_{\text{вх}}$  – температура теплоносителя на входе в активную зону реактора, °С;

$C_p$  – удельная изобарная теплоемкость теплоносителя кДж/кг·°С, определяемая при средних значениях температуры теплоносителя  $\bar{t} = (t_{\text{тн}}^{\text{вх}} + t_{\text{тн}}^{\text{вх}}) / 2$ .

$Q_p$  – тепловая мощность реактора, кВт.

Формулы расчета расхода теплоносителя  $G_{az}$  через активную зону реактора и одну ТВС  $G_{\text{твс}}$  с кипящим водным теплоносителем (РБМК, ВВР):

$$G_{аз} = Q_p / (i'_{вых} - i_{вх} + x \cdot r) , \text{ кг/с} \quad (3.9)$$

$$G_{\text{масс.}} = Q_p / \left[ (i'_{вых} - i_{вх} + x \cdot r) \cdot N_{\text{ТВС}} \right], \text{ кг/с} \quad (3.10)$$

### 3.4 Перечень задач с примерами их решения

#### Задача № 1

Атомная электростанция с реактором БН-600 имеет электрическую мощность 600МВт и тепловой КПД  $\eta = 41 \%$ . Расход натрия через активную зону равен  $G = 6776 \text{ кг/с}$ . Вычислить температуру натрия на выходе из активной зоны  $t_{\text{вых}}$ , если температура теплоносителя на входе  $t_{\text{вх}} = 380^\circ\text{C}$ , теплоемкость натрия  $C_p = 1270 \text{ Дж/кг}\cdot^\circ\text{C}$

#### Дано:

БН-600

$Q_{эл} = 600 \text{ МВт}$

$t_{\text{вх}} = 380^\circ\text{C}$

$C_p = 1270 \text{ Дж/кг}\cdot^\circ\text{C}$

$G = 6776 \text{ кг/с}$

**Определить:**  $t_{\text{вых}} - ?$

#### Решение

1. Определим тепловую мощность реактора:

$$Q_p = Q_{эл} / \eta_{кпд} = 600 / 0,41 = 1463 \text{ МВт.}$$

2. Определим температуру теплоносителя на выходе из активной зоны ЯР:

$$t_{\text{вых}} = \frac{Q_p}{G_{аз} \cdot C_p} + t_{\text{вх}} = \frac{1463 \cdot 10^6}{6776 \cdot 1270} + 380 = 550^\circ\text{C.}$$

**Ответ:** температура натриевого теплоносителя на выходе из активной зоны реактора  $t_{\text{вых}} = 550^\circ\text{C}$ .

#### Задача № 2

Определить расход теплоносителя в канале реактора РБМК-1000. Тепловая мощность реактора  $Q_p = 3200 \text{ МВт}$ , давление теплоносителя в активной зоне  $P = 7 \text{ МПа}$ , температура водного теплоносителя на входе в активную зону  $t_{\text{вх}} = 270^\circ\text{C}$ , паросодержание  $x = 0,145$ .

#### Дано:

РБМК-1000

$Q_{эл} = 3200 \text{ МВт}$

$$P = 7 \text{ МПа}$$

$$t_{\text{вх}} = 270 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$x = 0,145$$

**Определить:  $G_{\text{тн}}$  -?**

### Решение

1. Рассчитать величину расхода теплоносителя через активную зону

Из теплофизических таблиц 2.1 определяем характеристики теплоносителя. В РБМК-1000 на вход в ТВС подается водный теплоноситель недогретый до кипения, проходя через активную зону он нагревается до кипения, поэтому все параметры для теплоносителя на выходе из активной зоны берутся на линии насыщения при давлении  $P=7 \text{ МПа}$ , а на входе в активную зону для некипящего водного теплоносителя по давлению и температуре теплоносителя на входе в активную зону, т.е при  $P = 7 \text{ МПа}$ ,  $t = 270 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

$$i'_{\text{вых}} (P=7 \text{ МПа}) = 1267,7 \text{ кДж/кг}$$

$$i_{\text{вх}} (P=7 \text{ МПа}, t = 270^{\circ}\text{C}) = 1184,9 \text{ кДж/кг}$$

$$r_{\text{вых}} (P=7 \text{ МПа}) = 1503,7 \text{ кДж/кг}$$

$$x = 0,145$$

$$G_{\text{аз}} = Q_p / (i'_{\text{вых}} - i_{\text{вх}} + x \cdot r)$$

$$G_{\text{аз}} = 3200 \cdot 10^3 / (1267,7 - 1184,9 + 0,145 \cdot 1503,7) = 10637,0 \text{ кг/с}$$

**Ответ:** расход теплоносителя  $G_{\text{аз}} = 10637,0 \text{ кг/с}$ .

### Задача № 3

Определить расходы теплоносителя в реакторах типа ВВЭР, ВТГР, БН при мощности 3100 МВт, температурах на входе в реактор  $290 \text{ }^{\circ}\text{C}$  (ВВЭР),  $550 \text{ }^{\circ}\text{C}$  (ВТГР),  $395 \text{ }^{\circ}\text{C}$  (БН), и соответственно нагреве в реакторах  $\Delta t_{\text{ВВЭР}} = 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\Delta t_{\text{ВТГР}} = 300 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\Delta t_{\text{БН}} = 150 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

### Задача № 4

Атомная электростанция с реактором ВВЭР-1000 имеет электрическую мощность 1000МВт и тепловой КПД  $\eta = 32 \text{ } \%$ . Расход водного теплоносителя через активную зону равен  $G = 80000 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Вычислить температуру воды на выходе из активной зоны  $t_{\text{вых}}$ , если температура теплоносителя на входе  $t_{\text{вх}} = 280 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , теплоемкость воды  $C_p = 5,46 \text{ кДж/кг}\cdot^{\circ}\text{C}$ .

### Задача № 5

Определить изменение температуры теплоносителя в канале реактора РБМК, ВВЭР, БН в 7 точках по высоте активной зоны (-Н/2; -Н/3; -Н/4; 0; Н/2; Н/3; Н/4). При ВВЭР:  $t_{\text{вых}} = 320 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{\text{вх}} = 290 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P=15 \text{ МПа}$ ,  $H_{\text{аз}}=3,75 \text{ м}$ ; БН:  $t_{\text{вых}} = 550^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{\text{вх}} = 380 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P=1 \text{ МПа}$ ,  $H_{\text{аз}}=0,8 \text{ м}$ ; РБМК:  $t_{\text{вых}} = 284 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{\text{вх}} = 270 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,

$P=7\text{МПа}$ ,  $H_{\text{аз}}=7,0\text{ м}$ . Эффективную торцевую добавку при условии использования отражателя для всех реакторов принять 0,1.

### Задача № 6

Определить расход теплоносителя в канале реактора РБМК, БН, ВВЭР для ВВЭР: тепловая мощность реактора ВВЭР  $Q_p = 3000\text{МВт}$ ,  $t_{\text{вых}} = 320\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{\text{вх}} = 290\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P=15\text{МПа}$ ; БН:  $Q_p = 1470\text{ МВт}$   $t_{\text{вых}} = 550\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{\text{вх}} = 380\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P = 1\text{ МПа}$ ; РБМК:  $Q_p = 3200\text{ МВт}$   $t_{\text{вых}} = 284\text{ }^{\circ}\text{C}$   $t_{\text{вх}} = 270\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P = 7\text{МПа}$ .

### Задача №7

Определить высоту экономайзерного участка реактора типа РБМК мощностью 3000МВт. Высота активной зоны 7м, давление на входе в канал 6,5 МПа и температура питательной воды 168  $^{\circ}\text{C}$ . В реакторе 1700 каналов, в каждом 18 твэлов с наружным диаметром 13,5 мм, степень сухости пара на выходе из активной зоны 15 %, остальные параметры принять такими же, как и в реакторе РБМК-1000.

### Задача №8

Атомная электростанция с реактором PWR. Вычислить расход теплоносителя в 1 контуре, если тепловая мощность 3150 МВт, температура теплоносителя на выходе из активной зоны  $t_{\text{вых}} = 324\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а температура теплоносителя на входе в активную зону  $t_{\text{вх}}=292^{\circ}\text{C}$ , при давлении 16 МПа.

## 4 Расчет тепловыделений в активной зоне

### 4.1 Основные формулы для расчета тепловыделений

**Среднее удельное объемное тепловыделение в топливе** – средняя мощность

единицы объема топлива:  $\bar{q}_{V_T} = \frac{\psi_{ТВЭ} \cdot Q_p}{V_T} \text{ Вт/м}^3. \quad (4.1)$

**Энергонапряженность активной зоны** – средняя тепловая мощность

единицы объема активной зоны:  $\bar{q}_V^{аз} = \frac{\psi_{аз} \cdot Q_p}{V_{аз}} \text{ Вт/м}^3, \quad (4.2)$

где  $\psi_{аз} = 0.98 \div 0.99$  - доля мощности ЯР, генерируемой в активной зоне.

**Объемные тепловыделения в топливной таблетке**

$$q_{vmon} = \frac{q_l}{\pi \cdot r_{mon}^2} \text{ Вт/м}^3, \quad (4.3)$$

$r$  – радиус топливной таблетки, м.

**Средняя удельная тепловая нагрузка твэла** – тепловыделения, приходя-

щие на единицу площади поверхности твэла:  $\bar{q} = \frac{\psi_{ТВЭ} \cdot Q_p}{S_{ТВЭ} \cdot n_{ТВС} \cdot n_{ТВЭ}} \text{ Вт/м}^2, \quad (4.4)$

где  $\psi_{ТВС} = 0.96 \div 0.98$  - доля тепловой мощности а.з., генерируемой в ТВС;

$\psi_{ТВЭ} = 0.92 \div 0.95$  - доля тепловой мощности ТВС, генерируемой в твэлах;

$S_{ТВЭ} = \pi d_{ТВЭ}^H H_{аз}$  - площадь поверхности теплоотдачи одного твэла, м<sup>2</sup>;

$d_{ТВЭ}^H$  - наружный диаметр твэла, м;

$H_{аз}$  - высота активной зоны, м.

$n_{ТВС}$  - количество ТВС,  $n_{ТВЭ}$  - количество твэлов в одной ТВС.

**Средняя линейная тепловая нагрузка твэла** – тепловая мощность, снимае-

мая с единицы длины твэла:  $\bar{q}_l = \frac{\psi_{ТВЭ} \cdot Q_p}{H_{аз} \cdot n_{ТВС} \cdot n_{ТВЭ}}, \text{ Вт/м}. \quad (4.5)$

**Линейная тепловая нагрузка твэла в центре активной зоны при косинусоидальном распределении тепловыделений:**

$$q_l = \frac{\psi_{ТВЭ} \cdot Q_p \cdot K_H}{H_{аз} \cdot n_{ТВС} \cdot n_{ТВЭ}} \cos \frac{\pi \cdot z}{H_{эф}} \text{ Вт/м}. \quad (4.6)$$

**Максимальные линейные тепловыделения по высоте активной зоны при косинусоидальном распределении тепловыделений:**

$$q_l^m = \bar{q}_l(z) \cdot K_H \cdot K_R \cdot K_r \cdot K_q \cdot K_c \text{ Вт/м}, \quad (4.7)$$

### **Коэффициенты, учитывающие условия работы реактора.**

Коэффициент неравномерности тепловыделений рассчитывается как отношение максимальных значений тепловыделений к средним значениям по соответствующим координатам.

**Коэффициент неравномерности, учитывающий неравномерность тепловыделений в объеме активной зоны реактора:**

$$K_v = \frac{q_{vaz}^{\max}}{q_v} \quad (4.8)$$

$$K_v = K_H \cdot K_R \quad (4.9)$$

**Коэффициент неравномерности тепловыделений по радиусу активной зоны:**

$$K_R = \frac{2,31}{1 + \frac{2\delta_9}{R_{az} + \delta_9}} \quad (4.10)$$

$\delta_9 = (0,6 \dots 0,8) \cdot 0,15$  м – радиальная эффективная добавка при наличии отражателя толщиной 0,15 м.

**Коэффициент неравномерности тепловыделений по высоте активной зоны:**

$$K_H = \frac{1,57}{1 + \frac{2\delta_9}{H_{az} + 2\delta_9}} \quad (4.11)$$

Коэффициент неравномерности тепловыделений от ТВЭЛ по высоте активной зоны при косинусоидальном распределении энерговыделения:

$$K_H = \frac{q_l^{\max}}{q_l} \quad (4.12)$$

Таблица 4.1 - Коэффициенты неравномерности тепловыделений в ЯР

| Тип реактора | Коэффициенты неравномерности тепловыделений |          |
|--------------|---------------------------------------------|----------|
|              | $K_R$                                       | $K_H$    |
| ВВЭР         | 1,1-1,5                                     | 1,3-1,4  |
| РБМК         | 1,2-1,33                                    | 1,25-1,4 |
| БН           | 1,45                                        | 1,43     |

**Примечание. Применительно к реактору ВВЭР:**

$K_R = 1,1 \div 1,5$  - коэффициент неравномерности тепловыделений по радиусу активной зоны (для АЭС с ВВЭР-1000 для 4-годовой загрузки и без учета ошибок при перегрузке для любого момента кампании  $K_R$  не более 1,1);

$K_H = 1,3 \div 1,4$  - коэффициент неравномерности тепловыделений по высоте активной зоны (для стационарной АЭС с ВВЭР-1000  $K_H = 1,35$ );

$K_r = 1,1 \div 1,2$  - коэффициент неравномерности тепловыделений по радиусу ТВС;

$K_\phi = 1,03 \div 1,08$  - коэффициент неравномерности тепловыделений по азимуту;

$K_v = K_H \cdot K_r$  - коэффициент неравномерности тепловыделений по объему активной зоны (для АЭС с ВВЭР-1000 максимально проектный  $K_v$  с учетом всех факторов не более 2,0);

$K_q = 1,2 \div 1,3$  - коэффициент случайных отклонений теплотехнических параметров от их номинальных значений;

$K_c = 1,0 \div 1,3$  - коэффициент, учитывающий случайные отклонения параметров, влияющих на термическое сопротивление теплоотдачи и теплопроводности.

$K_{\Delta t} = 1,04$  - коэффициент, учитывающий влияние условий охлаждения топливных элементов, допуски при изготовлении, неточности расчета и другие отклонения.

## 4.2 Перечень задач с примерами их решения

### Задача № 1

Определить объемные тепловыделения в активной зоне реактора, мощностью ЯР 3000 МВт, с высотой активной зоны 3,53 м, эквивалентным диаметр активной зоны 3,12 м.

**Дано:**

$$Q_p = 3000 \text{ МВт}$$

$$H_{az} = 3,53 \text{ м}$$

$$D_{az} = 3,12 \text{ м}$$

**Определить:**  $q_{az}$  ?

### Решение

1. Определение объема цилиндрической формы активной зоны:

$$V_{az} = \pi \frac{D_{az}^2}{4} H_{az} = 3,14 \frac{3,12^2}{4} 3,53 = 26,97 \text{ м}^3.$$

2. Определение среднего значения объемного энерговыделения в активной зоне реактора:

$$\overline{q_v^{az}} = \frac{Q_p}{V_{az}} = \frac{3000 \cdot 10^3}{26,97} = 111,23 \text{ кВт/м}^3,$$

где  $Q_p$  - тепловая мощность реактора, кВт;

$V_{az}$  - объем активной зоны,  $\text{м}^3$ .

**Ответ:** средние объемные энерговыделения в активной зоне  $q_{az} = 111,23 \text{ кВт/м}^3$ .

### Задача № 2

Определить средний и максимальный удельные тепловые потоки с поверхности твэла ядерного реактора мощностью  $Q_p = 3000 \text{ МВт}$ , если в активной

зоне находится 163 ТВС и в каждой ТВС 312 твэлов. Наружный диаметр твэла 9,1 мм, высота активной зоны 3,5 м, коэффициент неравномерности тепловыделений по высоте  $K_H = 1,5$  по радиусу активной зоны  $K_R = 1,4$ .

**Дано:**

$$Q_p = 3000 \text{ МВт}$$

$$H_{аз} = 3,5 \text{ м}$$

$$n_{ТВС} = 163 \text{ шт.}$$

$$n_{ТВЭ} = 312 \text{ шт.}$$

$$d_{ТВЭ} = 9,1 \text{ мм}$$

$$K_H = 1,5$$

$$K_R = 1,4.$$

**Определить:**  $\bar{q}$  - ?  $q_{max}$  - ?

### Решение

1. Определим тепловой поток при средних значениях с единицы площади поверхности твэла

$$\bar{q} = \frac{Q_p}{\pi d_{твэл} \cdot H_{аз} \cdot n_{ТВЭ} \cdot n_{ТВС}} = \frac{3000 \cdot 10^3}{3,14 \cdot 0,091 \cdot 3,5 \cdot 312 \cdot 163} = 58,98 \text{ кВт/м}^2$$

2. Определим максимальный тепловой поток с единицы площади поверхности твэла

$$q_{max} = \frac{Q_p \cdot K_H \cdot K_R}{\pi d_{твэл} \cdot H_{аз} \cdot n_{ТВЭ} \cdot n_{ТВС}} = \frac{3000 \cdot 10^3 \cdot 1,5 \cdot 1,4}{3,14 \cdot 0,091 \cdot 3,5 \cdot 312 \cdot 163} = 123,86 \text{ кВт/м}^2.$$

**Ответ :**  $\bar{q} = 58,98 \text{ кВт/м}^2$  ;  $q_{max} = 123,86 \text{ кВт/м}^2$ .

### Задача № 3

Диаметр тепловыделяющего стержня с дисперсным ядерным топливом  $d_{ТВЭЛ} = 16 \text{ мм}$ . Удельная теплопроизводительность внутренних источников тепла, равномерно распределенных по материалу стержня,  $q_v = 1 \cdot 10^8 \text{ Вт/м}^3$ . Определить линейные значения тепловыделений от топливного стержня с одного метра длины стержня.

**Дано:**

$$d_{ТВЭЛ} = 16 \text{ мм}$$

$$q_v = 1 \cdot 10^8 \text{ Вт/м}^3$$

**Определить :**  $q_l$  - ?

## Решение

1. Определить линейные тепловыделения от топливного стержня.

$$q_l = (q_v \cdot \pi \cdot d_{\text{твэл}}^2 \cdot l) / 4 = (1 \cdot 10^8 \cdot 3,14 \cdot 0,016^2 \cdot l) / 4 = 2,01 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}$$

**Ответ:**  $q_l = 2,01 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}$ .

### Задача № 4

В активной зоне ВВЭР-1000 находится 163 ТВС, каждая ТВС состоит из 312 твэлов диаметром 9 мм, высота активной зоны 3,68 м, тепловая мощность установки 3000 МВт. Рассчитайте тепловыделения, приходящиеся на единицу длины, поверхности твэла, а также величину объемного коэффициента неравномерности тепловыделений в случае, когда мощность ЯР 3200 МВт и 3750 МВт. Обеспечивается ли теплотехническая надежность конструкции твэла, если предельная линейная тепловая нагрузка 48 кВт/м.

### Задача № 5

Определите объемные тепловыделения для активной зоны реакторов типа ВВЭР-1000, РБМК-1000, БН-1200, габариты активной зоны реакторов типа ВВЭР (высота активной зоны  $H_{\text{аз}} = 3,5 \text{ м}$ , диаметр активной зоны  $D = 3,16 \text{ м}$ ) РБМК (высота активной зоны  $H_{\text{аз}} = 7,0 \text{ м}$ , диаметр активной зоны  $D = 11,8 \text{ м}$ ), БН (высота активной зоны  $H_{\text{аз}} = 0,8 \text{ м}$ , диаметр активной зоны  $D = 2,05 \text{ м}$ ).

### Задача № 6

Рассчитать значения тепловой нагрузки для условия: в активной зоне ВВЭР-1000 находится 163 ТВС, каждая ТВС состоит из 312 твэлов диаметром 9,0 мм, высота активной зоны 3,5 м, тепловая мощность установки 3000 МВт. Как изменятся значения теплового потока:

- 1) при увеличении количества твэлов в ТВС  $n_{\text{твэ}} = 313 \text{ шт.}$ ;
- 2) при увеличении количества ТВС в активной зоне  $n_{\text{твс}} = 169 \text{ шт.}$ ;
- 3) при увеличении высоты активной зоны  $H_{\text{аз}} = 3,75 \text{ м}$ .

### Задача № 7

Для топливной таблетки диаметром 7,8 мм, рассчитать предельно допустимую линейную плотность тепловыделения, если температура в центре топливной таблетки не должна превышать  $1500^\circ\text{C}$ .

### Задача № 8

Рассчитать предельно допустимую линейную плотность тепловыделения для случаев, когда топливная таблетка выполнена из  $\text{UO}_2$ , если температура в ее центре должна быть на  $300^\circ\text{C}$  ниже температуры плавления  $2865^\circ\text{C}$ . Температура на поверхности таблетки во всех случаях составляет  $600^\circ\text{C}$ , теплопроводность диоксида урана  $0,22 \text{ кВт/м}\cdot\text{K}$ .

**Задача № 9**

Оператор ВВЭР-440 с целью теплофизического контроля активной зоны измерил температуру теплоносителя на выходе некоторых ТВС, среднюю температуру на входе в активную зону и средний перепад температуры по активной зоне. Они составили:  $t_{\text{вых}} = 306^\circ\text{C}$ ,  $t_{\text{вх}} = 267^\circ\text{C}$ ,  $\Delta t = 30^\circ\text{C}$ . Чему равен коэффициент неравномерности энерговыделения по радиусу?

**Задача № 10**

Оценить среднюю и максимальную поверхностную плотность теплового потока с поверхности твэла ядерного реактора с тепловой мощностью 4200 МВт, имеющего в активной зоне 257 ТВС, в каждой находится по 264 твэла диаметром 9,5 мм и высотой активной зоны 3810 мм. Коэффициенты неравномерности энерговыделения по радиусу активной зоны  $k_R = 1,4$ , по высоте активной зоны  $k_h = 1,7$ .

**Задача № 11**

При коэффициенте неравномерности тепловыделений по радиусу активной зоны  $k_r = 1.3$  и коэффициенте неравномерности тепловыделений по высоте активной зоны  $k_h = 1.5$  максимально допустимая мощность реактора составляет 100 МВт. Какую мощность можно получить в данном реакторе, если объемный коэффициент неравномерности тепловыделений  $k_v$  стал равным 2,3?

**Задача № 12**

Определите объем цилиндрической формы активной зоны, если диаметр активной зоны  $D_{\text{аз}} = 3,16$  м, высота активной зоны  $H_{\text{аз}} = 3,5$  м.

**Задача № 13**

Определите обогреваемый периметр твэла, если наружный диаметр твэла  $d_{\text{твэл}}^{\text{н}} = 6,9$  мм.

**Задача № 14**

Определите объем цилиндрической формы активной зоны для реактора с электрической мощностью 1000 МВт, КПД установки  $\eta = 32\%$  и объемными тепловыделениями  $q_{\text{аз}} = 107$  МВт/м<sup>3</sup>.

## 5 Расчет температуры в элементах конструкции твэла

### 5.1 Определение температуры по радиусу оболочки твэла

Перепад температур в оболочке в произвольном сечении  $z$  по высоте твэла определяется по формуле

$$\Delta t_{об}(z) = t_{об}^e(z) - t_{об}^н(z) = q_l(z) \cdot \frac{1}{2\pi\lambda_{об}} \ln \frac{d_{об}^н}{d_{об}^e}, \quad (5.1)$$

$t_{об}^н$  и  $t_{об}^e$  - температуры на наружной и внутренней поверхностях оболочки твэла, °C;

$d_{об}^н = d_{мвэ}$  - наружный диаметр оболочки твэла, м;

$d_{вн} = (d_{мвэ} - 2 \cdot \delta_{об})$  - внутренний диаметр оболочки твэла, м;

$\lambda_{об}$  - коэффициент теплопроводности материала оболочки твэла, Вт/(м·°C).

Термическое сопротивление теплопроводности оболочки твэла:

$$R_{\lambda_{об}} = \frac{1}{2\pi\lambda_{об}} \ln \frac{d_{об}^н}{d_{об}^e}. \quad (5.2)$$

Из (5.1) следует, что температурный напор в оболочке в конкретном сечении  $z$  по его высоте, где линейная тепловая нагрузка равна  $q_l(z)$ , зависит от величины коэффициента теплопроводности материала оболочки, ее толщины.

Кроме того, на перепад температур в оболочке твэла огромное влияние оказывают условия теплосъема, т.е. наличие или отсутствие отложений на поверхности твэла, теплофизические свойства теплоносителя и режим течения.

### 5.2 Определение температуры в газовом зазоре по радиусу твэла

В твэлах стержневой конструкции предусмотрен газовый зазор между топливной таблеткой и оболочкой.

Перепад температур в зазоре определяется как

$$\Delta t_z(z) = t_{тк}^н(z) - t_{об}^e(z) = \frac{q_l(z)}{2\pi\lambda_3} \ln \frac{d_{об}^e}{d_{тк}^н} = q_l(z) \cdot R_{\lambda_3}, \quad ^\circ\text{C} \quad , \quad (5.3)$$

где  $t_{тк}^н$  и  $t_{об}^e$  - температуры наружной поверхности топлива и внутренней поверхности оболочки твэла;  $d_{об}^e$  и  $d_{тк}^н$  - внутренний диаметр оболочки и наружный диаметр топливной таблетки.

Термическое сопротивление теплопроводности в газовом зазоре

$$R_{\lambda_3} = \frac{1}{2\pi\lambda_3} \ln \frac{d_{об}^e}{d_{тк}^н} \quad (\text{м} \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}. \quad (5.4)$$

Перепад температур между центром сплошного блока топлива и поверхностью твэла, складывается из перепадов температур в блоке топлива, в зазоре и оболочке

$$t_{тк0} - t_{об}^н = q_l(R_{\lambda_{тк}} + R_{\lambda_3} + R_{\lambda_{об}}) \quad ^\circ\text{C}. \quad (5.5)$$

Термическое сопротивление теплопроводности в блоке топлива:

$$R_{\lambda_T} = \frac{1}{4\pi\lambda_{TK}} \text{ (м}^\circ\text{C)/Вт,} \quad (5.6)$$

$\lambda_{TK}$  - теплопроводность топлива, Вт/(м· К).

В радиальном направлении в топливе температура изменяется по параболическому закону, в зазоре и оболочке - по логарифмическому.

### 5.3 Определение температуры по радиусу топливной таблетки

Перепад температур по радиусу топливной таблетки:

$$\Delta t_{TK}(z) = \frac{1}{4\pi\lambda_{TK}} q_l(z) = R_{\lambda_{TK}} \cdot q_l(z), \text{ }^\circ\text{C} . \quad (5.7)$$

Линейное термическое сопротивление теплопроводности сплошной топливной таблетки (без осевого отверстия):

$$R_{\lambda_{TK}} = \frac{1}{4\pi\lambda_{TK}}, \text{ м}^\circ\text{C/Вт.} \quad (5.8)$$

Линейное термическое сопротивление теплопроводности цилиндрической таблетки с осевым отверстием диаметром  $d_o$  в ней:

$$R_{\lambda_{mon}}(z) = \frac{1}{4\pi \cdot \lambda_{mon}} \left( 1 - \frac{2d_o^2}{d_{mon}^2 - d_o^2} \ln \frac{d_{mon}}{d_o} \right) \text{ м}^\circ\text{C/Вт,} \quad (5.9)$$

$d_{top}$  - наружный диаметр топливной таблетки, м;

$d_o$  - диаметр отверстия в топливной таблетке, м.

### 5.4 Последовательность расчета температур в элементах конструкции твэла по его высоте

Для определения температурного поля твэла необходимо знать мощность ЯР, задаться функцией распределения тепловыделений по высоте активной зоны, рассчитать линейную тепловую нагрузку и определить температуру теплоносителя. Затем последовательно рассчитать температуру в оболочке твэла, в газовом зазоре и, наконец, температуру в блоке ядерного топлива.

#### 5.4.1 Определение линейной тепловой нагрузки по высоте твэла

Расчет средней линейной тепловой нагрузки твэла:

$$\bar{q}_l = \frac{\psi_{ТВЭ} \cdot Q_p}{H_{аз} \cdot n_{TBC} \cdot n_{мвэ}} \text{ Вт/м.} \quad (5.10)$$

Расчет средней линейной тепловой нагрузки твэла в центре активной зоны при косинусоидальном распределении тепловыделений:

$$q_l = \frac{\psi_{ТВЭ} \cdot Q_p \cdot K_H}{H_{аз} \cdot n_{TBC} \cdot n_{мвэ}} \cos \frac{\pi \cdot z}{H_{эф}} \text{ Вт/м,} \quad (5.11)$$

$H_{эф} = H_{аз} + 2\delta$  - эффективная высота активной зоны, с учетом применения отражателя, м;

$\delta = 0,1$  м – толщина отражателя;  $H_{аз}$  – высота активной зоны, м;

$K_H$  - коэффициент неравномерности тепловыделений по высоте активной зоны (аксиальный коэффициент неравномерности тепловыделений).

Расчет максимальной линейной тепловой нагрузки ТВЭЛ в центре активной зоны при косинусоидальном распределении тепловыделений:

$$q_l^M = \bar{q}_l(z) \cdot K_H \cdot K_R \cdot K_r \cdot K_q \cdot K_c, \quad (5.12)$$

$K_R$  - коэффициент неравномерности тепловыделений по радиусу активной зоны;

$K_H$  - коэффициент неравномерности тепловыделений по высоте активной зоны;

$K_r$  - коэффициент неравномерности тепловыделений по радиусу ТВС;

$K_q$  - коэффициент случайных отклонений теплотехнических параметров от их номинальных значений;

$K_c$  - коэффициент, учитывающий случайные отклонения параметров, влияющих на термическое сопротивление теплоотдачи и теплопроводности.

#### 5.4.2 Определение температуры теплоносителя в ТВС по высоте

Расчетная температура теплоносителя в наиболее нагруженной ТВС по высоте:

$$t_{mn}(z) = t_{mn}^{ex} + \frac{t_{mn}^{вых} - t_{mn}^{ex}}{2} \left( 1 + \frac{\sin \frac{\pi \cdot z}{H_{эф}}}{\sin \frac{\pi \cdot H_{a3}}{2H_{эф}}} \right), \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (5.13)$$

Расчет максимальной температуры теплоносителя по высоте в наиболее нагруженной ТВС:

$$t_{тн}^{max}(z) = t_{mn}^{ex} + \frac{\Delta t_{mn} \cdot K_R \cdot K_{\Delta t}}{2} \left( 1 + \frac{\sin \frac{\pi \cdot z}{H_{эф}}}{\sin \frac{\pi \cdot H_{a3}}{2H_{эф}}} \right), \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (5.14)$$

где  $K_{\Delta t}$  - коэффициент, учитывающий влияние условий охлаждения топливных элементов, допуски при изготовлении, неточности расчета и другие отклонения;

$K_R$  - коэффициент неравномерности тепловыделений по радиусу активной зоны;

$\Delta t_{mn} = t_{вых} - t_{ex}$  - нагрев теплоносителя в активной зоне.

Число  $\pi$  в формулу (5.13), (5.14) подставляется в радианах. Это решение дифференциального уравнения, где  $\sin$  появился при интегрировании  $\cos$ .

#### 5.4.3 Определение температуры в топливной таблетке, газовом зазоре, оболочке по высоте ТВЭЛ

Температура наружной поверхности оболочки ТВЭЛ по высоте:

$$t_{оо}^n(z) = t_{mn}(z) + R_\alpha(z) \cdot q_l(z). \quad (5.15)$$

Температура теплоносителя  $t_{mn}(z)$  определяется по формуле (5.13), термическое сопротивления теплоотдачи  $R_\alpha(z)$  по формуле (5.16), линейная тепловая нагрузка  $q_l$  по формуле (5.10).

Термическое сопротивление теплоотдачи

$$R_{\alpha}(z) = \frac{1}{\alpha(z) \cdot \pi \cdot d_{\text{мезл}}} \quad (\text{м} \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}, \quad (5.16)$$

где  $\alpha$  - коэффициент теплоотдачи от оболочки твэла к теплоносителю,  $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ ;  
 $d_{\text{твэ}}$  - наружный диаметр твэла, м.

Температура внутренней поверхности оболочки твэла по высоте:

$$t_{\text{об}}^{\text{вн}}(z) = t_{\text{мн}}(z) + (R_{\alpha}(z) + R_{\lambda\text{об}}(z)) \cdot q_l(z). \quad (5.17)$$

Термическое сопротивление оболочки твэла  $R_{\lambda\text{об}}(z)$  определяется по формуле (5.18), теплопроводность оболочки твэла  $\lambda_{\text{об}}(z)$  рассчитывается по формулам указанным (п.5.5.1, п.5.5.2) по температуре наружной оболочки твэла с учетом используемого материала оболочки твэла (циркониевый сплав, аустенитная нержавеющая сталь).

Величина термического сопротивления теплопроводности оболочки твэла

$$R_{\lambda\text{об}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{\text{об}}(z)} \cdot \ln \frac{d_{\text{н}}}{d_{\text{вн}}} \quad (\text{м} \cdot ^\circ\text{C})/\text{кВт}, \quad (5.18)$$

где  $\lambda_{\text{об}}(z)$  - коэффициент теплопроводности материала оболочки в сечении  $z$ ,  $\text{кВт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ;

$d_{\text{н}} = d_{\text{мез}}$  - наружный диаметр оболочки твэла, м;

$d_{\text{вн}} = (d_{\text{мез}} - 2\delta_{\text{об}})$  - внутренний диаметр оболочки твэла, м;

$\delta_{\text{об}}$  - толщина оболочки твэла, м.

Температура на поверхности блока топлива по высоте твэла:

$$t_{\text{мон}}^{\text{н}}(z) = t_{\text{об}}^{\text{вн}}(z) + R_{\lambda\text{з}}(z) \cdot q_l(z)$$

или

$$t_{\text{мон}}^{\text{н}}(z) = t_{\text{мн}}(z) + (R_{\alpha}(z) + R_{\lambda\text{об}}(z) + R_{\lambda\text{з}}(z)) \cdot q_l(z), ^\circ\text{C} \quad (5.19)$$

Определение термического сопротивления газового зазора

$$R_{\lambda\text{з}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{\text{з}}} \cdot \ln \frac{d_{\text{вн}}}{d_{\text{мон}}} \approx \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{\text{з}}} \cdot \frac{\delta_{\text{з}}}{r_{\text{з}}}, \quad (\text{м} \cdot ^\circ\text{C})/\text{кВт} \quad (5.20)$$

где  $\lambda_{\text{з}}$  - теплопроводность газового зазора,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$  ;

$d_{\text{мон}} = d_{\text{мез}} - 2(\delta_{\text{об}} + \delta_{\text{з}})$  - диаметр таблетки ядерного топлива, м;

$d_{\text{мез}}$  - наружный диаметр твэла, м;  $\delta_{\text{об}}$ ,  $\delta_{\text{з}}$  - толщина оболочки твэла и газового зазора, м;

$r_{\text{з}} = (d_{\text{вн}} - \delta_{\text{з}})/2$  - средний радиус зазора, м;

$d_{\text{вн}}$  - внутренний диаметр оболочки твэла, м.

Толщина зазора между топливом и оболочкой твэла принимается с учётом температурных расширений топлива в твэле в процессе эксплуатации ядерного реактора. Зазор заполняют гелием, обладающим по сравнению с другими га-

зами наибольшей теплопроводностью, данное свойство используется для передачи тепла от топливной таблетки к оболочке.

Теплопроводность газового зазора  $\lambda_z(z)$ , берется по температуре на внутренней поверхности оболочки твэла из таблицы 5.4 или рассчитывается по рассчитывается по формулам, указанным (п.5.5.3)

Температура в центре топливного блока по высоте твэла:

$$t_{mon}^{en}(z) = t_{mon}^n(z) + R_{\lambda_{mon}}(z) \cdot q_l(z) \text{ или}$$

$$t_{mon}^{en}(z) = t_{mn}(z) + (R_{\alpha}(z) + R_{\lambda_{об}}(z) + R_{\lambda_z}(z) + R_{\lambda_{mon}}(z)) \cdot q_l(z) \text{ }^{\circ}\text{C} . \quad (5.21)$$

Термическое сопротивление в топливе определяется по формуле (5.8) или (5.9), теплопроводность топлива  $\lambda_{тк}(T)$ , рассчитывается по формулам указанным (п.5.5.4) по температуре топлива на поверхности топливного блока с учетом используемого вида ядерного топлива (диоксид урана, уран-гадолиниевое топливо, моx-топливо).

#### **5.4.4 Определение координаты с максимальной температурой в ядерном топливе и на поверхности твэла по высоте активной зоны**

Координата ( $z_{m.об.}$ ), в которой нагрев внутренней оболочки твэла будет максимальным

$$z_{m.об} = \frac{H_{\text{эф}}}{\pi} \arctg \frac{H_{\text{эф}} \cdot n_{\text{ТВЭ}}}{\pi \cdot G_{\text{ТН}} \cdot \bar{C}_p \cdot (R_{\alpha} + R_{\lambda_{об}})} \quad (5.22)$$

Максимальная температура материала оболочки твэла, определяемая в координате  $z_m = z_{m.об.}$

$$t_{об}^{sym.max}(z_m) = t_{mn}(z_m) + 1.82(R_{\alpha} + R_{\lambda_{об}}) \cdot q_l(z_m) \quad (5.23)$$

1.82 – коэффициент отклонения максимальная относительная величина отклонения температуры оболочки твэла от номинального значения (фактор перегрева).

Тепловыделения в координате  $z_m$ :

$$q_l(z_m) = \frac{Q_p \cdot K_R \cdot K_H \cdot K_r \cdot K_c}{n_{мес} \cdot n_{мгз} \cdot H_{аз}} \cos\left(\frac{\pi \cdot z}{H_{\text{эф}}}\right) \quad (5.24)$$

Координата, в которой нагрев ядерного топлива по высоте твэла будет максимальным

$$z_{m.mon} = \frac{H_{\text{эф}}}{\pi} \arctg \frac{H_{\text{эф}} \cdot n_{\text{ТВЭ}}}{\pi \cdot G_{\text{ТН}} \cdot \bar{C}_p \cdot (R_{\alpha} + R_{\lambda_{об}} + R_{\lambda_z} + R_{\lambda_{mon}})} . \quad (5.25)$$

Максимальная температура ядерного топлива, определяемая в координате  $z_{\text{м.топ.}}$

$$t_{\text{мон}}^{\text{max}}(z_{\text{м.топ}}) = t_{\text{об}}^{\text{эпм}}(z_{\text{м}}) + 1.65(R_{\lambda z} + R_{\lambda \text{мон}}) \cdot q_1(z_{\text{м}}) \quad (5.26)$$

1.65 – коэффициент отклонения максимальной относительной величина отклонения температуры ядерного топлива от номинального значения

Тепловыделения в координате  $z_{\text{м.топ}}$ :

$$q_1(z_{\text{м}}) = \frac{Q_p \cdot K_R \cdot K_H \cdot K_r \cdot K_c}{n_{\text{мес}} \cdot n_{\text{мез}} \cdot H_{\text{аз}}} \cos\left(\frac{\pi \cdot z_{\text{м}}}{H_{\text{эф}}}\right). \quad (5.27)$$

Температура нагрева внутренней поверхности оболочки твэла в координате  $z_{\text{м.}}$ :

$$t_{\text{об}}^{\text{эпм}}(z_{\text{м}}) = t_{\text{тн}}(z_{\text{м}}) + (R_{\alpha} + R_{\lambda \text{об}}) \cdot \frac{Q_p \cdot K_R \cdot K_H \cdot K_r \cdot K_c}{n_{\text{мес}} \cdot n_{\text{мез}} \cdot H_{\text{аз}}} \cos\left(\frac{\pi \cdot z}{H_{\text{эф}}}\right). \quad (5.28)$$

## 5.5 Материалы, применяемые в конструкции тепловыделяющего элемента

Необходимое условие обеспечения теплотехнической надежности активной зоны ЯР - максимальные температуры топлива, оболочки твэла должны быть меньше предельно допустимых значений, которые устанавливаются, исходя из требований безопасной эксплуатации ЯЭУ, предельно допустимые значения температур меньше температуры плавления для соответствующего материала по топливу и оболочки твэла.

### 5.5.1 Свойства аустенитных нержавеющей сталей

В ЯЭУ широко используются нержавеющей хромникелевые (аустенитные) стали марки 08X18H10T, 12X18H9T, 12X18H10T (таблица 5.1) и (таблица 5.2). Эти стали являются основным конструкционным материалом для изготовления узлов ЯЭУ (внутрикорпусных устройств, теплообменников, парогенераторов, насосов, а также используются в качестве материала оболочки твэлов, например, в судовых ВВЭР). На АЭС с реакторами типа ВВЭР в качестве материала оболочки твэла используются циркониевые сплавы Э-110 и Э-635. Сравнивая свойства материалов оболочек твэла, можно сказать следующее: нержавеющей стали обладают хорошей теплопроводностью, выдерживают более высокие температуры до 550 °С, чем циркониевые сплавы 355 °С, однако сечение захвата тепловых нейтронов у нержавеющей сплавов выше  $2,88 \cdot 10^{-24} \text{ см}^2$ , чем у циркониевых сплавов  $0,178 \cdot 10^{-24} \text{ см}^2$ .

Таблица 5.1 - Свойства аустенитных сталей 08X18H10T, 12X18H9T, 12X18H10T [3]

| $T, ^\circ\text{C}$ | $T, \text{K}$ | 08X18H10T         |                      |                                           |                             | 12X18H9T, 12X18H10T |                      |                                           |
|---------------------|---------------|-------------------|----------------------|-------------------------------------------|-----------------------------|---------------------|----------------------|-------------------------------------------|
|                     |               | $c_p,$<br>Дж/кг·К | $\lambda,$<br>Вт/м·К | $\alpha \cdot 10^6,$<br>м <sup>2</sup> /с | $\alpha \cdot 10^6,$<br>1/К | $c_p,$<br>Дж/кг·К   | $\lambda,$<br>Вт/м·К | $\alpha \cdot 10^6,$<br>м <sup>2</sup> /с |
| 300                 | 573           | 537               | 18,7                 | 4,47                                      | 17,2                        | 531                 | 18,9                 | 17,4                                      |
| 400                 | 673           | 558               | 19,4                 | 4,50                                      | 17,7                        | 553                 | 20,5                 | 17,8                                      |
| 500                 | 773           | 579               | 20,1                 | 4,51                                      | 18,2                        | 574                 | 21,8                 | 18,2                                      |
| 600                 | 873           | 600               | 20,8                 | 4,53                                      | 18,7                        | 594                 | 23,5                 | 18,6                                      |
| 700                 | 973           | 622               | 22,2                 | 4,70                                      | 19,2                        | 614                 | 24,7                 | 19,1                                      |
| 800                 | 1073          | 643               | 23,4                 | 4,83                                      | 19,7                        | 634                 | 26,4                 | 19,4                                      |
| 900                 | 1173          | 664               | 24,8                 | 5,00                                      | 20,2                        | 655                 | 28,5                 | 20,0                                      |
| 1000                | 1273          | 685               | 26,1                 | 5,15                                      | 20,7                        |                     |                      |                                           |
| 1100                | 1373          | 706               | 27,5                 | 5,30                                      | 21,1                        |                     |                      |                                           |
| 1200                | 1473          | 727               | 28,9                 | 5,46                                      | 21,6                        |                     |                      |                                           |

$c_p$ , - теплоемкость, Дж/кг·К;  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности, Вт/м·К;  $\alpha$  - коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с;  $\alpha$  - коэффициент температурного расширения, 1/К.

Таблица 5.2 - Теплопроводность нержавеющей стали,  $\lambda$  (Вт/м·К)

| $T, \text{K}$ | Сталь X18H9T | Сталь ЭИ993 | Сталь 4X13 | Сталь 1X12B2МФ |
|---------------|--------------|-------------|------------|----------------|
| 300           | 14,5         | 33,2        | 33         | 31,2           |
| 400           | 16,5         | 33,3        | 33,1       | 31,5           |
| 500           | 17,5         | 33,4        | 33,3       | 32,1           |
| 600           | 18,5         | 33,5        | 33,6       | 32,5           |
| 700           | 20           | 33,6        | 33,6       | 32,8           |
| 800           | 21,5         | 33,2        | 33,5       | 33             |
| 900           | 23           | 32,1        | 33,2       | 33,1           |
| 1000          | 25           | 31,6        | 33         | 33,4           |
| 1200          | 25,8         | 30,8        | 32         | 33             |
| 1400          | 28           | 30          | 31,5       | 32,1           |

### 5.5.2 Свойства циркониевых сплавов

Коэффициент теплопроводности оболочки твэла из циркониевого сплава для Э-110 при  $T \leq 1100\text{K}$  определяется по формуле [3]

$$\lambda_{об} \approx 23.5 - 0.0192T + 1.68 \cdot 10^{-5}T^2 \text{ Вт/м·К}, \quad (5.29)$$

где  $T$  - температура наружной оболочки твэла в Кельвинах.

Таблица 5.3 - Свойства циркониевого сплава Н-1 (Э110) [3]

| $T, \text{K}$ | $\rho, \text{кг/м}^3$ | $c_p, \text{Дж/кг·К}$ | $\lambda, \text{Вт/м·К}$ | $\alpha \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$ | $\alpha \cdot 10^6, 1/\text{К}$ | $\rho_{эл} \cdot 10^8, \text{Ом·м}$ |
|---------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------|------------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|
| 300           | 6550                  | 286                   | 19.3                     | 10.3                                     | 5.77                            | 51                                  |
| 400           | 6522                  | 302                   | 18.5                     | 9.4                                      | 5.95                            | 66                                  |
| 500           | 6493                  | 318                   | 18.1                     | 8.8                                      | 6.13                            | 79                                  |
| 600           | 6464                  | 333                   | 18.0                     | 8.4                                      | 6.31                            | 90                                  |
| 700           | 6436                  | 349                   | 18.3                     | 8.1                                      | 6.49                            | 101                                 |
| 800           | 6407                  | 365                   | 18.9                     | 8.1                                      | 6.68                            | 112                                 |
| 900           | 6379                  | 381                   | 19.8                     | 8.2                                      | 6.86                            | 123                                 |
| 1000          | 6350                  | 397                   | 21.1                     | 8.4                                      | 7.04                            | 136                                 |
| 1100          | 6321                  | 413                   | 22.7                     | 10.1                                     | 7.22                            | 150                                 |
| 1200          | 6293                  | 360                   | 25.5                     | 11.2                                     | -                               | 116                                 |

Температура плавления циркониевого сплава Э110 - 2130 К.

Температура фазового превращения - 1140 К.

Скрытая теплота плавления - 150÷160 кДж/кг.

Теплота фазового превращения - 42 кДж/кг.

Плотность при 298 К – 6550 кг/м<sup>3</sup>.

Плотность при  $T \leq 1100$  К:  $\rho(T) \approx 6636 - 0.286T$  кг/м<sup>3</sup>.

**Теплоемкость:**

- при  $T \leq 1100$  К  $c_p \approx 238 + 0.159T$  Дж/кг·К;

- при  $1100 \leq T \leq 2000$  К  $c_p \approx 281 + 0.0663T$  Дж/кг·К.

**Коэффициент теплопроводности:**

- при  $T \leq 1100$  К  $\lambda \approx 23.5 - 0.0192T + 1.68 \cdot 10^{-5}T^2$  Вт/м·К;

- при  $1100 \leq T \leq 2000$  К  $\lambda \approx 1.5 + 0.02T$  Вт/м·К.

**Коэффициент температуропроводности**

- определяется по формуле  $a = \lambda / (c_p \cdot \rho)$ , м<sup>2</sup>/с.

**Коэффициент линейного расширения**

- при  $300 \leq T \leq 1100$  К  $\alpha \cdot 10^6 (1/K) \approx 5.22 + 1.82 \cdot 10^{-3}T$ .

### **Циркониевый сплав Э-635**

**Циркониевый сплав Э635** - содержит 1%Nb, 1.25%Sn и 0.5%Fe.

Температура плавления циркониевого сплава Э635 – 2130 К,

Скрытая теплота плавления - 150÷160 кДж/кг

Плотность при 20 °С  $\rho = 6530$  кг/м<sup>3</sup>

**Температуры фазовых превращений:**

$\alpha \rightarrow (\alpha + \beta)$  630÷650 °С

$(\alpha + \beta) \rightarrow \beta$  880÷910 °С

**Коэффициент теплопроводности**

- при  $400 \leq T \leq 1500$  К  $\lambda = 10.583 + 348T^{-1} + 1.04 \cdot 10^{-4}T + 8.735 \cdot 10^{-6}T^2$ ;

- до облучения  $\lambda = 13.1 + 1.6 \cdot 10^{-2}(T - 273)$  Вт/м·К;

- после облучения  $\lambda = 13.1 + 5.5 \cdot 10^{-3}(T - 273)$  Вт/м·К.

### **5.5.3 Материалы, используемые в газовом зазоре твэла**

Газовый зазор при изготовлении твэлов обычно заполняется гелием, так как гелий обладает наивысшей теплопроводностью среди используемых газов в ядерной энергетике. Кроме того, он обладает высокой текучестью, что позволяет контролировать герметичность конструкции твэла. В ВВЭР гелий под оболочку твэла вводится под давлением 2 МПа, при работе ядерного реактора на номинальной мощности давление увеличивается до 4.1 МПа.

Таблица 5.4 - Коэффициент теплопроводности смеси гелия (86 %), ксенона (12 %), криптона (2 %), находящихся в зазоре под оболочкой твэла реакторов ВВЭР  $\lambda$ , Вт/м·К;  $T = t + 273$ , К [3]

| $T, K$    | 373   | 473   | 573   | 673   | 773   | 873   | 1073  | 1473  |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\lambda$ | 0,174 | 0,209 | 0,242 | 0,270 | 0,297 | 0,323 | 0,372 | 0,423 |

Значения коэффициента теплопроводности гелия в зависимости от изменения температуры можно определить по формуле

$$\lambda_{\text{не}} = 0,146 + 3,339 \cdot 10^{-4} \cdot t_{\text{вн.об}}(z) - 4,219 \cdot 10^{-8} \cdot t_{\text{вн.об}}(z)^2, \text{ Вт/(м} \cdot ^\circ\text{C)}, \quad (5.30)$$

где  $t_{\text{вн.об}}$  - температура оболочки на внутренней поверхности твэла,  $^\circ\text{C}$ .

### 5.5.4 Теплофизические характеристики ядерного топлива

#### Определение коэффициента теплопроводности топлива для $\text{UO}_2$

Температурная зависимость коэффициента теплопроводности  $\text{UO}_2$  [3]:

$$\lambda(T) \approx \frac{5500}{560 + T} + 0,942 \cdot 10^{-10} T^3 \text{ Вт/(м} \cdot \text{K)}, \quad (5.31)$$

где  $T$  - температура топлива на наружной поверхности топливной таблетки, К.

Фактически теплопроводность диоксида урана  $\text{UO}_2$  зависит от температуры топлива, стехиометрического состава, плотности и глубины выгорания.

При небольших отклонениях от стехиометрии ( $\text{O/U} = 2,0 \div 2,15$ ) коэффициент теплопроводности  $\text{UO}_2$  может быть рассчитан по формуле

$$\lambda_{\text{cm}} = \frac{4820}{351 + T} + 2,434 \cdot 10^{-14} T^4, \frac{Bm}{\text{м} \cdot \text{K}}. \quad (5.32)$$

Для расчета теплопроводности *облученного* твердого  $\text{UO}_2$  с плотностью 95 % теоретической рекомендуется следующее соотношение:

$$\lambda = [0,1148 + 0,0035B + 2,475 \cdot 10^{-4} (1 - 0,00333B) t]^{-1} + 0,0132e^{0,00188 t}, \quad (5.33)$$

где  $t = t_{\text{н.топ}}$  - локальная температура топлива на поверхности топливной таблетки,  $^\circ\text{C}$ ;  $B$  - выгорание топлива в (МВт·сут)/кг до 75 (МВт·сут)/кг,  $\lambda$  - теплопроводность топлива, Вт/(м· $^\circ\text{C}$ ).

#### Определение коэффициента теплопроводности топлива для $(\text{UO}_2 + \text{Cd}_2\text{O}_3)$

$$\lambda_{(\text{UO}_2 + \text{Cd}_2\text{O}_3)} = \frac{1}{a \cdot t + b}, \text{ Вт/(м} \cdot ^\circ\text{C)}, \quad (5.34)$$

где  $\lambda_{(\text{UO}_2 + \text{Cd}_2\text{O}_3)}$  - коэффициент теплопроводности диоксида урана с выгорающим поглотителем триоксидом гадолиния, Вт/(м· $^\circ\text{C}$ ),  $t = t_{\text{н.топ}}$  - локальная температура топлива на поверхности топливной таблетки,  $^\circ\text{C}$ ;  $a, b$  - функции от концентрации  $\text{Cd}_2\text{O}_3$ , значения которых указаны в таблице 5.5

Таблица 5.5 – Значения коэффициента теплопроводности от концентрации выгорающего поглотителя гадолиния, значения функции

| $\text{UO}_2 + \text{Cd}_2\text{O}_3$ | $a$                      | $b$                      |
|---------------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 0,0                                   | $2,327330 \cdot 10^{-4}$ | $1,180229 \cdot 10^{-1}$ |
| 0,03                                  | $2,131412 \cdot 10^{-4}$ | $1,732423 \cdot 10^{-1}$ |
| 0,057                                 | $1,996481 \cdot 10^{-4}$ | $2,069985 \cdot 10^{-1}$ |
| 0,085                                 | $1,961735 \cdot 10^{-4}$ | $2,342200 \cdot 10^{-1}$ |

По значениям температуры теплоносителя, линейной тепловой нагрузки и величинам термических сопротивлений, рассчитываются температуры топлива на оси и поверхности при расчетных и максимальных значениях линейной тепловой нагрузки.

**Определение коэффициента теплопроводности МОХ-топлива, изготовленного из оксидов урана и плутония ( $\text{UO}_2 + \text{PuO}_2$ ), Вт/(м<sup>2</sup>·К) [2]:**

$$\lambda_{\text{мох}}(z) = 1.528 \cdot \sqrt{10^{-4} + 0.00931} - 0.1055 + 2.885 \cdot 10^{-4} T^{-1} + 76.38 \cdot 10^{-12} T^3, \quad (5.35)$$

$T = t_{\text{мон}}^n(z) + 273,15$  - температура топлива на поверхности, К.

## 5.6 Характеристики ядерных реакторов и ТВС

Таблица 5.6 - Характеристики основных типов ТВС ядерных реакторов

| Тип                                                     | ВВЭР-210      | ВВЭР-440            | ВВЭР-1000     | PWR<br>фирмы<br>Siemens | PWR<br>фирмы<br>Westinghouse | БН-600        | РБМК-1000                                              |
|---------------------------------------------------------|---------------|---------------------|---------------|-------------------------|------------------------------|---------------|--------------------------------------------------------|
| Электрическая мощность, МВт                             | 210           | 440                 | 1000          | 1371                    | 1150                         | 600           | 3200                                                   |
| Тепловая мощность, МВт                                  | 760           | 1375                | 3000          | 3765                    | 3425                         | 1500          | 1000                                                   |
| КПД (брутто), %                                         | 27,6          | 32                  | 33,3          | 36,4                    | 33,6                         |               | 31,8-29,9                                              |
| Вид теплоносителя                                       | вода          | вода                | вода          | вода                    | вода                         | натрий        | Кипящая вода. Массовое паросодержание потока $x=0,145$ |
| Вид замедлителя                                         | вода          | вода                | вода          | вода                    | вода                         | нет           | Графитовые блоки стороной 250х250мм                    |
| Максимальная температура нагрева замедлителя, °С        |               |                     |               |                         |                              |               | Для графита 750                                        |
| Диаметр активной зоны, м                                | 2,88          | 2,88                | 3,12(3,16)    | 3,605                   | 3,4                          | 2,05          | 11,8                                                   |
| Высота активной зоны, м                                 | 2,5           | 2,5                 | 3,53          | 3,9                     | 3,66                         | 0,75          | 7                                                      |
| Давление в теплоносителя, МПа                           |               | 12,5                | 15,7          | 15,5                    | 15,5                         | 1,0           | 7,8-8,5                                                |
| Давление пара, МПа                                      | 2,9           | 4,4                 | 6,0           | 6,23                    | 6,76                         | 14            | 6,4-6,8                                                |
| Тем-ра воды на входе в а.з., °С                         | 250           | 269                 | 289           | 291,3                   | 291,8                        | 380           | 265-270                                                |
| Тем-ра воды на выходе из а.з. °С                        | 269           | 300                 | 322           | 326,1                   | 325                          | 550           | 284-289                                                |
| Расход теплоносителя м <sup>3</sup> /ч                  | 36500         | 39000               | 80000         | 67680                   | 64400                        | 24000т/ч      |                                                        |
| Кол-во контуров циркуляции радиоактивного теплоносителя | 6             | 6                   | 4             | 4                       | 4                            | 3             | 2                                                      |
| Число ТВС в а.з., шт                                    | 343           | 349                 | 163           | 193                     | 193                          | 370           | 1693                                                   |
| Ср. уд. тепловыделение в а.з., МВт/м <sup>3</sup>       | 46,7          | 84,5                | 107,5         | 94,6                    | 103,1                        |               | 4,0                                                    |
| Форма ТВС                                               | Шести-гранник | Шести-гранник       | Шести-гранник | квадрат                 | квадрат                      | Шести-гранник | Круглое сечение                                        |
| Наличие чехла у ТВС                                     | есть, плотная | есть, с перфорацией | нет           | нет                     | нет                          | есть          | есть                                                   |

Продолжение таблицы 5.6

|                                                                                     |                 |                 |                  |                 |                 |                                                     |                                                                                                                 |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------|------------------|-----------------|-----------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Размер ТВС под ключ, мм/ толщина чехла, мм                                          |                 | 144/-           | 234/-            | 229/-           | 215/-           | 96/2                                                | Наружный Диаметр трубы 0,088м, внутренний диаметр трубы 0,08м, толщина чехла 0,004 м под расположение в ней ТВС |
| Число стержней в ТВС                                                                |                 | 127             | 331              | 324             | 212             |                                                     |                                                                                                                 |
| Число твэлов                                                                        |                 | 120             | 312              | 300             | 204             | 127                                                 | 18+18                                                                                                           |
| Шаг решетки твэлов, мм                                                              |                 | 12,6            | 12,75            | 12,7            | 14,3            |                                                     |                                                                                                                 |
| Шаг решетки ТВС, мм                                                                 |                 | 146             | 236              | 231             | 217             | 98                                                  | 250                                                                                                             |
| Обогащение топлива, %                                                               |                 | 3,3             | 2,2/3,3/4,4      | 1,9/2,5/3       | 3,2             | До 30                                               | До3                                                                                                             |
| <b>Характеристики твэла:</b>                                                        |                 |                 |                  |                 |                 |                                                     |                                                                                                                 |
| Высота $H_{\text{твэ}}$ , мм                                                        |                 | 2500            | 3530(3680)       | 3900            | 3660            |                                                     | 2х3500                                                                                                          |
| Оболочка твэла: $\varnothing/\delta$ , мм                                           | 9,1/0,65        | 9,1/0,65        | 9,1/0,65         | 9,5/0,64        | 10,7/0,61       | 6,9/0,4                                             | 13,5/0,9                                                                                                        |
| Материал оболочки твэла                                                             | Э-110 (Zr-1%Nb) | Э-110 (Zr-1%Nb) | Э-110 (Zr-1%Nb)  | Э-110 (Zr-1%Nb) | Э-110 (Zr-1%Nb) | Нерж. Сталь ЧС-68хд                                 | (Zr-2,5%Nb)                                                                                                     |
| Максимальная температура оболочки, °С                                               | 355             | 352             | 355              | 350             | 355             | 700                                                 | 295                                                                                                             |
| Средняя (максимальная) линейная тепловая нагрузка твэла, кВт/м                      |                 | 12.96(42,0)     | 16(44,8)         | 16(44,8)        | 16(44,8)        | (48,0)                                              | (410вт/см)                                                                                                      |
| Среднее (максимальное) выгорание в ТВС, МВтсут/кг                                   |                 | 42(52)          | 58(70)           |                 |                 | 60()                                                | 24(28)ГВт-сут/т                                                                                                 |
| <b>Топливо:</b>                                                                     |                 | UO <sub>2</sub> | UO <sub>2</sub>  | UO <sub>2</sub> | UO <sub>2</sub> | UO <sub>2</sub> , PuO <sub>2</sub> +UO <sub>2</sub> | UO <sub>2</sub>                                                                                                 |
| Плотность топлива, г/см <sup>3</sup>                                                |                 | 10,4-10,7       | 10,4-10,7        | 10,4-10,7       | 10,4-10,7       |                                                     | 10,4-10,7                                                                                                       |
| Диаметр топливной таблетки $\varnothing$ , мм внешний/ диаметр отверстия в таблетке |                 | 7,6/1,2         | 7,6/1,2<br>7,8/0 |                 |                 |                                                     | 11,5/1,2                                                                                                        |
| Контактный зазор, мм                                                                |                 | 0,13-0,22       | 0,1              |                 |                 |                                                     | 0,1                                                                                                             |
| <b>Направляющие трубы:</b>                                                          | есть            | есть            | есть             | есть            | есть            | нет                                                 | нет                                                                                                             |
| Количество в 1 ТВС, шт                                                              | 18              |                 | 18               | -               |                 | -                                                   | нет                                                                                                             |
| НТ, $\varnothing$ , мм внешний/внутренний                                           | 12,6/10,9       |                 | 12,6/10,9        | -               |                 |                                                     | -                                                                                                               |
| Материал направляющей трубы                                                         | 08X18H10T       |                 | Э-635            | -               |                 |                                                     | -                                                                                                               |
| <b>Центральная труба:</b>                                                           |                 |                 |                  |                 |                 |                                                     | есть                                                                                                            |
| $\varnothing$ , мм внешний/внутренний                                               | 11,2/10,4       |                 | 13/11            | -               |                 |                                                     | 15,0                                                                                                            |
| Материал центральной трубы                                                          | 08X18H10T       |                 | Э-635            |                 |                 |                                                     | Э-110(Н-1)                                                                                                      |

## 5.7 Перечень задач с примерами их решения

### Задача № 1

Определить в водо-водяном реакторе под давлением температуру топлива в центре таблетки и на ее поверхности, температуру оболочки твэла на внутренней и наружной поверхности при косинусоидальном распределении тепловыделений в центре активной зоны, если в этом сечении тепловыделения  $q = 25,88$  кВт/м. Наружный диаметр твэла  $d_{\text{ТВЭ}} = 9,5$  мм, толщина оболочки из циркониевого сплава  $\delta_{\text{об}} = 0,68$  мм, диаметр топливных таблеток из уран-гадолиниевого топлива  $d_{\text{топ}} = 7,84$  мм, толщина газового зазора с гелием между топливом и оболочкой  $\delta_3 = 0,0157$  мм, тепловыделения в сечении  $q = 25,88$  кВт/м; температура теплоносителя в рассматриваемом сечении  $t_{\text{тн}} = 306,5$  °С, коэффициент теплоотдачи  $\alpha = 27,56$  кВт/м<sup>2</sup>·°С,  $\lambda_{\text{об}} = 0,0166$  кВт/м·°С,  $\lambda_{\text{топ}} = 0,002337$  кВт/м·°С,  $\lambda_{\text{НЕ}} = 0,000265$  кВт/м·°С.

#### Дано:

Водо-водяной реактор под давлением

$d_{\text{ТВЭ}} = 9,5$  мм

$\delta_{\text{об}} = 0,68$  мм,  $\lambda_{\text{об}} = 0,0166$  кВт/м·°С, материал оболочки циркониевый сплав

$\delta_3 = 0,0157$  мм,  $\lambda_{\text{НЕ}} = 0,000265$  кВт/м·°С, гелий

$d_{\text{топ}} = 7,84$  мм,  $\lambda_{\text{топ}} = 0,002337$  кВт/м·°С, уран-гадолиниевое топливо

$q = 25,88$  кВт/м

$t_{\text{тн}} = 306,5$  °С

$\alpha = 27,56$  кВт/м<sup>2</sup>·°С

**Определить:**  $t_{\text{об}}^{\text{н}}$ ,  $t_{\text{об}}^{\text{внут}}$ ,  $t_{\text{топ}}^{\text{пов}}$ ,  $t_{\text{топ}}^{\text{ц}}$  -?

#### Решение

1. Расчет температуры наружной оболочки твэла в некотором сечении

$$t_{\text{об}}^{\text{н}}(z) = t_{\text{ми}}(z) + R_{\alpha}(z) \cdot q_l(z), \text{ } ^\circ\text{С};$$

$$t_{\text{об}}^{\text{н}}(z) = 306,5 + 1,216 \cdot 25,88 = 337,97, \text{ } ^\circ\text{С}.$$

2. Расчет термических сопротивлений теплоотдачи

$$R_{\alpha}(z) = \frac{1}{\alpha(z) \cdot d_{\text{ТВЭ}}^{\text{н}} \cdot \pi}, \text{ } (\text{м}^\circ\text{С})/\text{кВт};$$

$$R_{\alpha}(z) = \frac{1}{27,56 \cdot 0,0095 \cdot 3,14} = 1,216, (\text{м}^\circ\text{С})/\text{кВт}.$$

3. Расчет температуры внутренней поверхности оболочки твэла

$$t_{\text{об}}^{\text{внут}}(z) = t_{\text{ми}}(z) + (R_{\alpha}(z) + R_{\lambda_{\text{об}}}(z)) \cdot q_l(z), \text{ } ^\circ\text{С};$$

$$t_{\text{об}}^{\text{внут}}(z) = 306,5 + (1,216 + 1,482) \cdot 25,88 = 376,32 \text{ } ^\circ\text{С}.$$

4. Расчет термических сопротивлений оболочки твэла

$$R_{\lambda_{об}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{об}(z)} \cdot \ln \frac{d_n}{d_{вн}} \quad (\text{м} \cdot ^\circ\text{C})/\text{кВт};$$

$$R_{\lambda_{об}} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,0166} \cdot \ln \frac{0,0095}{0,00814} = 1,482 \quad (\text{м} \cdot ^\circ\text{C})/\text{кВт}.$$

5. Расчет термических сопротивлений гелия в зазоре между внутренней поверхностью оболочки твэла и поверхностью ядерного топлива

$$R_{\lambda_3} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_3} \cdot \ln \frac{d_{вн}}{d_{мон}} \quad (\text{м} \cdot ^\circ\text{C})/\text{кВт};$$

$$R_{\lambda_3} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,000265} \cdot \ln \frac{0,00814}{0,00784} = 22,564 \quad (\text{м} \cdot ^\circ\text{C})/\text{кВт}.$$

6. Расчет температуры наружной поверхности топливной таблетки

$$t_{мон}^n(z) = t_{ин}(z) + (R_{\alpha}(z) + R_{\lambda_{об}}(z) + R_{\lambda_{не}}(z)) \cdot q_l(z);$$

$$t_{мон}^n(z) = 306,5 + (1,216 + 1,482 + 22,564) \cdot 25,88 = 960,28 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

7. Расчет термических сопротивлений в ядерном топливе без центрального отверстия из уран-гадолиниевого топлива

$$R_{\lambda_{мон}}(z) = \frac{1}{4\pi \cdot \lambda_{мон}} \quad (\text{м} \cdot ^\circ\text{C})/\text{кВт};$$

$$R_{\lambda_{мон}}(z) = \frac{1}{4\pi \cdot \lambda_{мон}} = \frac{1}{4 \cdot 3,14 \cdot 0,002337} = 34,068 \quad (\text{м} \cdot ^\circ\text{C})/\text{кВт}.$$

8. Расчет температуры в центре топливной таблетки из диоксида урана

$$t_{мон}^u(z) = t_{ин}(z) + (R_{\alpha}(z) + R_{\lambda_{об}}(z) + R_{\lambda_{не}}(z) + R_{\lambda_{мон}}(z)) \cdot q_l(z);$$

$$t_{мон}^u(z) = 306,5 + (1,216 + 1,482 + 22,564 + 34,068) \cdot 25,88 = 1841,96 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

**Ответ:**  $t_{об}^n = 337,97^\circ\text{C}$ ,  $t_{об}^{внут} = 376,32^\circ\text{C}$ ,  $t_{топ}^{пов} = 960,28^\circ\text{C}$ ,  $t_{топ}^u = 1841,96 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

## Задача № 2

Кольцевой твэл, заполненный карбидом урана, имеющий диаметры наружный  $d_2=20$  мм и внутренний  $d_1=10$  мм, омывается снаружи теплоносителем со средней температурой  $t = 300 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Коэффициент теплоотдачи от поверхности элемента к жидкости  $\alpha = 500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ , коэффициент теплопроводности материала элемента  $\lambda = 20 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ . Определить температуры на внешней и внутренней поверхностях элемента, если объемные тепловыделения от топлива  $q_v = 90 \text{ МВт}/\text{м}^3$ .

**Дано:**

$$q_v = 90 \text{ МВт}/\text{м}^3$$

$$d_2=20 \text{ мм}, r_2 = 10 \text{ мм} = 0,01 \text{ м}$$

$$d_1=10 \text{ мм}, r_1 = 5 \text{ мм} = 0,005 \text{ м}$$

52

$$t = 300 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\lambda = 20 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$$

$$\alpha = 500 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$$

**Определить:**  $t_{c1}$ ,  $t_{c2}$  - ?

### Решение

1. Температура наружной поверхности элемента

$$t_{c2} = t_{жс} + \frac{q_v \cdot r_2}{2 \cdot \alpha} \left[ 1 - \left( \frac{r_1}{r_2} \right)^2 \right], \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$t_{c2} = 300 + \frac{90 \cdot 10^6 \cdot 0,01}{2 \cdot 500} \left[ 1 - \left( \frac{0,005}{0,01} \right)^2 \right] = 975, \text{ }^{\circ}\text{C}$$

2. Температура внутренней поверхности элемента

$$t_{c1} = 975 + \frac{90 \cdot 10^6 \cdot 0,005^2}{4 \cdot 20} \left[ \left( \frac{0,01}{0,005} \right)^2 - 2 \ln \left( \frac{0,01}{0,005} \right) - 1 \right] = 1021 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Ответ:  $t_{c1} = 975^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{c2} = 1021^{\circ}\text{C}$ .

### Задача № 3

Определить перепад температур в оболочке твэла по ее радиусу, если в этом сечении тепловыделения 25,88 кВт/м, диаметр наружной оболочки твэла 9,5 мм, толщина оболочки 0,68 мм, теплопроводность металла оболочки 0,0166 м°С/кВт.

**Дано:**

$$q = 25,88 \text{ кВт/м}$$

$$\delta_{об} = 0,68 \text{ мм}$$

$$d_{об} = 9,5 \text{ мм}$$

$$\lambda = 0,0166 \text{ кВт/м}\cdot\text{К}$$

**Определить:**  $\Delta t_{об}$  - ?

### Решение

1. Определить перепад температур в оболочке твэла

$$\Delta t_{об} = t_{об}^{вн} - t_{об}^{н} = q_l R_{\lambda_{об}} = \frac{q_l}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{об}(z)} \cdot \ln \frac{d_n}{d_{вн}} \quad (\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})/\text{кВт};$$

$$\Delta t_{об} = \frac{25,88}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,0166} \cdot \ln \frac{0,0095}{0,00814} = 38,35 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Ответ:  $\Delta t_{об} = 38,35 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

### Задача № 3

Общая теплопроизводительность тепловыделяющих элементов атомного реактора  $Q = 1 \cdot 10^7$  Вт. Диаметр каждого элемента  $d = 10$  мм, удельные объемные тепловыделения от топлива  $q_v = 2 \cdot 10^8$  Вт/м<sup>3</sup>, а коэффициент теплопроводности  $\lambda = 20$  Вт/(м·К). Температура охлаждающей среды  $t = 300$  °С. Коэффициент теплоотдачи от стенки к жидкости  $\alpha = 500$  Вт/(м<sup>2</sup>·К). Определить требуемое количество ядерного топлива, поверхность теплообмена и температуру на поверхности и в центре топливного элемента.

### Задача № 4

Тепловыделяющий элемент ядерного реактора выполнен из смеси карбида урана и графита в виде цилиндрического стержня диаметром  $d = 10$  мм. Температура в центре стержня  $t_0 = 2000$  °С, температура на поверхности  $t_{\text{пов.}} = 1840$  °С, коэффициент теплопроводности материала  $\lambda = 40$  Вт/(м·К). Определить линейный тепловой поток и плотность теплового потока на поверхности элемента, а также объемные тепловыделения от ядерного топлива.

### Задача № 5

Стержневой конструкции тепловыделяющий элемент ядерного реактора имеет следующие размеры: диаметр твэла  $d = 30$  мм, длина твэла  $l = 1,25$  м. Плотность ядерного топлива  $\rho = 10000$  кг/м<sup>3</sup>, теплоемкость  $C_p = 300$  Дж/(кг·К). Температура жидкости, к которой отводится от элемента тепло  $t_{\text{ж}} = 200$  °С, коэффициент теплоотдачи от поверхности элемента к жидкости  $\alpha = 1000$  Вт/(м<sup>2</sup>·К). Определить температуру на поверхности элемента через  $\tau = 20$  секунд после начала работы, если удельные объемные тепловыделения от топлива  $q_v = 1 \cdot 10^7$  МВт/м<sup>3</sup>. Отвод тепла через торцы элемента не учитывать. Построить график зависимости температуры на поверхности элементов от времени.

### Задача № 6

Определить температуру топлива и оболочки в некотором сечении по высоте твэла в реакторе БН-600, если высота активной зоны  $H_{\text{аз}} = 0,75$  м, диаметр твэла  $d_{\text{твэ}} = 6,9$  мм, толщина оболочки  $\delta_{\text{об}} = 0,4$  мм из стали 0Х16Н15М3Б, диаметр топливных таблеток из двуокиси урана  $d_{\text{топ}} = 6$  мм, толщина газового зазора с гелием между топливом и оболочкой  $\delta_z = 0,05$  мм, средняя объемная плотность тепловыделений в активной зоне  $530$  МВт/м<sup>3</sup>; коэффициенты неравномерности тепловыделений по радиусу активной зоны 1,3, а по высоте 1,2; температура натрия на входе  $380$  °С, на выходе  $550$  °С, коэффициент теплоотдачи  $62000$  Вт/м<sup>2</sup>·°С,  $\lambda_{\text{об}} = 22$  Вт/м·°С,  $\lambda_{\text{топ}} = 3$  Вт/м·°С,  $\lambda_{\text{НЕ}} = 0,359$  Вт/м·°С.

### Задача № 7

В реакторе ВВЭР определить температуры топлива в центре и на поверхности, а также температуры оболочки твэла на его внешней и внутренней поверхности в 7 точках по высоте активной зоны при использовании разных материалов оболочки твэла: циркония, стали. Скорость движения теплоносителя

6,0 м/с, температура теплоносителя на входе в активную зону 290 °С на выходе из нее 320 °С, давления теплоносителя 17 МПа, диаметр топливной таблетки 7,8 мм, толщина оболочки 0,65 мм, газовый зазор заполнен гелием, диаметр твэла 9,1 мм, в качестве ядерного топлива используется диоксид урана, высота активной зоны 3,75 м, эффективная торцевая добавка при условии применения отражателя 0,1. Формулы для расчета теплопроводности материалов конструкции твэла возьмите из раздела 5.

### Задача № 8

В водоохлаждаемом реакторе под давлением определить температуры топлива в центре и на поверхности, а также температуры оболочки твэла на его внешней и внутренней поверхности при использовании разных материалов ядерного топлива: диоксид урана, моx-топлива, уран-гадолиниевое топлива. Коэффициент теплоотдачи 35 кВт/м<sup>2</sup>·К, диаметр топливной таблетки 7,8 мм, толщина оболочки 0,69 мм, газовый зазор заполнен гелием, диаметр твэла 9,5 мм, температура теплоносителя в сечении 300 °С, в качестве материала оболочки твэла используется циркониевый сплав. Формулы для расчета теплопроводности материалов конструкции твэла и ядерного топлива возьмите из раздела 5.

### Задача № 9

Сравните перепад температур в топливной таблетке с отверстием и без него при одинаковой линейной мощности твэла, если диаметр отверстия в таблетке 2,3 мм, диаметр топливной таблетки 7,6 мм, температура топлива в сечении 1850 °С.

### Задача № 10

Стержневой тепловыделяющий элемент ядерного реактора выполнен из диоксида урана с оболочкой из нержавеющей стали толщиной 0,5 мм. Твэл охлаждается водой, имеющей температуру 240 °С, коэффициент теплоотдачи на поверхности твэла  $\alpha = 2,5 \cdot 10^4$  Вт/(м<sup>2</sup>·К). Найти максимальный диаметр твэла, при котором температура в его центре не будет превышать 2500 °С, если тепловой поток на поверхности твэла достигает значения  $q = 1,2 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>. Проводимость контакта между топливом и оболочкой принять равной  $\alpha_{\text{конт}} = 5 \cdot 10^3$  Вт/(м<sup>2</sup>·К).

### Задача № 11

В канадском тяжеловодном реакторе PHWR/CANDU топливные таблетки диаметром 14,25 мм заполнены таблетками из двуокиси урана, объемная плотность тепловыделения в топливе  $2,33 \cdot 10^8$  Вт/м<sup>3</sup>. Коэффициент теплопроводности двуокиси урана  $\lambda_{\text{топ}} = 3$  Вт/м · °С. Определите линейную мощность твэла, термические сопротивления в топливной таблетке и перепад температуры в топливной таблетке.

**Задача № 12**

Определить максимальную температуру поверхности твэлов реактора ВВЭР-1000. Принять линейную мощность твэлов  $q_l = 17,64$  кВт/м, объемный коэффициент неравномерности тепловыделений  $K_v = 2,35$ , наружный диаметр твэла  $d_{\text{твэл}} = 9,1$  мм, коэффициент теплоотдачи  $\alpha = 35000$  Вт/м<sup>2</sup>·°С, температуру воды на входе  $t_{\text{вх}} = 289$  °С, на выходе  $t_{\text{вых}} = 322$  °С.

**Задача № 13**

Тепловыделяющий стержень ядерного реактора имеет теплопроводность 4 Вт/(м·К) и диаметр 12 мм. Найти поверхностную плотность теплового потока для стержня и температуру на его поверхности, если температура на оси стержня равна 1000 °С, а мощность внутренних источников теплоты –  $2 \cdot 10^8$  Вт/м<sup>3</sup>.

**Задача № 14**

Найти мощность внутренних источников теплоты и температуру на поверхности тепловыделяющего элемента ядерного реактора, если диаметр твэла 10 мм, температура на его оси 1150 °С, теплопроводность материала твэла 3,5 Вт/(м·К). Тепловыделяющий элемент охлаждается в среде, температура которой 430 °С; коэффициент теплоотдачи равен  $25 \cdot 10^3$  Вт/(м<sup>2</sup>·К).

**Задача № 15**

Тепловыделяющий элемент ядерного реактора выполнен из смеси карбида урана и графита в виде цилиндрического стержня диаметром 12 мм. Объемные тепловыделения от топлива  $3,88 \cdot 10^8$  Вт/м<sup>3</sup>. Источники можно считать равномерно распределенными по объему. Теплопроводность материала стержня  $\lambda = 58$  Вт/(м·К). Определить температуру и плотность теплового потока на поверхности твэла, если его максимальная температура 2000 °С.

**Задача № 16**

Тепловыделяющий элемент ядерного реактора имеет наружный диаметр 25 мм. Тепловыделяющий элемент находится в трубе внутренним диаметром 31 мм. В кольцевом зазоре движется охлаждающая вода со скоростью 2 м/с и средней температурой 270 °С. Найти средний коэффициент теплоотдачи и мощность внутренних источников теплоты в твэле, если температура его поверхности 305 °С.

**Задача № 17**

Выведите выражение для расчета температуры центра топливной таблетки, исходя и рассмотрения изменения температуры топлива по радиусу топливной таблетки, предполагая, что внутреннее энерговыделение равномерно в пространстве, а теплопроводность топлива в таблетке по ее радиусу не зависит от температуры. Тепловым потоком на торцах таблетки пренебречь. Какова температура центра топливной таблетки, если она выполнена из  $\text{UO}_2 + \text{PuO}_2$ , линей-

ная плотность тепловыделения  $q_l = 49$  кВт/м, температура на поверхности  $t_{нов} = 800$  °С?

### Задача № 18

Средняя температура оболочки твэла во время аварии на реакторе MAGNOX составляет 350 °С. Тепловыделяющий элемент представляет собой цилиндр диаметром 50 мм. Линейная плотность тепловыделения за счет распада продуктов деления составляет 1330 Вт/м. Удельная теплоемкость топлива  $c_p = 170$  Дж/(кг·К), его плотность  $\rho = 19$  г/см<sup>3</sup>. Относительные излучательные способности поверхности твэла и графита составляют  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0,6$ . Теплоемкость оболочки твэла на единицу длины составляет 1,2 кДж/(м·К). Температура на поверхности графита составляет 240 °С. Определить:

1. тепловой поток на единицу длины твэла, отводимый излучением;
2. скорость, с которой твэл будет разогреваться;
3. полное количество тепла, отведенное излучением с единицы длины твэла, за 50 секунд;
4. на сколько это снизит прирост температуры в условиях отсутствия охлаждения теплоносителем.

### Задача № 19

При движении жидкого натрия в трубке с внутренним диаметром 12 мм его температура понижается от 550 до 350 °С. Расход натрия 0,5 кг/с. Определить длину трубки, если разность температур натрия и стенки по длине трубки не меняется и равна 10 °С.

### Задача № 20

Средняя мощность ядерного реактора за 100 суток работы равна 60 МВт. Через 10 суток после останова ядерного реактора при температуре теплоносителя 50 °С из активной зоны извлечен твэл с сердечником из UO<sub>2</sub>, площадь поверхности теплоотдачи которого равна 700 см<sup>2</sup>. Оценить, через какое время стальная оболочка твэла массой 0,7 кг нагреется на воздухе до температуры плавления.

### Задача № 21

Твэл высокотемпературного газового реактора представляет собой шар из делящегося материала, покрытого оболочкой. Определить максимальную температуру твэла и температуру наружной поверхности оболочки при следующих условиях: температура охлаждающего газа  $t_{ж} = 500$  °С; диаметр топливного сердечника твэла  $d_t = 50$  мм; толщина оболочки  $\delta_{об} = 5$  мм; теплопроводность тепловыделяющего материала и оболочки  $\lambda_t = 10$  Вт/(м·К),  $\lambda_{об} = 30$  Вт/(м·К); мощность тепловыделения  $q_v = 3 \cdot 10^7$  Вт/м<sup>3</sup>; коэффициент теплоотдачи от поверхности твэла к потоку газа  $\alpha = 3 \cdot 10^3$  Вт/(м<sup>2</sup>·К).

### Задача № 22

Активная зона ядерного реактора типа ВВЭР состоит из 163 шестигранных ТВС, в которых находятся стержневые тепловыделяющие элементы, расположенные по сторонам правильного шестиугольника. Наружный диаметр твэлов  $d = 9,1$  мм, толщина циркониевой оболочки твэла  $\delta_{об} = 0,65$  мм, толщина газового зазора заполненного гелием  $\delta_{не} = 0,1$  мм, шаг между твэлами  $s = 12,75$  мм, топливные таблетки изготовлены из мох-топлива. Предполагается, что энерговыделение по длине ТВС с высотой  $H = 3,75$  м изменяется по косинусоидальному закону. При этом зависимость плотности теплового потока на поверхности твэлов от координаты  $z$  можно описать уравнением  $q(z) = q_0 \cos(\pi z/H)$ , где  $q_0$  – максимальное значение плотности теплового потока при  $z = 0$  на расстоянии  $H/2$  от входа в сборку (для упрощения записи выражений эффективной добавкой за счет отражателя нейтронов пренебрегается). Характеристики охлаждающей твэл среды: давление и средняя температура воды в реакторе 16 МПа и 310 °С соответственно; скорость воды 5,2 м/с; температура воды на входе в ТВС 290 °С. Максимальный линейный тепловой поток 28 кВт/м. Расчет коэффициента теплоотдачи от поверхности твэла к теплоносителю выполнить по формуле:  $Nu = A \cdot Re^{0,8} Pr^{0,4}$ , где  $A = 0,0165 + 0,02(1 - 0,91x^{-2})x^{0,15}$ ;  $x = s/d$  – относительный шаг решетки стержней; характерный размер – эквивалентный диаметр ячейки  $d_{яч} = d(2\sqrt{3} \cdot x^2 / \pi - 1)$ . Среднеинтегральный коэффициент теплопроводности топлива  $\lambda_r = 3,0$  Вт/(м·К), коэффициент теплопроводности материала оболочки  $\lambda_{об} = 15$  Вт/(м·К), теплопроводность гелия  $\lambda_{не} = 0,252$  Вт/(м·К), коэффициент теплоотдачи  $\alpha = 50 \cdot 10^3$  Вт/(м²·К). Определить координаты и значения в ней максимума температуры поверхности нагрева поверхности твэла и ядерного топлива по высоте активной зоны.

## 6 Оценка теплотехнической надежности активной зоны

### 6.1 Методика расчета критической тепловой нагрузки и коэффициента запаса до кризиса теплоотдачи

**Кризис теплоотдачи** – резкое ухудшение условий отвода тепла с теплоотдающей поверхности при значительных тепловых потоках, превышающих критические значения, в результате чего резко увеличивается температура топлива и оболочки твэла, что, в конечном счете, может привести к их расплавлению и выходу радиоактивных продуктов деления в контур циркуляции теплоносителя.

**Теплотехническая надежность активной зоны ЯР** - свойство ядерного реактора сохранять при различных режимах работы ядерного реактора достаточный теплоотвод от тепловыделяющих элементов без превышения предусмотренных проектом случайных конструкционных и эксплуатационных отклонений от их номинальных значений.

**Показателем теплотехнической надежности активной зоны ЯР** является коэффициент запаса до кризиса теплоотдачи  $K_{\text{зап}}$ .

**Локальная теория описания кризисных явлений** определяет локальные изменения тепловой и критической тепловой нагрузки по высоте твэла и возможность определения зоны кризиса теплоотдачи, т.е. участок расплавления оболочки твэла.

Коэффициент запаса до кризиса теплоотдачи по локальной и интегральной теории описания кризисных явлений определяется по формуле

$$K_q^{\text{зан}}(z) = \frac{q_{\text{кр}}(z)}{q(z)}(1 - \delta) = 0.85 \frac{q_{\text{кр}}(z)}{q(z)}, \quad (6.1)$$

где  $q(z)$  - тепловая нагрузка твэлов в сечении  $z$ , кВт/м<sup>2</sup>;  $\delta = 0.15$  - относительная погрешность соотношения ОКБ «Гидропресс» при доверительной вероятности не менее 95 %;  $q_{\text{кр}}(z)$  – критическая тепловая нагрузка, при которой наступает кризис теплоотдачи, определяется по формуле

$$q_{\text{кр}} = 35,4 \cdot (\overline{\rho\omega})^{0,5} \cdot \Delta t_{\text{ми}}^{0,33} \left( \frac{v'' - v'}{v''} \right)^{1,8}, \text{ Вт/м}^2, \quad (6.2)$$

где  $\overline{\rho\omega}$  - массовая скорость теплоносителя, кг/(м<sup>2</sup>·с);  $\Delta t_s = t_s - t(z)$  - недогрев до насыщения воды в сечении  $z$ ;  $v''$  и  $v'$  - удельные объемы пара и воды на линии насыщения соответственно, м<sup>3</sup>/кг при давлении теплоносителя в рассматриваемом сечении  $z$ . Диапазон применимости формулы:  $\rho\omega = 830 \div 5000$  кг/(м<sup>2</sup>·с),  $p = 12 \div 21$  МПа и  $\Delta t_s = 10 \div 100$  °С.

$$q_{\text{кр}}^{\text{max}}(z) = 0.795 \cdot [1 - x(z)]^n \cdot \left( \frac{G_{\text{ти}}}{S_{\text{ти}}} \right)^m \cdot (1 - 0.0185p), \quad (6.3)$$

где  $n = 0.105p - 0.5$ ;  $m(z) = 0.311 \cdot (1 - x(z)) - 0.127$ ;  $x(z) = \frac{i(z) - i'}{r}$  - относительная энтальпия воды в сечении  $z$ ;  $i'$  - энтальпия воды на линии насыщения при дав-

лении  $p$ , кДж/кг;  $i(z)$  - энтальпия воды, определяемая по давлению и температуре теплоносителя в данном сечении  $z$ , кДж/кг;  $r$  - скрытая теплота парообразования при давлении  $p$ , кДж/кг.

Рекомендована для диапазона параметров  $p = 7.45 \div 16.7$  МПа; массовая скорость  $\rho w = 700 \div 4000$  кг/(м<sup>2</sup>·с); относительная энтальпия  $x = (-0.1) \div (+0.4)$ .

Расчетная зависимость для определения критической тепловой нагрузки, базирующаяся на интегральной теории описания кризисных явлений:

$$q_{кр}(z) = r \rho' (g d_s (g a')^{1/3})^{1/3} Pr^{1/5} Re^{1/5} \frac{(1 - x We^{1/5} / 3.5)^{1/3}}{320(1 + L / 3.54)}, \quad (6.4)$$

где  $r$  - скрытая теплота парообразования, Дж/кг;  $\rho'$  - плотность воды на линии насыщения, кг/м<sup>3</sup>;  $g = 9.81$  м/с<sup>2</sup> - ускорение свободного падения;  $d_s$  - эквивалентный (тепловой) диаметр пучка твэлов, м;  $a'$  - температуропроводность воды на линии насыщения, м<sup>2</sup>/с;  $x = (i - i')/r$  - относительная энтальпия;  $L$  - длина пучка твэлов, м;  $Pr$ ,  $Re$ ,  $We$  - число Прандтля, Рейнольдса и Вебера соответственно. Пределы применимости формулы:  $p = 4 \div 18$  МПа;  $\rho w = 500 \div 5000$  кг/м<sup>2</sup>·с;  $We^{1/5} = 0.5 \div 3.0$ ;  $d_s = 4 \div 20$  мм;  $L = 0.4 \div 7$  м.

**Мощностная теория описания кризисных явлений** предполагает, если мощность ТВС достигла критического значения, то где-то в этой ТВС (неважно, где) произойдет пережог оболочки твэлов.

Коэффициент запаса по критической мощности технологического канала  $K_{w}^{зап}$  - отношение критической мощности ТВС к ее фактической мощности:

$$K_{w}^{зап} = W_{кр} / W. \quad (6.5)$$

Критическая мощность ТВС определяется по формуле

$$W_{кр} = 10400(1 + 0.00287(i' - i_{вх})) \cdot (0.01 G_{твс})^{0.883} \cdot d_{вн}^{0.026} \cdot \exp\left(-\frac{670}{l}\right), \quad (6.6)$$

где  $i'$ ,  $i_{вх}$  - энтальпия воды на линии насыщения и на входе в ТВС, кДж/кг;  $G_{твс}$  - расход теплоносителя в ТВС, кг/ч;  $d_{вн}$  и  $l$  - внутренний диаметр и длина обогреваемой снаружи трубы соответственно, мм. Формула справедлива для  $p$  до 20 МПа;  $t_{вх} = 100 \div 350$  °С;  $d_{вн} = 5.85 \div 10.8$  мм;  $l = 1.5 \div 6.0$  м;  $G = 125 \div 500$  кг/ч (при  $d_{вн} = 5.85$  мм).

**Теплотехническая надежность активной зоны обеспечивается, если минимальное значение коэффициента запаса до кризиса теплоотдачи больше единицы:**

$$K_{w}^{зап} K_q^{зап} > 1.$$

## 6.2 Перечень задач с примерами их решения

### Задача № 1

Определить критическую тепловую нагрузку  $q_{кр}$ , если давление теплоносителя  $P = 14$  МПа, температура теплоносителя на входе в активную зону  $t_{вх} = 230$  °С, температура теплоносителя на выходе из активной зоны  $t_{вых} = 270$  °С, средняя скорость движения водного теплоносителя  $\varpi = 3$  м/с.

**Дано:**

$$\varpi = 3 \text{ м/с}$$

$$t_{вх} = 230 \text{ °С}$$

$$t_{вых} = 270 \text{ °С}$$

$$P = 14 \text{ МПа}$$

**Определить:**  $q_{кр}$  -?

### Решение

1. Определение теплофизических характеристик теплоносителя для расчета критической тепловой нагрузки

$$q_{кр} = 35,4 \cdot (\overline{\rho\varpi})^{0,5} \cdot \Delta t_{mn}^{0,33} \left( \frac{v'' - v'}{v} \right)^{1,8} \text{ кВт/м}^2,$$

где  $\overline{\rho}$  - средняя плотность теплоносителя, кг/м<sup>3</sup>,

$\varpi$  - средняя скорость движения теплоносителя, м/с,

$\overline{\rho\varpi}$  - массовая скорость теплоносителя, кг/(м<sup>2</sup> · с),

$v''$  и  $v'$  - удельные объемы пара и воды на линии насыщения соответственно, м<sup>3</sup>/кг.

$\Delta t_S = t_S - t_{тн}$  - недогрев теплоносителя до температуры насыщения, °С.

Из таблиц 2.1 определяются:

$$\overline{\rho} \text{ (} P = 14 \text{ МПа; } t_{тн} = 250 \text{ °С)} = 0,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3;$$

$$t_S \text{ (} P = 14 \text{ МПа)} = 336,63 \text{ °С};$$

$$v'' \text{ (} P = 14 \text{ МПа)} = 0,0115 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$v' \text{ (} P = 14 \text{ МПа)} = 0,0016 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$\Delta t_S = t_S - t_{вых} = 336,63 - 270 = 66,63 \text{ °С}.$$

2. Расчет критической тепловой нагрузки

$$q_{кр} = 35,4 \cdot (\overline{\rho\varpi})^{0,5} \cdot \Delta t_S^{0,33} \left( \frac{v'' - v'}{v} \right)^{1,8} = 35,4 (0,8 \cdot 10^3 \cdot 3)^{0,5} 66,63^{0,33} \left( \frac{0,012 - 0,0016}{0,012} \right)^{1,8} = 5,47 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2.$$

**Ответ.** Критическая тепловая нагрузка  $q_{кр} = 5,47 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2$ .

### Задача № 2

В опасном сечении ТВС ВВЭР критическая тепловая нагрузка равна  $9 \cdot 10^3$  кВт/м<sup>2</sup>,  $q_{ист} = 7 \cdot 10^3$  кВт/м<sup>2</sup>. Затем мощность ядерного реактора была увеличена на 20 %. Обеспечена ли в обоих случаях теплотехническая надежность активной зоны ядерного реактора, если остальные параметры остались неизменными.

### Задача № 3

В ВВЭР-1000 при давлении теплоносителя  $P=16$  МПа, средней температуре теплоносителя  $\overline{t_{mn}}=250$  °С, температуре теплоносителя на выходе из активной зоны  $t_{вых}=300$  °С, средней скорости движения потока  $\overline{W}=1,5$  м/с определить критическую тепловую нагрузку  $q_{кр}$ ?

### Задача №4

Определить критическую тепловую нагрузку  $q_{кр}$  по формулам 6.2 и 6.3, если давление теплоносителя  $P=18$  МПа, температура теплоносителя на входе в активную зону  $t_{вх}=290$  °С, температура теплоносителя на выходе из активной зоны  $t_{вых}=320$  °С, площадь сечения канала для прохода через него теплоносителя  $0,03$  м<sup>2</sup>, расход теплоносителя  $100$  кг/с. Сравнить результаты вычисления, сделать выводы.

### Задача № 5

ВВЭР-1000. Давление теплоносителя  $P=17$  МПа, средняя температура теплоносителя в ТВС  $\overline{t_{mn}}=270$  °С, температура теплоносителя на выходе из активной зоны  $t_{вых}=310$  °С, средняя скорость движения потока  $\overline{W}=4,5$  м/с, диаметр твэла  $9,0$  мм, количество твэлов в одной ТВС  $312$  шт, количество ТВС в активной зоне реактора  $163$  шт., тепловая мощность реактора  $2800$  МВт. Рассчитать коэффициент запаса до кризиса теплоотдачи?

### Задача № 6

Исследовать как изменяются значения критической тепловой нагрузки (формула 6.2) по высоте активной зоны при условии:

1. Если увеличить расход теплоносителя  $80$  кг/с,  $90$  кг/с,  $100$  кг/с, при этом интегральный запас до кипения теплоносителя не изменяется  $\Delta t_s=36$  °С, давление теплоносителя  $P=17$  МПа.

2. Если увеличить давление теплоносителя  $14$  МПа,  $16$  МПа,  $18$  МПа, при этом интегральный запас до кипения теплоносителя не изменяется  $\Delta t_s=36$  °С, расход теплоносителя не изменяется  $G_{тн}=90$  кг/с.

3. Если увеличить температуру теплоносителя на входе в активную зону  $t_{вх}=270$  °С,  $t_{вх}=280$  °С,  $t_{вх}=290$  °С, при этом давление теплоносителя не изменяется  $P=17$  МПа, расход теплоносителя не изменяется  $G_{тн}=90$  кг/с.

**Задача № 7**

В опасном сечении ТВС критическая тепловая мощность равна  $1500 \text{ кВт/м}^2$ , а истинная  $1200 \text{ кВт/м}^2$ . Затем мощность ядерного реактора увеличена на 30 %. Обеспечена ли в обоих случаях теплотехническая надежность активной зоны ядерного реактора, если остальные параметры остались неизменными.

**Задача №8**

Определить коэффициент запаса до кризиса теплоотдачи по мощности ТВС для реактора с тепловой мощностью  $4400 \text{ МВт}$ , в активной зоне которого размещается 257 ТВС. Давление теплоносителя  $15 \text{ МПа}$ , при температуре теплоносителя на входе в активную зону  $290 \text{ }^\circ\text{C}$  и на выходе  $330 \text{ }^\circ\text{C}$ , наружный диаметр твэла  $d_{\text{вн}} = 9,5 \text{ мм}$ ;  $l = 3810 \text{ мм}$ ;  $G = 92 \text{ кг/с}$ .

**Задача № 9**

Рассчитать величину критического теплового потока при кипении воды в большом объеме для давлений 2; 4,0; 6,0; 8,0; 10,0; 14,0; 18,0; 22,15 МПа. Построить график зависимости критического теплового потока от давления.

**Задача № 10**

Определить критический тепловой поток применительно к условиям работы ядерного реактора ВВЭР-1000, используя следующие данные: давление воды в реакторе  $p=16 \text{ МПа}$ , массовая скорость  $\rho w = 3000 \text{ кг/ м}^2\cdot\text{с}$ , относительная энтальпия  $x = -0,2$ . Расчет  $q_{\text{кр}}$  выполнить по формуле Безрукова (6.3)

$$q_{\text{кр}} = 0,795(1-x)^n (\rho w)^m (1-0,0185p),$$

где  $m=0,311(1-x)-0,127$ ;  $n=0,105p-0,5$ ;  $p$  в МПа.

## 7 Расчет гидравлических потерь давления при движении однофазного и двухфазного потока

### 7.1 Методика расчета гидравлических сопротивлений в контуре

Полное гидравлическое сопротивление любого участка контура складывается из суммы потерь давлений на трение, местные сопротивления, от ускорения потока, гидростатических (нивелирных) потерь на этом участке:

$$\Delta p_i = \sum_{i=1}^n (\Delta p_{\text{тр}i} + \Delta p_{\text{м}i} \pm \Delta p_{\text{уск}i} \pm \Delta p_{\text{нив}i}) \text{ Па}, \quad (7.1)$$

где  $\Delta p_{\text{тр}i}$  - потери давления на трение;  $\Delta p_{\text{м}i}$  - потери давления от местных сопротивлений;  $\Delta p_{\text{уск}i}$  - потери давления от ускорения потока;  $\Delta p_{\text{нив}i}$  - нивелирные потери давления.

### 7.2 Гидравлические потери при движении однофазного потока

*Потери давления на трение:*

$$\Delta p_{\text{тр}} = \xi_{\text{тр}} \frac{l}{d_s} \frac{\bar{\rho} \bar{w}^2}{2} \text{ Па}, \quad (7.2)$$

где  $\xi_{\text{тр}}$  - коэффициент сопротивления трения;  $d_s = \frac{4 \cdot S}{\Pi_{\Gamma}}$  - эквивалентный диаметр, м;  $S$  - площадь проходного сечения потока на участке, м<sup>2</sup>;  $\bar{w}$  - средняя скорость потока на участке, м/с;  $\bar{\rho} = 1/\nu$  - средняя плотность теплоносителя на участке, кг/м<sup>3</sup>;  $\nu$  - удельный объем теплоносителя, м<sup>3</sup>/кг;  $l$  - длина участка, где определяются потери давления от трения.

**Коэффициент сопротивления трения  $\xi_{\text{тр}}$**  определяется числом Рейнольдса - характеристикой степени турбулизации потока

$$\text{Re} = \frac{\bar{w} \cdot d_s}{\nu} = \frac{\bar{\rho} \cdot \bar{w} \cdot d_s}{\mu} = \frac{d_s}{\mu \cdot S} G = \frac{4}{\mu \cdot \Pi_{\text{см}}} G, \quad (7.3)$$

где  $\nu$ , м<sup>2</sup>/с и  $\mu$ , Па·с - коэффициенты кинематической и динамической вязкости, связанные соотношением  $\mu = \rho \nu$ , величины которых определяются давлением и температурой теплоносителя;  $G$  - массовый расход теплоносителя, кг/с;  $\Pi_{\text{см}}$  - гидравлический («смоченный») периметр сечения канала, м.

В случае изотермического ламинарного течения воды (при  $\text{Re} \leq 2300$ ) коэффициент трения для пучка стержней, собранных в треугольную решетку определяется по формуле  $\xi_{\text{тр}} \approx \frac{121}{\text{Re}}$ , а для круглых труб -  $\xi_{\text{тр}} \approx \frac{64}{\text{Re}}$ . (7.4)

В диапазоне значений  $\text{Re} = 4 \cdot 10^3 \div 10^5$  коэффициент сопротивления трения определяется по формуле Блазиуса  $\xi_{\text{тр}} \approx 0.316 \text{Re}^{-0.25}$ . (7.5)

В диапазоне значений  $Re > 10^5$  коэффициент сопротивления трения определяется по формуле Филоненко  $\xi_{тр} \approx (1.82 \lg Re - 1.64)^{-2}$ . (7.6)

**Потери давления от местных сопротивлений:**

$$\Delta p_{\text{м}i} = \sum_{i=1}^m \xi_{\text{м}i} \frac{\rho_i w_i^2}{2}, \text{ Па} \quad (7.7)$$

( $\xi_{\text{м}i}$  - коэффициент  $i$ -го местного сопротивления;  $\rho_i, w_i$  - плотность и скорость потока в зоне  $i$ -го местного сопротивления).

В пределах активной зоны реактора основными местными сопротивлениями являются: сопротивления на входе и выходе из ТВС и сопротивления от дистанционирующих решеток:

$$\xi_{\text{м}} = \xi_{\text{вх}} + \xi_{\text{вых}} + \sum_{i=1}^k \xi_{\text{др}i}. \quad (7.8)$$

Коэффициент местного сопротивления либо рассчитывается по эмпирическим зависимостям, приведенным в справочниках (например, П.Л. Кириллов, Ю.С. Юрьев, В.П. Бобков «Справочник по теплогидравлическим расчетам»), либо принимаются на основании экспериментальных данных. Некоторые из этих данных приведены в таблице 7.1.

Таблица 7.1 - Коэффициенты местных сопротивления в разных ТВС

|                    | ТВС серийная | ТВСА     | ТВС-2М |
|--------------------|--------------|----------|--------|
| Число ДР ( $k$ )   | 15           | 15       | 8      |
| $\xi$ для одной ДР | 0.5          | 0.3      | 0.4    |
| ТВС в целом        | 8.9          | 11.5+0.6 | 13.2   |

**Потери давления от ускорения потока:**

$$\Delta p_{\text{уск}} = \rho_{\text{вых}} w_{\text{вых}}^2 - \rho_{\text{вх}} w_{\text{вх}}^2, \text{ Па}, \quad (7.9)$$

где индексы «вх» и «вых» означают, что соответствующие параметры относятся ко входному и выходному сечениям рассматриваемого участка.

**Нивелирные потери давления**

$$\Delta p_{\text{нив}} = g(\rho_2 h_2 - \rho_1 h_1) = \bar{\rho} g \cdot \Delta h, \text{ Па}, \quad (7.10)$$

где  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  - ускорение свободного падения;  $\rho_1, \rho_2$  и  $\bar{\rho}$ ,  $\text{кг/м}^3$  - плотности воды на высотах входа ( $h_1$ ), выхода ( $h_2$ ) и средняя на участке канала с перепадом высот  $\Delta h = h_2 - h_1$ , м.

**Расчет мощности ГЦН первого контура**

По результатам расчета полного гидравлического сопротивления первого контура производится расчет мощности главных циркуляционных насосов:

$$\Delta N_{\text{ГЦН}} = \frac{\Delta p_{\text{пк}} \cdot G_p}{m_{\text{п}} \cdot \eta_{\text{ГЦН}} \cdot \rho_{\text{вх}}} \text{ Вт}, \quad (7.11)$$

где  $\Delta p_{\text{пк}} \approx (1.2 \div 1.25) \Delta p_p$  - гидравлические потери в первом контуре, Па;  $\Delta p_p$  - гидравлические потери в реакторе;  $G_p$  - расход на реактор, кг/с;  $\eta_{\text{ГЦН}} = 0.78 \div 0.80$  - КПД ГЦН;  $m_{\text{п}}$  - число петель первого контура;  $\rho_{\text{вх}}$  - плотность воды при входной температуре в реактор, кг/м<sup>3</sup> (ГЦН всегда устанавливается на «холодной нитке» петли, где  $t = t_{\text{вх}}$ ).

### 7.3 Гидравлические потери в канале при движении двухфазного потока

Структура потока в парогенерирующем канале может быть представлена следующим образом (рис. 7.1).

Канал представляет собой ограниченную систему, в которой на испарительном участке при внешнем подводе тепла в движущейся кипящей жидкости происходит непрерывное увеличение паровой и уменьшение жидкой фазы. Соответственно этому изменяется гидродинамическая структура потока как по длине, так и по поперечному сечению канала, а следовательно, изменяется и гидравлическое сопротивление.

Испарительный участок при движении потока снизу вверх включает в себя следующие режимы течения:

Пузырьковый – равномерное распределение пузырьков пара небольшого диаметра в объеме воды;

Пробковый (снарядный) – движение объединенных пузырьков пара в большие пузыри пара в объеме воды;

Дисперсно-кольцевой – расслоенное движение фаз воды и пара. В центре канала движется влажный пар, а вдоль стенки канала слой жидкости, который с увеличением паросодержания уменьшается.

#### Характеристики пароводяного потока

$S = S' + S''$  - площадь сечения канала, занятая пароводяной смесью, где  $S'$  - площадь сечения, занятая водой, а  $S''$  - площадь сечения, занятая паром.

$G = G' + G''$  - массовый расход пароводяной смеси, где  $G'$  - массовый расход насыщенной воды, а  $G''$  - массовый расход сухого насыщенного пара при рассматриваемом давлении;  $\rho'$  и  $\rho''$  - плотности насыщенной воды и сухого насыщенного пара при том же рассматриваемом давлении.

$w_{\text{см}}$  - средняя скорость пароводяной смеси в рассматриваемом сечении, м/с;

$w'_o$  - приведенная скорость воды, м/с;

$w''_o$  - приведенная скорость пара, м/с;

$w_o$  - скорость циркуляции потока, м/с.

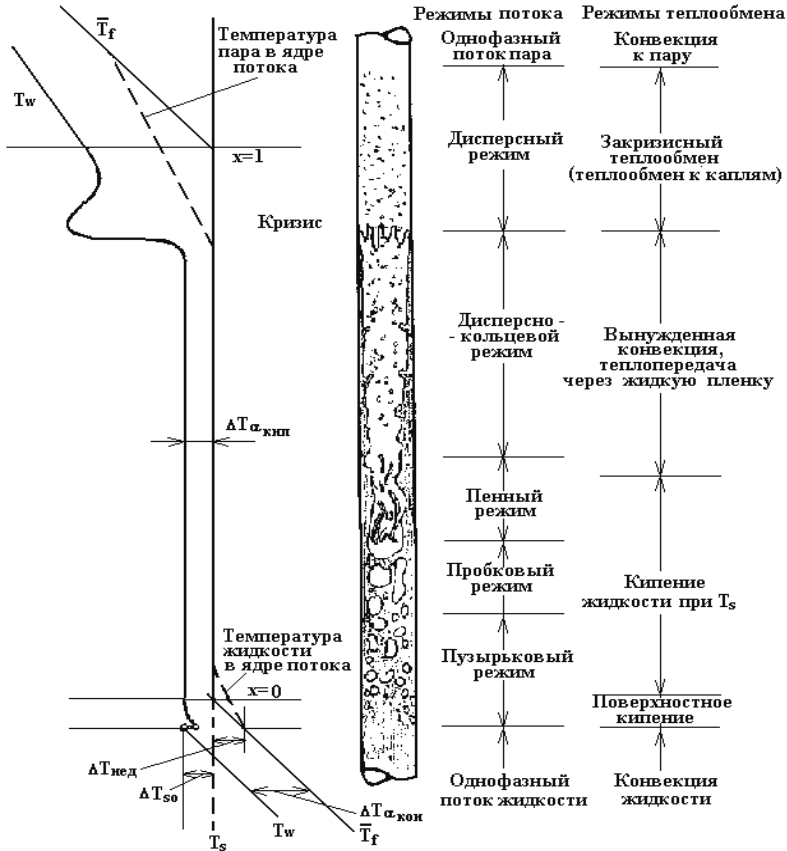


Рис. 7.1 - Режимы течения в парогенерирующем канале

Средняя по сечению канала скорость пароводяной смеси представляет собой отношение объемного расхода смеси к сечению канала

$$w_{см} = \frac{G \cdot v_{см}}{S}, \quad (7.12)$$

где  $v_{см}$  - удельный объем пароводяной смеси,  $м^3/кг$ .

$$v_{см} = (1 - x) \cdot v' + x \cdot v'', \quad (7.13)$$

где  $x$  - массовое паросодержание.

**Приведенные скорости** определяются отношением объемного расхода насыщенного пара к полному сечению канала:

- приведенная скорость воды  $w'_0 = \frac{G' \cdot v'}{S}; \quad (7.14)$

- приведенная скорость пара  $w''_0 = \frac{G'' \cdot v''}{S}. \quad (7.15)$

Приведенная скорость воды (пара) в двухфазном потоке - это такая скорость, которую имела бы вода (пар), единолично занимая все сечение канала.

**Скорость циркуляции теплоносителя** равна отношению объемного расхода воды при температуре насыщения к полному сечению канала:

$$w_o = \frac{G \cdot v'}{S}. \quad (7.16)$$

Удобство применения скорости циркуляции теплоносителя состоит в том, что *эта скорость равна действительной скорости воды в начале испарительного участка*, и ее легко рассчитать.

**Массовое паросодержание** - доля массового расхода пара в общем расходе пароводяной смеси

$$x = \frac{G''}{G} = \frac{G''}{G' + G''}. \quad (7.17)$$

Массовое паросодержание можно выразить через отношение приведенной скорости пара к скорости циркуляции теплоносителя:

$$x = \frac{\rho'' \cdot w_o''}{\rho' \cdot w_o'}. \quad (7.18)$$

**Истинное паросодержание**  $\varphi$  в рассматриваемом сечении канала - это доля сечения, занятая паром, от общего проходного сечения канала:

$$\varphi = \frac{S''}{S} = \frac{S''}{S' + S''}. \quad (7.19)$$

Истинное паросодержание учитывает реальное распределение объемов пара и воды в данном сечении парогенерирующего канала.

Величины  $\beta$ ,  $x$  и  $\varphi$  взаимно связаны. Объемное паросодержание  $\beta$ , представляющее собой отношение объемных расходов пара и смеси, можно выразить простым отношением скоростей пара и смеси:

$$\beta = \frac{V''}{V'' + V'} = \frac{G''v''}{G''v'' + G'v'} = \frac{Sw_0''}{Sw_0'' + Sw_0'} = \frac{w_0''}{w_0'' + w_0'} = \frac{w_0''}{w_{см}}. \quad (7.20)$$

Величину  $\beta$  можно выразить и через массовое паросодержание:

$$\beta = \frac{x}{[x + (1-x) \cdot \frac{\rho''}{\rho'}]}. \quad (7.21)$$

Между объемными паросодержаниями  $\varphi$  и  $\beta$  существует простая взаимозависимость:  $\varphi = \frac{w_{см}}{w_0''} \cdot \beta$ , т.е. всегда  $\varphi < \beta$ .

### Расчет гидравлических потерь при движении двухфазного потока.

Так как в двухфазном потоке происходит сложное взаимодействие фаз (уменьшение водной и увеличение паровой фазы по высоте канала), расчет гидравлических потерь парогенерирующих каналов базируется на полумпирических зависимостях, справедливых для довольно узких интервалов режимных параметров.

Расчет гидравлических потерь ведется с учетом допущения: двухфазный поток рассматривается как смесь с равномерным распределением фаз, движущихся с одинаковой скоростью.

### Потери давления на трение

$$\Delta p_{\text{тр}} = \xi_{\text{тр}} \frac{l}{d_s} \frac{\rho_{\text{см}} \cdot w_{\text{см}}^2}{2}. \quad (7.22)$$

Скорость смеси ( $w_{\text{см}}$ ) определяется через скорость циркуляции теплоносителя ( $w_0$ ) и массовое расходное паросодержание ( $x$ ), то есть

$$w_{\text{см}} = w_0 [1 + x(\frac{\rho'}{\rho''} - 1)]. \quad (7.23)$$

Входящая в формулу плотность смеси  $\rho_{\text{см}}$  является функцией плотности каждой из фаз смеси ( $\rho'$  и  $\rho''$ ) и объемного паросодержания

$$\rho_{\text{см}} = \rho'' \cdot \beta + \rho' (1 - \beta), \quad (7.24)$$

где объемное расходное паросодержание  $\beta = \frac{w_0''}{w_{\text{см}}}$ . (7.25)

Подстановка (7.25) в (7.24) дает

$$\rho_{\text{см}} = \frac{\rho'' w_0'' + \rho' w_0'}{w_{\text{см}}}. \quad (7.26)$$

Подстановка в формулу для  $\Delta p_{\text{тр}}$  выражения (7.26) и умножение числителя и знаменателя на  $\rho' w_0$  дает

$$\Delta p_{\text{тр}} = \xi_{\text{тр}} \frac{l}{d_s} \frac{\rho' w_0 w_{\text{см}}}{2} \left( \frac{\rho'' w_0'' + \rho' w_0'}{\rho' w_0} \right). \quad (7.27)$$

Здесь  $w_0 = \rho w / \rho'$  - скорость циркуляции, где  $\rho w$  - массовая скорость на входе в парогенерирующий канал. В (7.27) по закону неразрывности потока  $(\rho'' w_0'' + \rho' w_0') / \rho' w_0 = 1$ , и так как  $w_{\text{см}} = w_0 [1 + x(\frac{\rho'}{\rho''} - 1)]$ , формулу (7.27) в *гомо-*

*генном приближении* можно записать как

$$\Delta p_{\text{тр}} = \xi_{\text{тр}} \frac{l \cdot \rho' \cdot w_0^2}{2 d_s} \left[ 1 + \psi x \left( \frac{\rho'}{\rho''} - 1 \right) \right] \text{ Па}, \quad (7.28)$$

где  $\xi_{\text{тр}}$  - коэффициент сопротивления трения однофазного потока;  $w_0$  - скорость циркуляции, м/с;  $\psi$  - поправочный коэффициент, учитывающий структуру двухфазного потока, определяемый по номограмме (рисунок 7.2). Для  $x < 0.7$ ,  $w_0 < 10$  м/с коэффициент  $\psi$  находится по номограмме рисунок 7.2 независимо от того, есть обогрев трубы или нет.

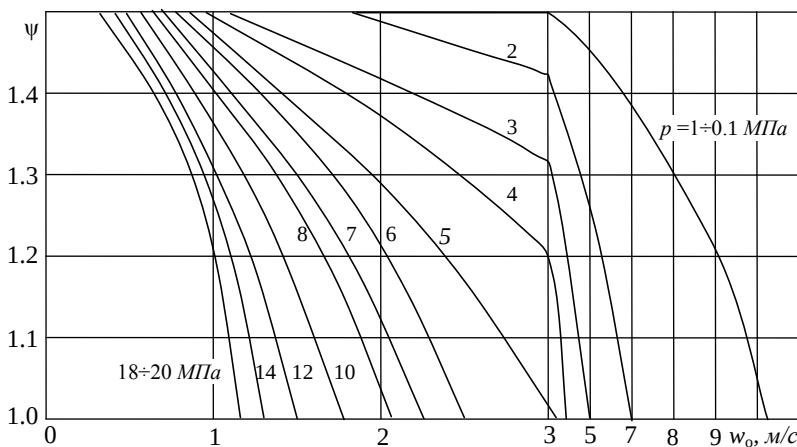


Рис. 7.2 – Зависимость  $\psi$  от скорости циркуляции, используемая при расчете сопротивлений трения в испарительных каналах при  $x \leq 0.7$ ,  $(\rho w p) \leq 1.2 \cdot 10^4$  МПа·кг/м<sup>2</sup>·с

При скоростях циркуляции  $w > 10$  м/с коэффициент  $\psi$  находится по номограммам для обогреваемых труб (рис.7.3а) и необогреваемых (рис.7.3б).

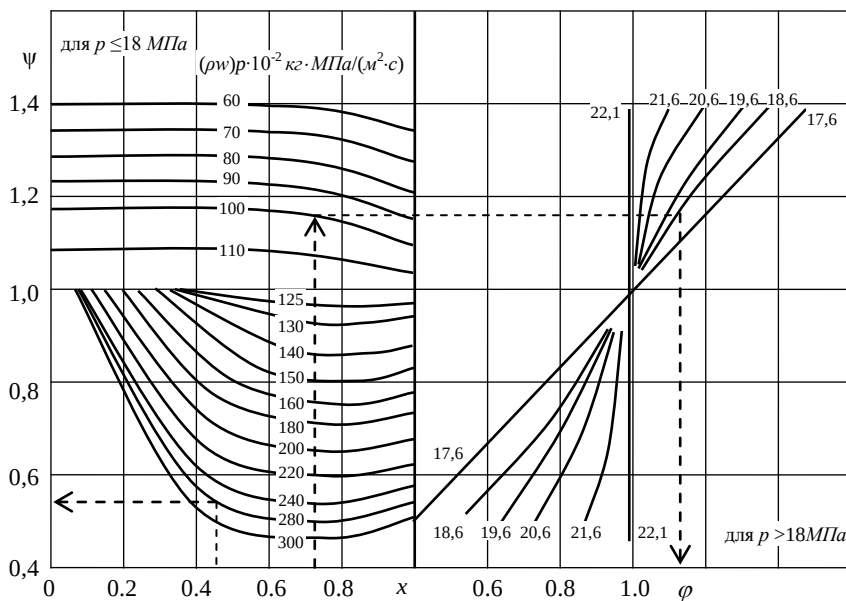


Рис. 7.3а - Значения коэффициента  $\psi$  в формуле (7.28) для обогреваемых труб

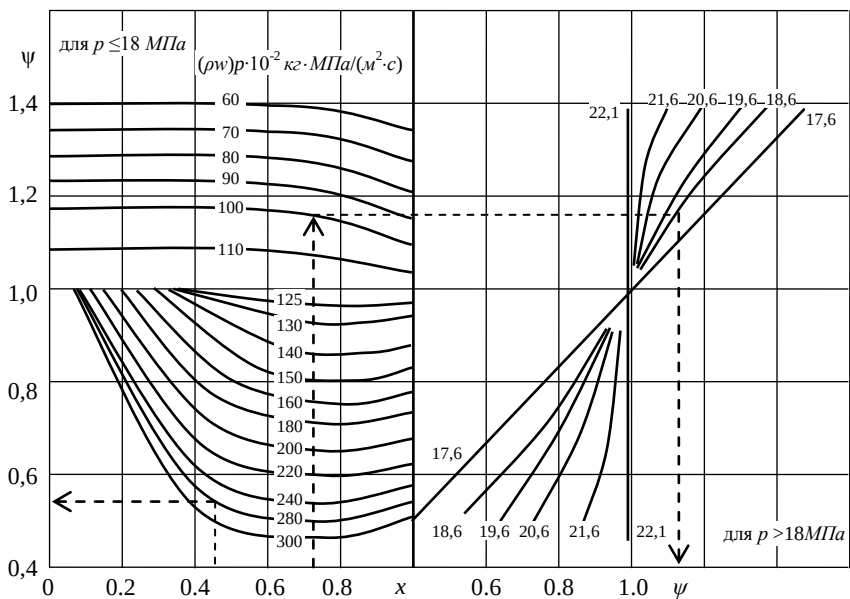


Рис. 7.36 - Значения коэффициента  $\psi$  в формуле (7.28) для необогреваемых труб

Если паросодержание изменяется по длине канала от  $x_n$  до  $x_k$ , то в формулу (7.28) подставляется  $\overline{\psi x} = [(\overline{\Psi x})_k x_k - (\overline{\Psi x})_n x_n] / (x_k - x_n)$ , где  $(\overline{\Psi x})_k$  и  $(\overline{\Psi x})_n$  находятся при паросодержаниях  $x_k$  и  $x_n$  по номограмме рис. 7.4.

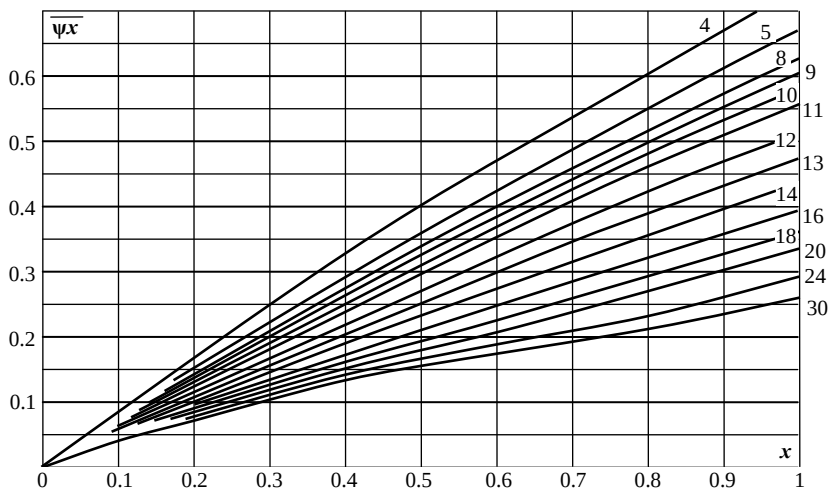


Рис. 7.4 - Номограмма для определения комплекса  $\Psi x$  при давлении  $p \leq 18$  МПа

Подстановка в (7.28) массового расходного паросодержания  $x = \frac{\rho'' w_o''}{\rho' w_o}$  и преобразование позволяет получить

$$\Delta p_{\text{тр}} = \xi_{\text{тр}} \frac{l \cdot \rho' \cdot w_o^2}{2d_s} \left[ 1 + \frac{\rho'' \cdot w_o''}{\rho' \cdot w_o} \left( \frac{\rho'}{\rho''} - 1 \right) \right]. \quad (7.29)$$

При сравнительно низких паросодержаниях, характерных для области поверхностного кипения, влияние теплового потока сказывается более значительно. Для этой области гидравлическое сопротивление рассчитывается по формуле [5]

$$\Delta p_{\text{тр}}^{\text{п.к.}} = \xi_{\text{тр}} \frac{l \rho' w_o^2}{2d_s} \left[ 1 + \Psi x \left( 1 - \frac{\rho''}{\rho'} \right) \times \left\{ 1 + 3.09 \left( \frac{q_s}{r \rho'' w_o} \right)^{0.7} \cdot [7 - (1 + \frac{\Delta i_{\text{вых}}}{\Delta i_{\text{нк}}})^{0.5}] \frac{\Pi_{\text{кип}}}{\Pi_{\Gamma}} \right\} \right], \quad (7.30)$$

где  $q_s$  – тепловой поток;  $r$  – удельная теплота парообразования;  $\Delta i_{\text{вых}}$  и  $\Delta i_{\text{нк}}$  – нагрев воды до кипения на выходе из участка и в сечении, где начинается поверхностное кипение;  $\Pi_{\text{кип}}$  и  $\Pi_{\Gamma}$  – обогреваемый периметр и гидравлический (смоченный) периметр.

**Потери давления на преодоление местных сопротивлений** вследствие заметного перемешивания пароводяной смеси в этом месте рассчитываются как для гомогенного потока:

$$\Delta p_{\text{м}} = \xi_{\text{м}} \frac{\rho' \cdot w_o^2}{2} \left[ 1 + x \left( \frac{\rho'}{\rho''} - 1 \right) \right]. \quad (7.32)$$

### Потери давления от ускорения потока.

При движении пароводяной смеси по обогреваемым трубам ее плотность непрерывно меняется и это создает потери давления от конвективного ускорения. Расчет потерь на ускорение потока ведется для смеси:

$$\Delta p_{\text{уск}} = (\rho_{\text{см}} w_{\text{см}}^2)_{\text{вых}} - (\rho' w_o^2)_{\text{вх}}. \quad (7.33)$$

**Нивелирные потери давления** рассчитываются для всего участка кипения  $h$  по средней плотности пароводяной смеси:

$$\Delta p_{\text{нив}} = g \cdot \rho_{\text{см}} \cdot h. \quad (7.34)$$

В двух последних формулах (7.33) и (7.34) плотность пароводяной смеси определяется по формуле  $\rho_{\text{см}} = \rho'' \varphi + \rho' (1 - \varphi)$ , где  $\varphi = S''/S'$  – истинное объемное паросодержание, которое определяется экспериментально или по эмпирической формуле  $\varphi \approx c \cdot \beta$ , где  $c$  – коэффициент, зависящий от давления (например, для  $p = 16 \text{ МПа}$   $c = 0.91$ ).

## 7.4 Перечень задач с примерами их решения

### Задача № 1

Определить потери давления на трение в пучке твэл, если известно: длина твэла 3,82 м, шаг расположения твэл  $s = 12,75$  мм, наружный диаметр твэла  $d_{\text{твэ}} = 9,1$  мм, давление теплоносителя  $P = 15,5$  МПа, средняя температура теплоносителя  $305,3$  °С, средняя скорость движения водного теплоносителя на участке  $4,9$  м/с, эквивалентный диаметр ТВС  $d_e = 0,01043$  м

#### Дано:

$$l_{\text{ТВЭЛ}} = 3,82 \text{ м}$$

$$s = 12,75 \text{ мм}$$

$$d_{\text{ТВЭ}} = 9,1 \text{ мм}$$

$$P = 15,5 \text{ МПа}$$

$$\overline{t}_{\text{тн}} = 305,5 \text{ °С}$$

$$\overline{\omega} = 4,9 \text{ м/с}$$

$$d_e = 0,01043 \text{ м}$$

**Определить:**  $\Delta P_{\text{тр}} - ?$

#### Решение

1. Определение коэффициента сопротивления трения

$$\xi_{\text{тр}2} = \frac{0,210}{\text{Re}^{0,25}} \left[ 1 + (x - 1)^{0,32} \right] = 0,014, \text{ в формулу подставляем значение } x = [\text{мм}]$$

$$x = s/d_{\text{ТВЭ}} = 12,75/9,1 = 1,401 \text{ мм}$$

где  $s = 12,75$  мм – шаг расположения твэлов

$d_{\text{ТВЭ}} = 9,1$  мм – наружный диаметр твэла

$$\text{Re} = (\rho \omega) d_e / \mu = 707,214 \cdot 4,9 \cdot 0,01043 / 86,355 \cdot 10^{-6} = 418205$$

2. Потери давления на трение в пучке твэл

$$\Delta P_{\text{тр.твэл}} = \xi_{\text{тр}} \frac{l_{\text{твэл}}}{d_e} \frac{\rho \overline{\omega}^2}{2} = 0,014 \frac{3,82 \cdot 707,214 \cdot 4,896^2}{0,01043 \cdot 2} = 43462 \text{ Па}$$

$$l_{\text{ТВЭЛ}} = 3820 \text{ мм} - \text{длина твэла};$$

$$d_e = 0,01043 \text{ м} - \text{эквивалентный (гидравлический) диаметр ТВС};$$

$$\overline{\rho} = 707,214 \text{ кг/м}^3 - \text{средняя плотность потока на участке};$$

$$\overline{\omega} = 4,896 \text{ м/с} - \text{средняя скорость потока на участке};$$

$$\mu = f(P = 15,5 \text{ МПа}; \overline{t}_{\text{тн}} = 305,5) = 86,355 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}.$$

**Ответ:** потери давления на трение  $P_{\text{тр}} = 43462 \text{ Па}$ .

**Задача № 2**

Через испарительный участок канала круглого сечения диаметром  $d_k = 0,02$  м, протекает пароводяная смесь с давлением 16 МПа. В некотором сечении канала массовый расход воды  $G' = 2$  кг/с и  $G'' = 0,5$  кг/с. Определить приведенные скорости воды и пара, скорость циркуляции и пароводяной смеси.

**Дано:**

$$d_k = 0,02 \text{ м}$$

$$P = 16 \text{ МПа}$$

$$G' = 2 \text{ кг/с}$$

$$G'' = 0,5 \text{ кг/с}$$

**Определить:**  $w'$ ,  $w''$ ,  $w_0$ ,  $w_{см}$ , - ?

**Решение**

1. Определим приведенную скорость воды:  $\omega' = \frac{G' v'}{S}$ ,

$v'$  - ( $P = 16$  МПа, )  $= 0,00171 \text{ м}^3/\text{кг}$  – удельный объем воды на линии насыщения

$$S = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,02^2}{4} = 0,000314 \text{ м}^2 \text{ – площадь сечения канала}$$

$$\omega' = \frac{G' v'}{S} = \frac{2 \cdot 0,00171}{0,000314} = 10,9 \text{ м/с.}$$

2. Определим приведенную скорость пара

$$\omega'' = \frac{G'' v''}{S}, \quad v'' (P = 16 \text{ МПа}) = 0,0093 \text{ м}^3/\text{кг} \text{ - удельный объем пара на линии насыщения}$$

$$\omega'' = \frac{G'' v''}{S} = \frac{0,5 \cdot 0,0093}{0,000314} = 14,8 \text{ м/с.}$$

3. Определим скорость циркуляции потока

$$\omega_0 = \frac{G v'}{S}, \quad G = G' + G'' = 2 + 0,5 = 2,5 \text{ кг/с;}$$

$$\omega_0 = \frac{G v'}{S} = \frac{2,5 \cdot 0,00171}{0,000314} = 13,6 \text{ м/с.}$$

4. Определим скорость пароводяной смеси

$$\omega_{см} = \frac{G v_{см}}{S}; \quad v_{см} = v'' x + v' (1 - x); \quad x = \frac{G''}{G' + G''} = \frac{0,5}{2,5} = 0,2;$$

$$v_{см} = (1 - x)v' + xv'' = (1 - 0,2) \cdot 0,00171 + 0,2 \cdot 0,0093 = 0,00137 + 0,00186 = 0,00323;$$

$$\omega_{см} = \frac{Gv_{см}}{S} = \frac{2,5 \cdot 0,00323}{0,000314} = 25,7 \text{ м/с.}$$

Сделаем проверку для гомогенной смеси (без учета проскальзывания пара)

$$\omega_{см} = \omega' + \omega'' = 10,9 + 14,8 = 25,7 \text{ м/с.}$$

**Ответ:**  $w' = 10,9 \text{ м/с}$ ,  $w'' = 14,8 \text{ м/с}$ ,  $w_0 = 13,6 \text{ м/с}$ ,  $w_{см} = 25,7 \text{ м/с}$ .

### Задача № 3

Теплоноситель движется в трубке диаметром  $d = 6,0 \text{ мм}$ , давление воды  $P = 16 \text{ МПа}$ , температура воды на входе в канал  $t_{вх} = 280 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , температура воды на выходе из канала  $t_{вых} = 320 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , скорость движения потока  $w = 2,4 \text{ м/с}$ . Определить коэффициент сопротивления трения  $\xi_{тр}$ ?

### Задача № 4

Через испарительный участок круглого сечения протекает пароводяная смесь  $d_k = 20 \text{ мм}$ , давление пароводяного потока  $P = 8 \text{ МПа}$ , расход воды на линии насыщения  $G'_в = 2 \text{ кг/с}$ , расход пара на линии насыщения  $G''_п = 0,5 \text{ кг/с}$ . Определить скорость пароводяной смеси  $w_{см}$ , м/с; скорость циркуляции потока  $w_0$ , м/с?

### Задача № 5

Через испарительный участок круглого сечения протекает пароводяная смесь диаметром  $d_{вн} = 30 \text{ мм}$ , длина участка  $L = 4 \text{ м}$ , давление пароводяного потока  $P = 8 \text{ МПа}$ , расход воды на линии насыщения  $G'_в = 3 \text{ кг/с}$ , расход пара на линии насыщения  $G''_п = 1 \text{ кг/с}$ , коэффициент сопротивления трения  $\xi_{тр} = 0,012$ . Определить потери давления на испарительном участке  $\Delta P_{тр}$ ?

### Задача № 6

Водяной теплоноситель движется в трубе диаметром  $d_{экр} = 10 \text{ мм}$ , длиной  $L = 3 \text{ м}$ , с характеристиками воды: давление  $P = 17 \text{ МПа}$ , температура воды на входе в участок  $t_{вх} = 260 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , температура воды на выходе из участка  $t_{вых} = 300 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , скорость движения потока воды  $w = 7 \text{ м/с}$ , коэффициент сопротивления трения  $\xi_{тр} = 0,013$ . Определить потери давления на трения на участке трубы  $\Delta P_{тр}$ , потери давления от ускорения потока  $\Delta P_{уск}$ ?

### Задача № 7

Через испарительный участок канала круглого сечения диаметром  $d_k = 0,02 \text{ м}$ , протекает пароводяная смесь с давлением  $16 \text{ МПа}$ . В некотором сечении канала массовый расход воды  $G' = 2 \text{ кг/с}$  и  $G'' = 0,5 \text{ кг/с}$ . Определить приведенные скорости воды и пара, скорость циркуляции и пароводяной смеси.

### Задача № 8

Определить полное гидравлическое сопротивление канала при движении водяного теплоносителя в ТВС при известных размерах: количество твэлов в 1ТВС  $n_{ТВЭ} = 312$  шт.,  $n_{ц} = 1$  шт.,  $n_p = 18$  шт. и параметрах теплоносителя:  $P = 18$  МПа,  $t_{вх} = 290$  °С,  $t_{вых} = 320$  °С,  $H_{а.з.} = 3,5$  м, коэффициент трения  $\xi_{тр} = 0,12$ ,  $\xi_m = 0,5$ .

### Задача № 9

Определите мощность главных циркуляционных насосов, необходимую для прокачки теплоносителя, если известно что полное гидравлическое сопротивление в активной зоне составляет 0,2 МПа, температура теплоносителя на входе зону составляет  $t_{вх} = 260$  °С, на выходе из активной зоны  $t_{вых} = 310$  °С, тепловая мощность реактора  $Q_p = 3000$  МВт, КПД ГЦН  $\eta_{НАС} = 0,8$ .

### Задача № 10

Определить расход теплоносителя через активную зону реактора, а также сопоставить мощность ГЦН для реакторов ВВЭР и БН при одинаковой тепловой мощности и гидравлическом сопротивлении зоны 0,2 МПа. Тепловую мощность ВВЭР, БН при мощности 3100 МВт, температурах на входе в реактор 290 °С (ВВЭР), 395 °С (БН), и соответственно нагреве в реакторах  $\Delta t_{ВВЭР} = 30$  °С,  $\Delta t_{БН} = 150$  °С.

### Задача № 11

В прямоточных парогенераторах ЯЭУ при дисперсно-кольцевом течении пароводяного потока в области докризисных режимов теплообмена коэффициент теплоотдачи от стенки парогенерирующих труб увеличивается с ростом скорости движения двухфазной смеси ( $w_{см} = w_o[1 + x(\rho / \rho' - 1)]$ ), где  $w_o = \rho w / \rho'$  – скорость циркуляции,  $x$  – массовое расходное паросодержание. Для того, чтобы учесть этот эффект, можно воспользоваться формулой

$$\frac{\alpha_{дф,ч}}{\alpha_{дф,о}} = \sqrt{1 + 7 \cdot 10^{-9} \left( \frac{\rho^3 w_{см} \Gamma}{q} \right)^{3/2} \left( \frac{\alpha_{00}}{\alpha_o} \right)^2}, \text{ где } \alpha_{дф,о} \text{ рассчитывается по интерполя-}$$

ционному соотношению для двухфазного потока низкого паросодержания

$\alpha_{дф,о} = \sqrt{\alpha_o^2 + \alpha_{00}^2}$ , а  $\alpha_o$  и  $\alpha_{00}$  - по формулам, соответственно, для однофазного потока ( по скорости циркуляции) и для жидкости, кипящей в большом объеме. Оценить указанный эффект, рассмотрев случай течения пароводяной смеси в круглой трубе, если заданы следующие параметры: внутренний диаметр парогенерирующей трубы  $d = 12$  мм; давление  $p = 5$  МПа; массовая скорость потока  $\rho w = 1000$  кг/ м<sup>2</sup>·с; плотность теплового потока на стенке трубы  $q = 100$  кВт/м<sup>2</sup>; средняя величина массового расходного паросодержания  $x = 0,5$ .

**Задача № 12**

Активная зона корпусного ядерного реактора с кипящей водой состоит из шестигранных ТВС, в которых находятся пучки тепловыделяющих стержней наружным диаметром  $d = 9,1$  мм, образующие правильную треугольную решетку с шагом  $s_{\text{реш}} = 13$  мм. Вынужденное течение воды, кипящей на поверхности твэлов высотой  $H = 3,5$  м, осуществляется в ячейках между твэлами с температурой воды на входе  $t_{\text{вх}} = 275$  °С при давлении  $p = 7$  МПа. Рассмотреть отдельную ячейку, расход воды в которой  $G_{\text{яч}} = 0,15$  кг/с, а плотность теплового потока на поверхности твэлов по высоте  $z$  изменяется по закону

$$q(z) = q_0 \sum_{n=0}^4 a_n \left( \frac{z}{H} \right)^n,$$

где  $q_0 = 0,6$  МВт/м<sup>2</sup>;  $a_0 = 0,597$ ;  $a_1 = 3,553$ ,  $a_2 = -9,742$ ,  $a_3 = 8,566$ ;  $a_4 = -2,826$ .

Рассчитать распределения по высоте ячейки: плотности теплового потока  $q$ , температуры  $t_{\text{ж}}$  и относительной энтальпии теплоносителя  $x$  (массового расходного паросодержания), объемного расходного паросодержания  $\beta$ , плотности и скорости двухфазной смеси, температуры поверхности твэлов. Имея в виду, что в выходном участке канала двухфазный поток практически является равновесным, определить коэффициент скольжения  $s$  по формуле для адиабатного течения в вертикальных пучках стержней

Вычислить истинное паросодержание потока, а также истинные значения скоростей воды и пара на выходе из рассматриваемой ячейки:

$$s = 1 + 2.27 \left( 1 - \frac{p}{p_{\text{кр}}} \right)^2 \left( \frac{\rho'}{\rho w} \right)^{0.7}.$$

**Задача № 13**

Для охлаждения активных зон перспективных ядерных реакторов на быстрых нейтронах предусматривается использовать натрий или свинец. Сравнить коэффициенты теплоотдачи и перепады давления вследствие трения при турбулентном течении натрия и свинца в обогреваемой горизонтальной круглой трубе внутренним диаметром  $d = 20$  мм и длиной  $l = 3$  м при условии одинаковых затрат мощности на перекачку теплоносителя через трубу  $N = 40$  Вт при температуре 450 °С. КПД насоса принять равным 0,7. В расчетах коэффициентов теплоотдачи использовать установленные в экспериментах зависимости

$$\text{Nu} = a + b \text{Pe}^{0.8},$$

где для натрия  $a = 5$ ,  $b = 0,025$ ; для свинца  $a = 6,2$ ,  $b = 0,013$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. Шаповаленко В.В. Теплогидравлический расчет ЯР: конспект лекций по дисциплине / В.В Шаповаленко. - Севастополь: СНУЯЭиП, 2011.
2. Ривкин С.Л. Термодинамические свойства воды и пара: справочник / С.Л. Ривкин, А.А. Александров. - М.: Энергоатомиздат, 1984.
3. Кириллов П.Л. Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы) / П.Л. Кириллов, Ю.С. Юрьев. - М.: Энергоатомиздат, 1990.
4. Шмелев В.Д. Активные зоны ВВЭР для атомных электростанций (ОКБ ОКБ Гидропресс) / В.Д. Шмелев, Ю.Г. Драгунов, В.П. Денисов, И.Н. Васильченко. - М.: ИКЦ Академкнига, 2004.
5. Дементьев Б.А. Ядерные энергетические реакторы. - М.: Энергоатомиздат, 1984.
6. Владимиров В.И. Практические задачи по эксплуатации ядерных реакторов. - М.: Энергоатомиздат, 1986.
7. Крамеров А.Я., Шевелев Я.В. Инженерные расчеты ядерных реакторов. - М.: Энергоатомиздат, 1984.
8. Федик И.И., Колесов В.С., Михайлов В.Н. Температурные поля и термонапряжения в ядерных реакторах. - М.: Энергоатомиздат, 1985.
9. Клемин А.И., Полянин Л.Н., Стригулин М.М. Теплогидравлический расчет и теплотехническая надежность ядерных реакторов. - М.: Атомиздат, 1980.
10. Тепловыделение в ядерном реакторе / Е.С. Глушков, В.Е. Демин, Н.Н. Пономарев-Степной, А.А. Хрулев / Под ред. Н.Н. Пономарева-Степного. - М.: Энергоатомиздат, 1985. - 160 с.
11. Гидродинамика и теплообмен в атомных энергетических установках: Основы расчета / Под ред. В.И. Субботина. - М.: Атомиздат, 1975. - 406 с.
12. Бонилла Ч. Вопросы теплопередачи в ядерной технике. - М.: Госатомиздат, 1961. - 314 с.
13. Емельянов И.Я., Гаврилов П.А., Селиверстов Б.И. Управление и безопасность ядерных энергетических реакторов. - М.: Атомиздат, 1975. - 280 с.
14. Ран Ф., Адамантиадес А., Кентан Дж., Браун Ч. Справочник по ядерной энергетике. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 762 с.
15. Кокорев Л.С., Харитонов В.В. Прямое преобразование энергии и термоядерные энергетические установки: учебное пособие / Под ред. В.И. Субботина. - М.: Атомиздат, 1980. - 216 с.
16. Петухов Б.С., Генин Л.Г., Ковалев С.А. Теплообмен в ядерных энергетических установках: учебное пособие / Под ред. Б.С. Петухова. - М.: Энергоатомиздат, 1986. - 472 с.
17. Колпаков Г.Н., Кошелев Ф.П., Шаманин И.В. Нейтронно-физический и теплогидравлический расчет реактора на тепловых нейтронах. Часть 2. - Томск: Изд-во ТПУ, 1997. - 75 с.

18. Кошелев Ф.П., Шаманин И.В. Нейтронно-физический и теплогидравлический расчет реактора на тепловых нейтронах: учебное пособие /Под ред. В.И. Бойко. – Томск : Изд-во ТПУ, 1996. – 80 с.

19. Алтухов Д.Е., Кошелев Ф.П., Шаманин И.В. Расчет нестационарных и переходных нейтронно-физических процессов в реакторе на тепловых нейтронах: учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 1998. – 126 с.

20. Бойко В.И, Кошелев Ф.П., Шаманин И.В., Колпаков Г.Н. Нейтронно-физический и теплогидравлический расчет реактора на тепловых нейтронах: учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2002. – 192 с.

21. В.И.Деев Теплообмен в ядерных энергетических установках.Сборник задач: учебное пособие / В.В.Архипов, В.И.Деев, А.С. Корсун, Ю.Е. Похвалов; под ред. проф. В.И.Деева. - М.:НИЯУ МИФИ, 2010.-128с

## Приложение А

## Тепловой расчет водо-водяного реактора под давлением (ВВЭР)

Таблица А.1 - Характеристики основных типов ТВС реакторов ВВЭР

| Тип                                        | Серийная<br>ТВС (В-320)<br>ВВЭР-1000 | ТВСА<br>(В-320)<br>ВВЭР-1000 | ТВС-2М<br>ВВЭР-1200 | ТВС 2-го<br>поколения<br>ВВЭР-440 | ТВС-2М<br>ВВЭР-1300 |
|--------------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------|---------------------|-----------------------------------|---------------------|
| Электрическая мощность,<br>МВт             | 1000                                 | 1000                         | 1198,8              | 440                               | 1198,8              |
| Тепловая мощность, МВт                     | 3000                                 | 3000                         | 3200                | 1375±27                           | 3200                |
| Давление в теплоносителе,<br>МПа           | 15,7                                 | 15,7                         | 16,2                | 12,26±0,2                         | 16,2                |
| Давление во 2 контуре,<br>МПа              | 6,27                                 | 6,27                         | 7                   | 4,25                              | 7                   |
| Тем-ра воды на входе в<br>а.з., °С         | 289                                  | 291                          | 298,6               | 265÷270                           | 298,6               |
| Тем-ра воды на выходе из<br>а.з., °С       | 320                                  | 321                          | 329,7               | 293÷302                           | 329,7               |
| Расход теплоносителя,<br>м <sup>3</sup> /ч | 84800                                | 84800                        | 85600±290<br>0      | 39000                             | 85600±290<br>0      |
| Паропроизводительность,<br>кг/с            | 4x1470                               | 4x1470                       | 4x1654              | 6x1900                            | 4x1654              |
| Кол-во циркуляционных<br>петель            | 4                                    | 4                            | 4                   | 6                                 | 4                   |
| Длина корпуса ЯР, мм                       | 10885                                | 10885                        | 11185               | 11800                             | 11185               |
| Внут. диаметр корпуса<br>ЯР, мм            | 4150                                 | 4150                         | 4195                | 3560                              | 4250                |
| Эквивалентный диаметр<br>а.з., м           | 3,12                                 | 3,16                         | 3,16                | 2,88                              | 3,2                 |
| Скорость движения тн. в<br>а.з., м/с       | 5,7                                  | 5,7                          | 5,7                 | 4,4                               | 5,7                 |
| Форма ТВС                                  | шестигранная                         |                              |                     |                                   |                     |
| Размер ТВС «под ключ»,<br>мм               | 236                                  | 235                          | 235                 | 145                               | 235                 |
| Высота ТВС, мм                             | 4570                                 | 4570                         | 4570                | 3200                              | 4570                |
| Шаг решетки твэлов, мм                     | 12,75                                | 12,75                        | 12,75               | 12,3±0,12                         | 12,75               |
| Число ТВС в а.з., шт.                      | 163                                  | 163                          | 163                 | 313/349                           | 163                 |
| Число ТВС с ОРСУЗ в<br>а.з., шт.           | 61                                   | 61                           | 121                 | 37(АРК)                           | 94                  |
| В т.ч. содержит СВП, шт.                   | 54                                   | нет                          | нет                 | нет                               | нет                 |
| Число ячеек в 1 ТВС, шт.                   | 331                                  | 331                          | 331                 |                                   | 331                 |
| Число твэлов в ТВС, шт.                    | 312                                  | 312                          | 312                 | 126                               | 313                 |
| Число ПС в 1 ОРСУЗ, шт.                    | 18                                   | 18                           | 18                  | нет                               | 16                  |
| Центральный канал, шт.                     | 1                                    | 1                            | 1                   | 1                                 | 1                   |
| Измерительный канал, шт.                   |                                      |                              |                     |                                   | 1                   |
| Число СВП в 1 ТВС, шт.                     | 18                                   | нет                          | нет                 |                                   | нет                 |
| Число твэгов в 1 ТВС, шт.                  | -                                    | -                            | 6, 9, 12, 24        | 6(ПК)                             | 6, 9, 12, 24        |
| Число ДР в 1 ТВС, шт.                      | 15                                   | 15                           | 8                   | 10                                | 8                   |
| Материал ДР                                | (Zr-1%Nb)                            | (Zr-1%Nb)                    | (Zr-1%Nb)           | (Zr-1%Nb)                         | (Zr-1%Nb)           |
| Число уголков в ТВС, шт.                   |                                      | 6 (Э-635)                    | нет                 | нет                               | нет                 |
| Толщина чехла, мм                          |                                      |                              |                     | 1,4(Э-110)                        |                     |

Продолжение таблицы А.1

| Тепловыделяющий элемент (ТВЭЛ)                                 |                               |            |                  |             |            |
|----------------------------------------------------------------|-------------------------------|------------|------------------|-------------|------------|
| Длина ТВЭЛА, мм                                                | 3836                          | 3836       | 3988             | 2540        |            |
| Высота $H_{\text{вз}}$ , мм                                    | 3530                          | 3530       | 3680             | 2500        | 3750       |
| Оболочка ТВЭЛА: $\varnothing/\delta$ , мм                      | 9,1/0,65                      | 9,1/0,65   | 9,1/0,65         | 9,1/0,6     | 9,1/0,57   |
| Материал оболочки ТВЭЛА                                        | Э-110(Н-1)                    | Э-110(Н-1) | Э-110(Н-1)       | Э-110(Н-1)  | Э-110(Н-1) |
| Максимальная температура оболочки, °С                          | 355                           | 352        | 355              | 350         | 355        |
| Средняя (максимальная) линейная тепловая нагрузка ТВЭЛА, кВт/м | 16 (44,8)                     | 16,7(44,8) | 16(44,8)         | 12,96(42,0) | 16(44,8)   |
| Среднее (максимальное) выгорание в ТВС, МВт·сут/кг             | 49 (50)                       | 55(60)     | 58(70)           | 42(52)      | 58(70)     |
| Таблетка (UO <sub>2</sub> )                                    |                               |            |                  |             |            |
| Плотность топлива, г/см <sup>3</sup>                           | 10,4-10,7                     | 10,4-10,7  | 10,4-10,7        | 10,4-10,7   | 10,4-10,7  |
| $\varnothing$ , мм внешний/отверстия                           | 7,57/2,3 <sup>+1</sup> ,<br>6 | 7,8/0      | 7,6/1,2<br>7,8/0 | 7,6/1,2     | 7,8/0      |
| Контактный зазор, мм                                           | 0,1                           | 0,1        | 0,1              | 0,13-0,22   | 0,1        |
| Направляющие трубы                                             |                               |            |                  |             |            |
| Количество в 1 ТВС, шт                                         | 18                            | 18         | 18               | -           | 18(16)     |
| НТ, $\varnothing$ , мм внешний/внутренний                      | 12,6/10,9                     | 12,6/10,9  | 12,6/10,9        | -           | 12,6/10,9  |
| Материал направляющей трубы                                    | 08X18Н10<br>Т                 | Э-635      | Э-635            | -           | Э-635      |
| Центральная труба                                              |                               |            |                  |             |            |
| $\varnothing$ , мм внешний / внутренний                        | 11,2/10,4                     | 13/11      | 13/11            | -           | 13/11      |
| Материал центральной трубы                                     | 08X18Н10Т                     | Э-110      | Э-635            |             | Э-635      |

### Тепловыделяющая сборка реактора ВВЭР

В активной зоне реактора ВВЭР-1000 (ВВЭР-1200, ВВЭР-1300) размещены 163 бесчехловые шестигранные тепловыделяющие сборки (ТВС). Расстояние между центрами ТВС (шаг решётки) составляет 235 мм. Базовая конструкция ТВС состоит из головки, хвостовика, силового каркаса, куда входят направляющие каналы под поглощающие стержни органа регулирования системы управления и защиты, центральный канал и дистанционирующие решетки, которые привариваются к центральному каналу. Характеристики ТВС представлены в таблице А.1. В ТВС по требованию эксплуатирующей организации могут устанавливаться перемешивающие решетки. Расположение в ТВС измерительного канала энерговыделения и температуры теплоносителя зависит от конструкции и количества поглощающих стержней в ОР СУЗ, конструкции, назначения измерительного канала и количества измерительных каналов, используемых в системе внутриреакторного контроля. Место положения измерительного канала в ТВС может варьироваться: либо он располагается в центральном канале, либо в одной из ячеек направляющего канала.

Концевой элемент ТВС (хвостовик) устанавливается в опорную трубу с щелевыми отверстиями для прохода через них теплоносителя в ТВС, которая в свою очередь закрепляется во внутрикорпусной шахте реактора.

Шестигранная головка ТВС имеет в своей верхней части плиту, в которой крепятся направляющие каналы под поглощающие стержни СУЗ и один канал для датчика контроля энерговыделений. В плите выбраны трапециевидные окна, через которые теплоноситель выходит из ТВС.

Тепловыделяющий элемент (ТВЭЛ) состоит из оболочки, верхней и нижней заглушки, топливного сердечника, набранного из таблеток, пружинного фиксатора для компенсации температурных удлинений топливных таблеток, газосборника, компенсационного объема, заполненного гелием для отвода тепла от топливных таблеток к оболочке ТВЭЛА и создания необходимого внутреннего давления под оболочкой ТВЭЛА. Оболочка тепловыделяющего элемента для реакторов, работающих на тепловом спектре нейтронов, охлаждаемые водным теплоносителем, изготавливается из циркониевого сплава, так как он слабо поглощает тепловые нейтроны. В качестве ядерного топлива может быть загружен диоксид урана, уран-гадолиниевое топливо, рассматриваются варианты загрузки уран-эрибиевого топлива, уран-плутониевого топлива.

Конструкция тепловыделяющих сборок ВВЭР-440, их количество и назначение значительно отличается от конструкции ТВС ВВЭР-1000.

Активная зона ВВЭР-440 состоит из 312 рабочих шестигранных кассет с ТВЭлами, содержащими двуокись урана и из 37 кассет АРК. Материал стенок кассет — сплав циркония с ниобием и с добавкой бора до 0,15 % по весу. В общем в состав ТВС входит пучок стержневых ТВЭЛОВ, шестигранный корпус-чехол, цилиндрической формы хвостовик, головка и каркас под ТВЭлы, с помощью последнего обеспечивается крепление ТВЭЛОВ в ТВС. Каркас ТВС включает в себя дистанционирующие решетки, нижнюю несущую решетку, верхнюю и средние направляющие решетки из нержавеющей стали или циркониевого сплава, которые механически связаны между собой центральной трубой из циркониевого сплава. Нижние концы ТВЭЛОВ жестко закреплены в несущей решетке, а верхние концы ТВЭЛОВ имеют возможность продольного перемещения в направляющей решетке при температурных расширениях. Нижняя несущая решетка крепится к цилиндрическому хвостовику ТВС, а верхняя направляющая решетка — к головке ТВС.

СУЗ ВВЭР-440 имеет две независимые системы: систему АРК и систему борного регулирования.

Кассета АРК является рабочим органом системы управления и защиты и состоит из двух частей: ТВС (топливной части) и надставки (элементов из бористой стали), соединенных промежуточной штангой, которая в свою очередь сцепляется со штангой привода. Кассета АРК выполняет следующие основные функции: обеспечивает быстрое прекращение цепной реакции деления в реакторе путем быстрого введения в активную зону поглотителя и одновременным выводением из активной зоны ее топливной части; участвует в автоматическом регулировании в целях поддержания мощности реактора на заданном уровне и

перевода его с одного уровня мощности на другой; компенсирует быстрые изменения реактивности (температурный, мощностной эффекты, отравление и т.д.). В активной зоне рабочие кассеты и кассеты АРК располагаются по треугольной решетке с шагом  $147 \pm 0.3$  мм.

Обогащение ядерного топлива для реакторов типа ВВЭР по  $^{235}\text{U}$  не превышает 5 %. Для выравнивания энерговыделений по радиусу активной зоны и продления топливной кампании в состав ядерного топлива включают материал поглотитель.

Тепловой расчет реактора ведется для наиболее энергонапряженной ТВС. Высота активной зоны разбивается на равные участки, где в каждом отдельном сечении веде, расчет изменения температуры ядерного топлива, расчет температуры оболочки твэла при конвективном теплообмене.

Таблица А.2 - Тепловой расчет реактора ВВЭР с чехловой шестигранной ТВС

| Характеристика                              | Формула или исходное значение                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|---------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Объем активной зоны, $\text{м}^3$           | $V_{аз} = Q_{мелл} / q_v$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Диаметр активной зоны, м                    | $D_{аз} = \sqrt{\frac{4 \cdot V_{аз}}{\pi \cdot H_{аз}}}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Число ТВС                                   | $N_{мел} = S_{аз} / S_{жч}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Площадь одной ячейки, $\text{м}^2$          | $S_{жч} = 6 \sqrt{\frac{1}{3}} \left( \frac{h_{кл} + \delta_{мел}}{2} \right)^2 = \frac{\sqrt{3}}{2} (h_{кл} + \delta_{мел})^2$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Площадь сечения активной зоны, $\text{м}^2$ | $S_{аз} = \frac{\pi \cdot D_{аз}^2}{4}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Проходное сечение ТВС, $\text{м}^2$         | $s_{мч} = \frac{\sqrt{3}}{2} (h_{кл} - 2\delta_{мел})^2 - \frac{\pi}{4} (d_{мелл}^2 n_{мелл} + d_p^2 n_p + d_y^2 n_y)$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Гидравлический периметр ТВС, м              | $\Pi_z = 6 \sqrt{\frac{1}{3}} (h_{кл} - 2\delta_{мел}) + \pi (d_{мелл} n_{мелл} + d_p n_p + d_y n_y)$ <p> <math>d_{твэл}</math> - наружный диаметр твэла, м;<br/> <math>d_p</math> - наружный диаметр направляющего канала под поглощающие стержни Ор СУЗ, м;<br/> <math>d_{ц}</math> - наружный диаметр центрального канала под измерительный канал энерговыделения, м;<br/> <math>n_{твэл}</math> - количество твэлов в ТВС, м;<br/> <math>n_p</math> - количество направляющих каналов под поглощающие стержни Ор СУЗ, м;<br/> <math>n_{ц}</math> - один центральный канал под размещение измерительного канала энерговыделения. </p> |
| Тепловой (гидравлический) диаметр ТВС, м    | $d_z = 4s_{мч} / \Pi_z$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |

Продолжение таблицы А.2

| Характеристика                                                          | Формула или исходная величина                                                                                                                                                                                                                     |
|-------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Высота активной зоны с учетом экстраполированной добавки, м             | $H_{з\phi} = H_{аз} + 2\delta m.з$                                                                                                                                                                                                                |
| Экстраполированная добавка при наличии железобетонного отражателя, м    | $\delta m.з = 0,1$                                                                                                                                                                                                                                |
| Тепловой периметр ТВС, м                                                | $\Pi_{мелт} = \pi d_{мелт}$                                                                                                                                                                                                                       |
| Полная поверхность пучка твэлов в одной ТВС, м <sup>2</sup>             | $F = \pi d_{мелт} N_{мелт} H_{аз}$                                                                                                                                                                                                                |
| Толщина оболочки твэлов, м                                              | $\delta_{об} = (d_{мелт} - d_{эквм.об})/2$<br>$d_{твэл}$ – наружный диаметр оболочки твэла, м;<br>$d_{внутр.об}$ – внутренний диаметр оболочки твэла, м.                                                                                          |
| Расход теплоносителя через активную зону, кг/с                          | $G_{аз} = Q_{мелт} k_R / (i_{вх} - i_{ex})$                                                                                                                                                                                                       |
| Энтальпия воды на выходе из активной зоны, Дж/кг                        | $i_{вх} = i(p_{вх}, t_{вх})$                                                                                                                                                                                                                      |
| Энтальпия воды на входе в активную зону, Дж/кг                          | $i_{ex} = i(p_{ex}, t_{ex})$                                                                                                                                                                                                                      |
| Температура воды на выходе из активной зоны, °С                         | $t_{вх} = t_{ex} + \Delta t_{мн}$<br>$\Delta t$ – нагрев воды в активной зоне реактора, °С                                                                                                                                                        |
| Коэффициент неравномерности по радиусу активной зоны                    | $k_R$ - выбирается из таблицы 4.1 либо рассчитывается по формулам п.4                                                                                                                                                                             |
| Расход теплоносителя через ТВС, кг/с                                    | $G_{ТВС} = \frac{G_{аз}}{N_{мелт}}$                                                                                                                                                                                                               |
| Средняя скорость теплоносителя в ТВС, м/с                               | $w = G_{мелт} v / S_{мн}$<br>$v$ - удельный объем теплоносителя, определяемый при давлении и средней температуре теплоносителя, м <sup>3</sup> /кг                                                                                                |
| Температура теплоносителя по высоте канала для ТВС средней нагрузки, °С | $t_m(z) = t_{ex} + \frac{Q_{мелт}}{G_{аз} c_p(z)} \times (1 + \frac{\sin \frac{\pi z}{H_{з\phi}}}{\sin \frac{\pi H_{аз}}{2H_{з\phi}}})$<br>$c_p$ - удельная изобарная теплоемкость, определяемая по давлению и средней температуре теплоносителя. |
| Теплоемкость воды в точке, Дж/(кг·К)                                    | $c_p(z) = c_p(p_z, t_z)$                                                                                                                                                                                                                          |
| Координаты расчета                                                      | Z: -Наз/2; -Наз/3; -Наз/6; -Наз/8; 0;<br>Наз/8; Наз/6; Наз/3; Наз/2;                                                                                                                                                                              |

| Характеристика                                                                                                   | Формула или исходная величина                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Температура теплоносителя по высоте канала для ТВС максимальной нагрузки, °С                                     | $t_{m,max}(z) = t_{ex} + \frac{(t_{вых} - t_{ex})k_R}{2} \times \left(1 + \frac{\sin \frac{\pi z}{H_{зф}}}{\sin \frac{\pi H_{зб}}{2H_{зф}}}\right),$ <p><math>t_{вых}</math> - температура теплоносителя на выходе из активной зоны °С,<br/> <math>t_{ex}</math> - температура теплоносителя на входе в активную зону °С.</p> |
| Линейная тепловая нагрузка с учетом косинусоидального распределения тепловыделений по высоте активной зоны, Вт/м | $q_l(z) = \frac{Q_{мелт}k_H}{(N_{мес} \cdot n_{мес,л} \cdot H_{зб})} \cos\left(\frac{\pi z}{H_{зф}}\right)$                                                                                                                                                                                                                   |
| Линейный тепловой поток в центре по высоте ТВС средней нагрузки, Вт/м                                            | $q_{l,0} = \frac{Q_{мелт}k_H}{(N_{мес} \cdot n_{мес,л} \cdot H_{зб})}$                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Коэффициент неравномерности по высоте активной зоны                                                              | $k_H = \frac{\pi H_{зб}}{2H_{зф} \sin\left(\frac{\pi H_{зб}}{2H_{зф}}\right)}$                                                                                                                                                                                                                                                |
| Линейный тепловой поток в центре по высоте ТВС максимальной нагрузки, Вт/м                                       | $q_{l,0} = Q_{мелт}k_V / N_{мес}H_{зб}$                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Объемный коэффициент неравномерности тепловыделений в активной зоне                                              | $k_V = k_R \cdot k_H$                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Температура наружной поверхности оболочки твэла по высоте (для ТВС средней и максимальной нагрузки), °С          | $t_{ос}^H(z) = t_m(z) + \frac{q_l(z)}{\pi d_{мес,л} \alpha(z)}$                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Коэффициент теплоотдачи по высоте канала, Вт/(м²·К)                                                              | $\alpha(z) = 0,021 \frac{\lambda(z)}{d_z} Re(z)^{0,8} Pr(z)^{0,43}$                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Число Рейнольдса                                                                                                 | $Re(z) = 4G_{мес} / (\mu(z) \cdot \Pi_z)$ <p><math>\mu(z)</math> – динамическая вязкость, определяемая по давлению и температуре теплоносителя в сечении, Па·с<br/> <math>\Pi_z</math> – гидравлический периметр, м<br/> <math>G_{мес}</math> – расход теплоносителя через одну ТВС, кг/с</p>                                 |

Продолжение таблицы А.2

| Характеристика                                                                                                                     | Формула или исходная величина                                                                                                                                               |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Скорость теплоносителя в сечении по высоте ТВС, м/с                                                                                | $w(z) = G_{max} v(z) / S_{max}$<br>$v(z)$ - удельный объем теплоносителя, определяемый при давлении и температуре теплоносителя в сечении по высоте ТВС, м <sup>3</sup> /кг |
| Теплопроводность воды в сечении, Вт/(м·К)                                                                                          | $\lambda(z) = \lambda(p_z, t_z)$                                                                                                                                            |
| Динамическая вязкость воды в сечении, Па·с                                                                                         | $\mu(z) = \mu(p_z, t_z)$                                                                                                                                                    |
| Температура оболочки твэла на внутренней поверхности (для ТВС средней и максимальной нагрузки), °С                                 | $t_{ос}^{сн}(z) = t_{ос}^н(z) + \frac{q_1(z)\delta_{ос}}{2\pi\lambda_{ос}(z)}$                                                                                              |
| Теплопроводность оболочки твэла, Вт/(м·К)                                                                                          | $\lambda_{ос}$ - рассчитывается по формулам п.5.5 с учетом выбора материала оболочки твэла                                                                                  |
| Температура наружной поверхности топливного сердечника (для ТВС средней и максимальной нагрузки), °С                               | $t_c^н(z) = t_{ос}^{сн}(z) + \frac{q_1(z)\delta_z}{2\pi\lambda_z}$                                                                                                          |
| Теплопроводность контактного слоя между топливом и оболочкой твэла, заполненного гелием, Вт/(м <sup>2</sup> ·К)                    | $\lambda_z$ – рассчитывается по формулам п.5.5.                                                                                                                             |
| Температура топливной таблетки на внутренней поверхности при наличии в ней отверстия (для ТВС средней и максимальной нагрузки), °С | $t_c^{сн}(z) = t_c^н(z) + \frac{q_1(z)}{4\pi\lambda_{мон}(z)} \times \left[1 - \frac{2r_0^2}{r_c^2 - r_0^2} \ln \frac{r_c}{r_0}\right]$                                     |
| Наружный радиус топливной таблетки, м                                                                                              | $r_c = d_c/2$                                                                                                                                                               |
| Внутренний радиус топливной таблетки, м                                                                                            | $r_0 = d_0/2$                                                                                                                                                               |
| Теплопроводность сердечника, Вт/(м·К), в зависимости от температуры топлива                                                        | $\lambda_{мон}$ - рассчитывается по формулам п.5.5 с учетом выбора вида ядерного топлива                                                                                    |

| Характеристика                                                                                                   | Формула или исходная величина                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Тепловой поток на единицу поверхности твэла по высоте (ТВС средней и максимальной нагрузки), Вт/м <sup>2</sup>   | $q_s(z) = q_l(z)/\pi d_{\text{вс.т}}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| При $t_{\text{об}}^{\text{н}}(z) > t_s(z)$ создаются условия поверхностного кипения                              | При $t_{\text{об}}^{\text{н}}(z) > t_s(z)$ создаются условия поверхностного кипения                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Число Рейнольдса при наличии кипения теплоносителя на поверхности твэла                                          | $Re_q = \frac{q_s}{p' r' \sqrt{\frac{\sigma_s}{9,81(p' - p'')}}}$ <p>г - скрытая теплота парообразования при давлении насыщения, Дж/кг<br/> <math>\rho'</math> - плотность воды при давлении насыщения, кг/м<sup>3</sup><br/> <math>\rho''</math> - плотность пара при давлении насыщения, кг/м<sup>3</sup><br/> <math>\sigma_s</math> - коэффициент поверхностного натяжения при температуре насыщения, Н/м.<br/> <math>v'</math> - кинематическая вязкость, м<sup>2</sup>/с</p> |
| Значение энтальпии в точке кипения                                                                               | $x_{\text{н,к}} = -0,49 \left[ \frac{q_s}{p' w_o r'} \right]^{0,3} \times Re_q^{0,4} \left( \frac{p}{p_{\text{кп}}} \right)^{0,15}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Истинное объемное паросодержание в точке $x_{\text{отн}}=0$                                                      | $\varphi_0 = 0,43 \left( \frac{q_s}{p' w_o r'} \right)^{0,15} \times Re_q^{0,2} \left( \frac{p}{p_{\text{кп}}} \right)^{-0,225}$ <p><math>p</math> – давление воды в ядерном реакторе, Па</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Критическое давление, Па                                                                                         | $p_{\text{кп}} = 22,115 \cdot 10^6$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Скорость циркуляции теплоносителя в точке начала кипения, м/с                                                    | $w_o = G_{\text{мсс}} v' / s_{\text{мк}}$ <p><math>v'</math> - удельный объем теплоносителя, определяемый при температуре кипения теплоносителя, м<sup>3</sup>/кг</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Массовое паросодержание в точке $x_{\text{отн}}=0$ (без учета проскальзывания на участке поверхностного кипения) | $x_0 = \frac{1}{1 + \frac{1 - \varphi_0 p'}{\varphi_0 p}}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Относительная энтальпия по высоте канала (для ТВС средней и максимальной нагрузки)                               | $x_{\text{отн}}(z) = \frac{i_T(z) - i(z)}{r(z)}$ <p><math>i_T</math> - энтальпия воды при давлении и температуре теплоносителя в сечении, Дж/кг</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Координата начала кипения, м                                                                                     | $z_{\text{н,к}} = z_n + \frac{i_{\text{н,к}} - i_n}{i_{n+1} - i_n}$ $i_n < i_{\text{н,к}} < i_{n+1}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |

Продолжение таблицы А.2

| Характеристика                                                                                         | Формула или исходная величина                                                                                       |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Энтальпия теплоносителя в точке начала кипения, Дж/кг                                                  | $i_{\text{н.к.}} = i' + r x_{\text{н.к.}}$ $i'$ - энтальпия воды при давлении насыщения, Дж/кг                      |
| Критическая тепловая нагрузка, Вт/м <sup>2</sup>                                                       | $q_{\text{кр}}(z) = 35,4 \cdot (\rho \omega)^{0,5} \cdot \Delta t^{0,33} \cdot \left(1 - \frac{v}{v'}\right)^{1,8}$ |
| Коэффициент запаса до кризиса теплоотдачи                                                              | $K_{\text{зап}} = q_{\text{кр}}(z) / q_{\text{max}}(z)$                                                             |
| Тепловой поток на единицу поверхности твэла по высоте ТВС при максимальной нагрузки, Вт/м <sup>2</sup> | $q_{\text{max}}(z) = q_l(z) k_v / \pi d_{\text{всст}}$                                                              |

### Тепловой расчет реактора, работающего на быстром спектре нейтронов с жидкометаллическим теплоносителем

Таблица Б. 1 – Характеристики реактора БН-350, БН-600, БН-800

| Характеристика                                                                          | БН-350                                                 | БН-600                                                 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| Тепловая мощность реактора, МВт                                                         | 1000                                                   | 1470                                                   |
| Электрическая мощность реактора, МВт                                                    | 150*                                                   | 600                                                    |
| Температура натрия на входе в реактор, °С                                               | 300                                                    | 374                                                    |
| Температура натрия на выходе из реактора, °С                                            | 500                                                    | 550                                                    |
| Расход натрия через реактор, т/ч                                                        | 14100                                                  | 24000                                                  |
| Параметры ПГ:                                                                           |                                                        |                                                        |
| Температура натрия на входе в ПГ, °С                                                    | 450                                                    | 520                                                    |
| Температура натрия на выходе из ПГ, °С                                                  | 270                                                    | 320                                                    |
| Давление свежего пара в ПГ, МПа                                                         | 5                                                      | 14                                                     |
| Температура перегретого пара в ПГ, °С                                                   | 435                                                    | 505                                                    |
| Характеристики активной зоны реактора:                                                  |                                                        |                                                        |
| Эквивалентный диаметр активной зоны, м                                                  | 1,58                                                   | 2,05                                                   |
| Высота активной зоны реактора, м                                                        | 1,06                                                   | 0,75                                                   |
| Высота торцевых экранов зоны воспроизводства в твэле, м                                 | 0,6                                                    | 0,4                                                    |
| Число зон обогащения                                                                    | 2                                                      | 2                                                      |
| Число ТВС в этих зонах:                                                                 |                                                        |                                                        |
| Зона малого обогащения топлива                                                          | 109ТВС<br>В 1 ТВС<br>127твэлов<br>Диаметр твэла 6,9 мм | 209ТВС<br>В 1 ТВС<br>127твэлов<br>Диаметр твэла 6,9 мм |
| Зона большого обогащения топлива                                                        | 117ТВС                                                 | 162ТВС                                                 |
| Число ТВС в зоне воспроизводства (боковом экране), шт.                                  | 412ТВС                                                 | 380 ТВС                                                |
| Шаг ТВС (расстояние между центрами ТВС), мм                                             | 98                                                     | 98                                                     |
| Средняя энергонапряженность активной зоны, МВт/м <sup>3</sup>                           | 480                                                    | 550                                                    |
| Максимальная линейная мощность твэлов активной зоны, кВт/м                              | 44                                                     | 53                                                     |
| Материал чехла                                                                          | 16Cr11Ni3Mo                                            | Сталь<br>ЭП-450                                        |
| Вид ядерного топлива / максимальная температура нагрева в центре топливной таблетки, °С | UO <sub>2</sub><br>1700 °С                             | UO <sub>2</sub> +PuO <sub>2</sub><br>1800 °С           |
| Материал / максимальная температура нагрева оболочки твэла, °С                          | /600 °С                                                | ЧС-68хд/<br>700 °С                                     |

Продолжение таблицы Б.1

| Характеристика                                                                                          | БН-350    | БН-600    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|-----------|
| Характеристика ТВС активной зоны:                                                                       |           |           |
| Размер под ключ, мм/ толщина чехла, мм                                                                  | 96/2      | 92/2      |
| Количество твэлов в ТВС активной зоны, шт.                                                              | 127       | 169       |
| Диаметр оболочки твэла, мм                                                                              | 6,9       | 6,1       |
| Толщина оболочки твэла, мм                                                                              | 0,4       | 0,4       |
| Шаг расположения твэлов в ТВС, мм                                                                       | 7,0       | 7,0       |
| Диаметр топливной таблетки, мм                                                                          | 5,6       | 5,6       |
| Толщина газового зазора, заполненного гелием, мм                                                        | 0,1       | 0,1       |
| С торцов к твэлам активной зоны примыкают твэлы верхнего и нижнего торцевых экранов, их характеристики: | по 37 шт. | по 37 шт. |
| Количество твэлов и в верхней и в нижней торцевой зоне ТВС, шт.                                         | 12,0      | 12,0      |
| Диаметр оболочки твэла, мм                                                                              | 0,4       | 0,4       |
| Толщина оболочки твэла, мм                                                                              |           |           |
| Характеристика ТВС зоны воспроизводства:                                                                |           |           |
| Количество твэлов в ТВС активной зоны, шт.                                                              | 37        |           |
| Диаметр оболочки твэла, мм                                                                              | 14,2      |           |
| Толщина оболочки твэла, мм                                                                              | 0,5       |           |

Таблица Б.2 – Характеристики реактора БРЕСТ-ОД-300

| Характеристика                                                                    | Значение  |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Электрическая мощность, МВт                                                       | 300       |
| Мощность тепловая, МВт                                                            | 700       |
| Количество петель                                                                 | 4         |
| Диаметр активной зоны, мм                                                         | 2650      |
| Максимальное (гидростатическое) давление теплоносителя в первом контуре, МПа      | 1,17      |
| Средняя температура свинцового теплоносителя на входе/выходе из активной зоны, °C | 420/535   |
| Число ТВС в АЗ                                                                    | 169       |
| Число твэл в ТВС                                                                  | 160       |
| Шаг твэлов в треугольной решетке, мм                                              | 13,4      |
| Номинальная длина твэла, мм                                                       | 2140      |
| Высота топливного столба (высота активной зоны), мм                               | 1100      |
| Материал оболочки твэла                                                           | ЭП823-III |
| Наружный диаметр оболочки, мм:                                                    |           |
| - твэл ЦЗ                                                                         | 9,70±0,03 |
| - твэл ПЗ                                                                         | 10,50±0,3 |
| Внутренний диаметр оболочки, мм:                                                  |           |
| - твэл ЦЗ                                                                         | 8,70±0,03 |
| - твэл ПЗ                                                                         | 9,50±0,03 |

Продолжение таблицы Б.2

| Характеристика                                                                                                                                                     | Значение     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Диаметр топливной таблетки, мм:                                                                                                                                    |              |
| - твэл ЦЗ                                                                                                                                                          | 8,5          |
| - твэл ПЗ                                                                                                                                                          | 9,3          |
| Максимальная линейная мощность, Вт/см:                                                                                                                             |              |
| - твэл ЦЗ                                                                                                                                                          | 420          |
| - твэл ПЗ                                                                                                                                                          | 340          |
| Максимальная температура на внутренней поверхности оболочки твэла с учетом факторов перегрева, °С                                                                  | 670          |
| Средняя температура рабочего тела на входе и выходе из парогенератора, °С                                                                                          | 340/505      |
| Давление на выходе из парогенератора, МПа                                                                                                                          | 17           |
| Направление движения теплоносителя                                                                                                                                 | снизу-вверх  |
| Объем теплоносителя первого контура, м <sup>3</sup>                                                                                                                | 900          |
| Суммарный расход теплоносителя через активную зону, т/с                                                                                                            | 41,7         |
| Скорость свинца в пучке твэл /дистанционирующих решетках, м/с                                                                                                      | 1,8/2,3      |
| Максимальная скорость теплоносителя в меж-твэльных зазорах, м/с                                                                                                    | Не более 2,3 |
| Максимальное (гидростатическое) давление теплоносителя, МПа                                                                                                        | 1,17         |
| Давление теплоносителя на входе в ТВС, МПа (абс.), не более                                                                                                        | 0,9          |
| Перепад давления теплоносителя на ТВС, МПа, не более                                                                                                               | 0,2          |
| Удельная тепловая мощность топлива, кВт/кг                                                                                                                         | 33,8         |
| Вид топлива: таблеточное СНУП топливо (U+Pu)N на основе энергетического плутония и обедненного урана                                                               |              |
| Вид топлива: таблеточное смешанное уран-плутониево-актиноидное нитридное топливо (U+Pu+MA)N, на основе регенерата собственного ОЯТ с дошихтовкой обедненным ураном |              |
| Массовая доля плутония в смеси урана и плутония в составе нитридов, %                                                                                              | 13,6 ±0,2    |
| Массовая доля изотопа <sup>235</sup> U в смеси изотопов урана в составе нитридов, %                                                                                | 0,20±0,05    |
| Содержание азота в топливной композиции, % масс                                                                                                                    | 5,2-5,6      |
| Содержание примесей в топливе, % масс, не более: кислород - 0,15 %; углерод - 0,15 %; Fe, Cr, Ni, Ca, Al по 0,02 %                                                 |              |
| Кампания топлива 5 лет, период между перегрузками 12 месяцев.                                                                                                      |              |

### Тепловыделяющая сборка реактора БРЕСТ-ОД-300

Активная зона набрана из бесчехловых шестигранных ТВС со стержневыми твэлами. Радиальное выравнивание мощностей ТВС и подогревов теплоносителя обеспечивается профилированием топливной загрузки и расхода свинца путем использования в центральных сборках твэлов меньшего диаметра, а в периферийных – большего. В реакторе БРЕСТ-ОД-300 для твэла, охлаждаемого свинцовым теплоносителем, оболочка изготавливается из стали ЭП823-Ш. Сталь ЭП823-Ш относится к ферритно-мартенситному классу, обладает высокой радиационной стойкостью, коррозионной стойкостью в потоке свинца и хорошей технологичностью и свариваемостью.

В реакторе БРЕСТ-ОД-300 в конструкции твэла в зазор между топливом и внутренней поверхностью оболочки твэла под давлением  $p = 0,25$  МПа закачивается гелий.

В качестве ядерного топлива используется таблеточное нитридное топливо либо смешанное уран-плутониевое нитридное топливо. Нитридное топливо обладает большей плотностью и теплопроводностью по сравнению с оксидным топливом, имеет малый перепад температур между центром и поверхностью топливной таблетки, уменьшает мощностной эффект реактивности и не так ограничивает линейную тепловую нагрузку. Низкая теплоемкость нитридного ядерного топлива является преимуществом при нарушении циркуляции теплоносителя через активную зону, потому что в таком случае в топливе будет запасено малое количество энергии. На нитридном топливе можно получить коэффициент воспроизводства выше, чем при использовании диоксида урана. Между перегрузками работа реактора на нитридном топливе осуществляется при малом и практически постоянном запасе реактивности. Смешанное уран-плутоний нитридное топливо (СНУП-топливо) представляет собой керамическую смесь мононитрида отавального урана и мононитрида плутония. Замыкание ЯТЦ в случае с БРЕСТ обеспечивается переходом на эксплуатацию в режиме самообеспечения собственными делящимися нуклидами без добавления внешнего плутония. Достигнутый уровень выгорания для СНУП-топливом 9%.

Основным недостатком СНУП-топлива является сложность технологических процессов при его производстве. Порошки нитридов U и Pu пирофорны (самовоспламеняются в воздушной среде даже при относительно низких температурах), а в атмосфере инертных или защитных газов активно поглощают примеси. При нарушении условий в строго определенной газо-температурной среде, при спекании образуются «полупуторный нитрид»  $(U,Pu)_2N_3$  и металлическая фаза, а топливо становится непригодным для использования в ядерном реакторе [10].

Таблица Б.3 – Теплопроводность СНУП-топлива [11]

| t, °C | –13%, Вт/(м·K) |
|-------|----------------|
| 420   | 12,515         |
| 540   | 13,874         |
| 600   | 14,486         |
| 650   | 14,969         |

Зависимость теплопроводности СНУП-топлива от температуры его нагрева:

$$\lambda = 0,0107 \cdot (t - 273) + 8,0395 \text{ Вт/(м} \cdot \text{K)},$$

где  $t$  – температура топлива, K.

Таблица Б.4 - Распределение коэффициентов неравномерности энерговыведения по высоте активной зоны реактора БРЕСТ-ОД-300

| Z, мм   |        | Z, мм  |        |
|---------|--------|--------|--------|
| -550,00 | 0,5668 | 36,67  | 1,1972 |
| -513,30 | 0,6403 | 73,33  | 1,1878 |
| -476,70 | 0,7116 | 110,00 | 1,1724 |
| -440,00 | 0,7793 | 146,70 | 1,1510 |
| -403,30 | 0,8430 | 183,30 | 1,1123 |
| -366,70 | 0,9025 | 220,00 | 1,0898 |
| -330,00 | 0,9568 | 256,70 | 1,0509 |
| -293,30 | 1,0067 | 293,30 | 1,0067 |
| -256,70 | 1,0509 | 330,00 | 0,9568 |
| -220,00 | 1,0898 | 366,70 | 0,9025 |
| -183,30 | 1,1123 | 403,30 | 0,8430 |
| -146,70 | 1,1510 | 440,00 | 0,7793 |
| -110,00 | 1,1724 | 476,70 | 0,7116 |
| -73,33  | 1,1878 | 513,30 | 0,6403 |
| -36,67  | 1,1972 | 550,00 | 0,5668 |
| 0,00    | 1,2000 | -      | -      |

Таблица Б.5 - Тепловой расчет реактора БРЕСТ-ОД-300 с чехловой шестигранной ТВС

| Характеристика                       | Формула или исходное значение                                                                                                   |
|--------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Объем активной зоны, м <sup>3</sup>  | $V_{аз} = Q_{тепл}/q_v$                                                                                                         |
| Диаметр активной зоны, м             | $D_{аз} = \sqrt{\frac{4 \cdot V_{аз}}{\pi \cdot H_{аз}}}$                                                                       |
| Число ТВС, шт.                       | $N_{ТВС} = S_{аз}/S_{яч}$                                                                                                       |
| Площадь одной ячейки, м <sup>2</sup> | $S_{яч} = 6 \sqrt{\frac{1}{3} \left( \frac{h_{кл} + \delta_{ТВС}}{2} \right)^2} = \frac{\sqrt{3}}{2} (h_{кл} + \delta_{ТВС})^2$ |

Продолжение таблицы Б.5

| Характеристика                                                     | Формула или исходное значение                                                                                                                                                          |
|--------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Площадь сечения активной зоны, м <sup>2</sup>                      | $s_{аз} = \frac{\pi \cdot D_{аз}^2}{4}$                                                                                                                                                |
| Прходное сечение, занятое теплоносителем в ТВС, м <sup>2</sup>     | $s_{тн} = \frac{\sqrt{3}}{2} (h_{кл} - 2\delta_{твс})^2 - \frac{\pi}{4} (d_{твэл}^2 n_{твэл})$                                                                                         |
| Гидравлический периметр ТВС, м                                     | $\Pi_r = 6 \sqrt{\frac{1}{3} (h_{кл} - 2\delta_{твс}) + \pi (d_{твэл} n_{твэл})}$<br>$d_{твэл}$ – наружный диаметр твэла, м;<br>$n_{твэл}$ – количество твэлов в ТВС, м;               |
| Тепловой(гидравлический) диаметр ТВС, м                            | $d_r = 4s_{тн}/\Pi_r$                                                                                                                                                                  |
| Высота активной зоны с учетом экстраполированной добавки, м        | $H_{эф} = H_{аз} + 2 \cdot \delta_{т.з}$                                                                                                                                               |
| Экстраполированная добавка при наличии железородного отражателя, м | $\delta_{т.з} = 0,2$                                                                                                                                                                   |
| Тепловой периметр одного твэла, м                                  | $\Pi_{твэл} = \pi d_{твэл}$                                                                                                                                                            |
| Полная поверхность пучка твэлов в одной ТВС, м <sup>2</sup>        | $F = \pi d_{твэл} N_{твэл} H_{аз}$                                                                                                                                                     |
| Толщина оболочки твэлов, м                                         | $\delta_{об} = (d_{твэл} - d_{внутр.об})/2$<br>$d_{твэл}$ – наружный диаметр оболочки твэла, м;<br>$d_{внутр.об}$ – внутренний диаметр оболочки твэла, м.                              |
| Наружный диаметр твэла, м                                          | $d_{твэл} = d_{топ} + 2\delta_з + 2\delta_{об}$<br>$d_{топ}$ - диаметр топливной таблетки, м;<br>$\delta_з$ - толщина газового зазора, м;<br>$\delta_{об}$ – толщина оболочки твэла, м |
| Расход теплоносителя через активную зону, кг/с                     | $G_{аз} = Q_{тепл} k_R / (i_{вых} - i_{вх})$                                                                                                                                           |
| Энтальпия теплоносителя на выходе из активной зоны, Дж/кг          | $i_{вых} = i(p_{вых}, t_{вых})$                                                                                                                                                        |
| Энтальпия теплоносителя на входе в активную зону, Дж/кг            | $i_{вх} = i(p_{вх}, t_{вх})$                                                                                                                                                           |
| Температура теплоносителя на выходе из активной зоны, °С           | $t_{вых} = t_{вх} + \Delta t_{тн}$<br>$\Delta t$ – нагрев теплоносителя в активной зоне реактора, °С                                                                                   |
| Коэффициент неравномерности по радиусу                             | $k_R$ - выбирается из таблицы 4.1 либо рассчитывается по формулам п. 4                                                                                                                 |
| Расход теплоносителя через ТВС, кг/с                               | $G_{твс} = \frac{G_{аз}}{N_{твс}}$                                                                                                                                                     |
| Средняя скорость теплоносителя в ТВС, м/с                          | $w = G_{твс} v / s_{тн}$<br>$v$ - удельный объем теплоносителя, определяемый при давлении и средней температуре теплоносителя, м <sup>3</sup> /кг                                      |

Продолжение таблицы Б.5

| Характеристика                                                                                                   | Формула или исходная величина                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Температура теплоносителя по высоте канала для ТВС средней нагрузки, °C                                          | $t_{\tau}(z) = t_{\text{вх}} + \frac{Q_{\text{тепл}}}{G_{\text{аз}} c_p(z)} \times \left(1 + \frac{\sin \frac{\pi z}{H_{\text{эф}}}}{\sin \frac{\pi H_{\text{аз}}}{2H_{\text{эф}}}}\right).$ <p><math>C_p</math>- удельная изобарная теплоемкость, определяемая по давлению и средней температуре теплоносителя, Дж/(кг·K)</p>                                                                  |
| Координаты расчета                                                                                               | <p>Z: -Наз/2; -Наз/3; -Наз/6; -Наз/8; 0;<br/>Наз/8; Наз/6; Наз/3; Наз/2;</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Температура теплоносителя по высоте канала для ТВС максимальной нагрузки, °C                                     | $t_{\tau, \text{max}}(z) = t_{\text{вх}} + \frac{(t_{\text{вых}} - t_{\text{вх}})k_R}{2} \times \left(1 + \frac{\sin \frac{\pi z}{H_{\text{эф}}}}{\sin \frac{\pi H_{\text{аз}}}{2H_{\text{эф}}}}\right).$ <p><math>t_{\text{вых}}</math> - температура теплоносителя на выходе из активной зоны °C,<br/><math>t_{\text{вх}}</math> - температура теплоносителя на входе в активную зону °C.</p> |
| Линейная тепловая нагрузка с учетом косинусоидального распределения тепловыделений по высоте активной зоны, Вт/м | $q_l(z) = \frac{Q_{\text{тепл}}k_H}{(N_{\text{ТВС}} \cdot n_{\text{ТВЭЛ}} \cdot H_{\text{аз}})} \cos\left(\frac{\pi z}{H_{\text{эф}}}\right)$                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Линейный тепловой поток в центральной ТВС средней нагрузки, Вт/м                                                 | $q_{l,0} = \frac{Q_{\text{тепл}}k_H}{(N_{\text{ТВС}} \cdot n_{\text{ТВЭЛ}} \cdot H_{\text{аз}})}$                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Коэффициент неравномерности по высоте активной зоны                                                              | $k_H = \frac{\pi H_{\text{аз}}}{2H_{\text{эф}} \sin\left(\frac{\pi H_{\text{аз}}}{2H_{\text{эф}}}\right)}$                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Коэффициент неравномерности тепловыделений по высоте активной зоны                                               | $K_H = 1.2$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Линейный тепловой поток в центральной ТВС максимальной нагрузки, Вт/м                                            | $q_{l,0} = Q_{\text{тепл}}k_V / N_{\text{ТВС}}H_{\text{аз}}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Средние тепловыделения с поверхности твэла, Вт/м <sup>2</sup>                                                    | $q = q_l / \pi \cdot d_{\text{ТВЭЛ}}^{\text{нар}}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Объемный коэффициент неравномерности тепловыделений                                                              | $k_V = k_R \cdot k_H$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Для реактора БРЕСТ-ОД-300 коэффициент неравномерности тепловыделений по объёму активной зоны                     | $k_V = \frac{q_l^{\text{max}}}{\bar{q}_l} = \frac{420}{129.32} = 3.25$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Для реактора БРЕСТ-ОД-300 коэффициент неравномерности тепловыделений по радиусу активной зоны                    | $k_R = \frac{k_V}{k_H} = \frac{3.25}{1.29} = 2.71$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |

Продолжение таблицы Б.5

| Характеристика                                                                                                         | Формула или исходное значение                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Температура наружной поверхности оболочки твэла по высоте (для ТВС средней и максимальной нагрузки), °С                | $t_{ог}^H(z) = t_T(z) + \frac{q_l(z)}{\pi d_{ТВЭЛ} \alpha(z)}$                                                                                                                                                                                                                                           |
| Коэффициент теплоотдачи по высоте ТВС, Вт/(м²·К)                                                                       | $\alpha(z) = \frac{\lambda(z)}{d_T} Nu$                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Число Нуссельта<br><br>число Пекле                                                                                     | $Nu = 7,55(S/d) - 14(S/d)^{-5} + 0,007 Re^{0,64+0,246(S/d)},$<br>$s/d = s/d_{нар.ТВЭЛ} = 13,4/9,7 = 1,38$ - относительный шаг решетки твэлов;<br>Число Пекле $Pe(z) = Re \cdot Pr = (w \cdot d_{нар.ТВЭЛ})/a$ , где<br>а - коэффициент температуропроводности, м²/с;<br>w - скорость теплоносителя, м/с. |
| Число Рейнольдса                                                                                                       | $Re(z) = 4 G_{мс} / (\mu(z) \cdot \Pi_z)$<br>$\mu(z)$ - динамическая вязкость, определяемая по давлению и температуре теплоносителя в сечении, Па·с                                                                                                                                                      |
| Число Прандтля                                                                                                         | $Pr = (\mu(z) \cdot C_p(z)) / \lambda(z)$<br>Все теплофизические характеристики теплоносителя: динамическая вязкость $\mu(z)$ , Па·с; удельная изобарная теплоемкость $C_p$ , Дж/(кг·°С); теплопроводность $\lambda$ , Вт/м·°С определяются по давлению и температуре теплоносителя в сечении.           |
| Скорость теплоносителя в сечении по высоте ТВС, м/с                                                                    | $w(z) = G_{мс} v(z) / s_{мж}$<br>$v(z)$ - удельный объем теплоносителя, определяемый при давлении и температуре теплоносителя в сечении по высоте ТВС, м³/кг                                                                                                                                             |
| Скорость движения свинца в ядерном реакторе, м/с                                                                       | $w = 1,8 \text{ м/с}$                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Теплопроводность свинца, Вт/м·К                                                                                        | $\lambda = 15,8 + 108 \cdot 10^{-4} (T - 604,4), \text{ Вт/м·К};$<br>Т-температура свинца, К                                                                                                                                                                                                             |
| Температуропроводность свинца, м²/с                                                                                    | $a = (0,0083 \cdot T + 5,0221) \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$                                                                                                                                                                                                                                       |
| Температура оболочки твэла на внутренней поверхности (для ТВС средней и максимальной нагрузки), °С                     | $t_{ог}^{BH}(z) = t_{TH}(z) + q_l \left( \frac{1}{\pi d_{ТВЭЛ} \alpha(z)} + \frac{\delta_{об}}{2\pi \lambda_{об}} \right)$<br>$\delta_{об}$ - толщина оболочки твэла, м;<br>$\lambda_{об}$ - теплопроводность материала оболочки, Вт/м·К                                                                 |
| Теплопроводность оболочки твэла из ферритно-мартенситной стали ЭП823-Ш для твэлов охлаждаемых свинцовым теплоносителем | $\lambda = 3 \cdot 10^{-6} \cdot (T - 273)^2 + 0,0047 \cdot (T - 273) + 22,271, \text{ Вт/м·К};$<br>Т-температура стали, К                                                                                                                                                                               |
| Температура наружной поверхности топливного сердечника (для ТВС средней и максимальной нагрузки), °С                   | $t_{тон}^H(z) = t_{ог}^{BH}(z) + \frac{q_l(z) \delta_3}{2\pi \lambda_3(z)}$<br>$\delta_3$ - толщина газового зазора, заполненного гелием, м<br>$\lambda_3$ - теплопроводность гелия, Вт/м·К                                                                                                              |

Продолжение таблицы Б.5

| Характеристика                                                                                                                                                                        | Формула или исходное значение                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Теплопроводность контактного слоя (газового зазора), заполненного гелием, Вт/(м <sup>2</sup> ·К)                                                                                      | $\lambda = [-8 \cdot 10^{-5} \cdot T + 0,396 \cdot T + 42,683] \cdot 10^{-3}, \text{ Вт/м} \cdot \text{К};$ $T = t_{\text{ос}}^{\text{н}} + 273,15 \text{ - температура наружной оболочки твэла, К}$                                                                                                                                                                                                                   |
| Температура на внутренней поверхности топливной таблетки с центральным отверстием (для ТВС средней и максимальной нагрузки), °С                                                       | $t_{\text{тон}}^{\text{н}}(z) = t_{\text{тон}}^{\text{н}}(z) + \frac{q_l(z)}{4\pi\lambda_{\text{тон}}(z)} \cdot \left[ 1 - \frac{2d_0^2}{d_{\text{тон}}^2 - d_0^2} \ln \frac{d_{\text{тон}}}{d_0} \right]$ $d_0 \text{ - диаметр отверстия в топливной таблетке, м;}$ $d_{\text{тон}} \text{ - диаметр топливной таблетки, м;}$ $\lambda_{\text{тон}} \text{ - теплопроводность ядерного топлива Вт/м} \cdot \text{К}$ |
| Теплопроводность монокристаллического оксидного урана и монокристаллического плутония (СНУП-топливо), (U,Pu) <sub>2</sub> N <sub>3</sub> в зависимости от температуры топлива, Вт/м·К | $\lambda_{\text{тон}} (\text{UN-13\%PuN}) = 0,0107 \cdot (T - 273) + 8,0395,$ $T \text{ - температура топлива, К}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Теплопроводность топлива из диоксида урана UO <sub>2</sub> , Вт/(м·К), в зависимости от температуры топлива, Вт/м·К                                                                   | $\lambda_{\text{тон}} = \gamma_0 \frac{4 \cdot 10^3}{130 + T} + 3,4 \cdot 10^{-14} T^4$ $T \text{ - температура топлива, К}$                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Тепловой поток на единицу поверхности твэла по высоте ТВС при максимальной нагрузке, Вт/м <sup>2</sup>                                                                                | $q_{\text{max}}(z) = q_l(z) k_v / (\pi d_{\text{твэл}})$ $d_{\text{твэл}} \text{ - наружный диаметр твэла, м}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Тепловой поток на единицу поверхности твэла по высоте ТВС средней нагрузки, Вт/м <sup>2</sup>                                                                                         | $q(z) = q_l(z) / \pi d_{\text{твэл}}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Объемные тепловыделения, Вт/м <sup>3</sup>                                                                                                                                            | $q_v = (4q_{\text{max}}) / d_{\text{твэл}}$ $d_{\text{твэл}} \text{ - наружный диаметр твэла, м}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Линейный тепловой поток, Вт/м                                                                                                                                                         | $q_l = \frac{\pi}{4} \cdot d_{\text{твэл}}^2 \cdot q_v$ $d_{\text{твэл}} \text{ - наружный диаметр твэла, м}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |

## Приложение В

### Тепловой расчет реактора РБМК-1000

Таблица В.1 – Характеристики реактора РБМК-1000 и ТВС

| Характеристика                                                                                                           | РБМК-1000      | РБМК-1500      |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|----------------|
| Тепловая мощность реактора, МВт                                                                                          | 3200           | 4800           |
| Электрическая мощность блока, МВт                                                                                        | 1000           | 1500           |
| КПД блока, %                                                                                                             | 31,3           | 31,3           |
| Температура теплоносителя на входе в активную зону $t_{вх}$ , °C                                                         | 270            | 270            |
| Температура теплоносителя на выходе из активной зоны $t_{кв5}$ , °C                                                      | 284            | 284            |
| Диаметр трубы наружный/внутренний, м                                                                                     | 0,088/0,08     | 0,088/0,08     |
| Сторона графитового блока а, м                                                                                           | 0,25           | 0,25           |
| Давление теплоносителя на входе $p_{вх}$ , Па                                                                            | $8 \cdot 10^6$ | $8 \cdot 10^6$ |
| Среднее паросодержание на выходе из реактора $x$                                                                         | 0,145          | 0,3            |
| Давление пара перед турбиной, атм                                                                                        | 65             | 65             |
| Температура пара перед турбиной, °C                                                                                      | 280            | 280            |
| Размеры активной зоны, мм:                                                                                               |                |                |
| - высота активной зоны 3432х2м                                                                                           | 6864           | 6864           |
| - диаметр активной зоны                                                                                                  | 11800          | 11800          |
| Загрузка урана, т                                                                                                        | 192            | 189            |
| Обогащение, % 235U                                                                                                       | 2,6-3,0        | 2,6-2,8        |
| Число технологических каналов с ТВС:                                                                                     | 1693-1661[3]   | 1661           |
| Длина твэла, мм                                                                                                          | 3640           | 3640           |
| Количество твэлов в 1 ТВС, шт                                                                                            | 18х2пучка      | 18х2пучка      |
| Среднее выгорание ядерного топлива, МВт·сут/кг:                                                                          | 22,5           | 25,4           |
| Размеры оболочки твэла (диаметр×толщина), мм:                                                                            | 13,63×0,9      | 13,63×0,9      |
| Диаметр топливной таблетки/отверстия в ней, мм                                                                           | 11,48/1,9      | 11,48/1,9      |
| Материал оболочек твэлов:                                                                                                | Zr + 2,5 % Nb  | Zr + 2,5 % Nb  |
| Вид топлива: обогащение по $^{235}\text{U}$ до 2,6–3,0 % с добавкой 0,41% или 0,6 % оксида эрбия $\text{Er}_2\text{O}_3$ |                |                |

### Тепловыделяющая сборка реактора РБМК-1000

Тепловыделяющая сборка РБМК-1000 включает в себя два пучка твэлов, расположенных друг над другом на несущей центральной трубе. Каждый пучок состоит из 18 твэлов, установленных в каркас, и концевой решётки. Каркас образован десятью дистанционирующими решётками из сплава Zr–1% Nb, одной

ДР из коррозионно-стойкой стали и опорной решёткой, закреплённой на каркасной трубе. Крепление дистанционирующих решёток осуществляется путём вдавливания стенок направляющих втулок ДР в пазы на каркасной трубе. Опорные и концевые решётки закреплены путём развальцовки стенок каркасной трубы. Наконечники твэлов зафиксированы в опорной решетке с помощью обжимных колец. Для создания необходимого зазора используются втулки, размещённые между пучками твэлов. Сверху и снизу пучков твэлов каркасной трубе расположены два хвостовика ТВС. Пучки твэлов, втулки и хвостовики на несущей трубе стянуты гайкой, закреплённой стопорным штифтом. В твэлы ТВС загружается топливо из диоксида урана, обогащённого по  $^{235}\text{U}$  до 2,6–3,0 % с добавкой 0,41 или 0,6 % оксида эрбия  $\text{Er}_2\text{O}_3$  в виде таблеток с центральным отверстием, с фасками и лунками на торцах. Оболочки и концевые детали (заглушка, наконечник) твэлов изготовлены из сплава  $\text{Zr-1\% Nb}$ . В твэле предусмотрен компенсационный объём (газосборник) со стороны заглушки. В компенсационном объёме установлен фиксатор топливного столба в виде спиральной пружины из сплава ЭК173ИД. Свободный объём твэлов заполнен гелием с избыточным давлением 0,5–0,7 МПа.

В верхнем пучке твэлов расположены решетки, которые по своему конструктивному исполнению выполняют две функции – дистанционирование твэлов и создание дополнительной интенсификации теплообмена.

Активная зона состоит из квадратных графитовых блоков (колонн) со стороной  $a = 0,25$  м, определяющей шаг решетки технологических каналов, размещённых в центральных отверстиях графитовых блоков. Внутри графитового блока находится труба (технологический канал) с наружным диаметром  $d_{\text{тр}}^{\text{н}} = 0,088$  м, внутренним  $d_{\text{тр}}^{\text{вн}} = 0,08$  м.

В технологическом канале (в трубе) на подвеске висит ТВС, состоящая из двух пучков твэлов стержневой конструкции, расположенных последовательно один над другим. Высота топливных таблеток в каждом из твэлов составляет 3,432 м, а суммарная высота активной зоны с учетом двух пучков твэлов равна  $H_0 = 6864$  мм.

Пучок стержней состоит из  $n = 18$  стержневых твэлов, равномерно расположенных на двух концентрических радиусах (соответственно на каждом 6 и 12 стержневых твэлов), и одной центральной каркасной трубки. Наружный диаметр оболочки твэла  $d_2 = 13,63 \cdot 10^{-3}$  м, внутренний  $d_1 = 11,7 \cdot 10^{-3}$  м. Диаметр топливного сердечника  $d_0 = 11,5 \cdot 10^{-3}$  м. Диаметр центральной каркасной трубки ТВС  $d = 15 \cdot 10^{-3}$  м.

Технологический канал и оболочки твэлов выполнены из циркониевого сплава. В качестве топлива используется двуокись урана.

Реактор РБМК-1000 – канальный, кипящий, с многократной принудительной циркуляцией воды. Из напорных коллекторов вода, недогретая до температуры насыщения ( $t_{\text{вх}} = 270$  °С;  $p_{\text{вх}} = 8 \cdot 10^6$  Па), по индивидуальным коммуникациям раздается по параллельным рабочим каналам. На некотором участке она догревается до температуры насыщения, затем частично испаряется, и пароводяная смесь со средним массовым содержанием  $x = 0,145$  направляется в бара-

баны-сепараторы, где происходит разделение пара и воды. Насыщенный пар направляется для работы в турбину, а отсепарированная вода возвращается в контур циркуляции и, смешиваясь с питательной водой, раздается по параллельным технологическим каналам.

На пути следования теплоносителя вдоль твэлов в зависимости от изменения энерговыделения изменяется структура потока и режим течения теплоносителя, в связи с этим высота активной зоны разбивается на участки расчета температурного поля твэла с конвективным теплообменом, участок с поверхностным пузырьковым кипением, участок с объемным кипением.

Расчет ведется численным методом путем разбиения канала по высоте на участки (по числу дистанционирующих решеток, начиная от входного сечения) и с учетом условий теплоотвода.

Таблица В.2 -Тепловой расчет реактора РБМК-1000

| Параметр                                                                                             | Формула или исходное значение                                                                                                       |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Объем активной зоны, м <sup>3</sup>                                                                  | $V = Q_{\text{тепл}}/q_V$                                                                                                           |
| Диаметр активной зоны, м                                                                             | $D_0 = \sqrt{V/0,7854H_0}$                                                                                                          |
| Площадь одной ячейки, м <sup>2</sup>                                                                 | $f_{\text{яч}} = a^2$                                                                                                               |
| Число ячеек, шт.                                                                                     | $N = 0,7854D_0^2/f_{\text{яч}}$                                                                                                     |
| Проходное сечение ТВС, м <sup>2</sup>                                                                | $s_{\text{ТВС}} = 0,7854[(d_{\text{тр}}^{\text{вн}})^2 - nd_2^2 - d^2]$                                                             |
| Гидравлический периметр ТВС, м                                                                       | $\Pi_{\text{г}} = \pi(d_{\text{тр}}^{\text{вн}} + nd_2 + d)$                                                                        |
| Тепловой периметр ТВС, м                                                                             | $\Pi_{\text{тепл}} = \pi d_2 n$                                                                                                     |
| Гидравлический диаметр, м                                                                            | $d_{\text{г}} = 4s_{\text{ТВС}}/\Pi_{\text{г}}$                                                                                     |
| Расход теплоносителя через один канал, кг/с                                                          | $G = \frac{Q_{\text{тепл}}}{(i'_{\text{вх}} - i_{\text{вх}} + x r_{\text{вх}}) N_{\text{ТВС}}}$                                     |
| Расход теплоносителя через один канал с максимальной нагрузкой, кг/с                                 | $G = \frac{Q_{\text{тепл}} k_r}{(i'_{\text{вх}} - i_{\text{вх}} + x r_{\text{вх}}) N_{\text{ТВС}}}$                                 |
| Коэффициент неравномерности по радиусу активной зоны                                                 | $k_r = 1,1$                                                                                                                         |
| Скорость циркуляции потока, м/с                                                                      | $w_0 = G/s_{\text{ТВС}} p'_{\text{вх}}$                                                                                             |
| Перепад давления в канале в предположении, что в нем течет только вода при температуре насыщения, Па | $\Delta p = \xi'_{\text{пр}} \frac{w_0^2}{2} p'_{\text{вх}} + g p'_{\text{вх}} H_0$                                                 |
| Приведенный коэффициент сопротивления                                                                | $\xi'_{\text{пр}} = \sum_i \xi_M + \xi_{\text{тр}} \frac{H_0}{d_{\text{г}}}$<br>$\sum_i \xi_M = 9,5 \xi_{\text{тр}} = 0,0035$       |
| Линейный тепловой поток в центральной плоскости ТВС, Вт/м                                            | $q_{\text{л.о}} = \frac{Q_{\text{тепл}} k_2}{H_0 N}$<br>$q_{\text{л.о}} = \frac{Q_{\text{тепл}} k_V}{H_0 N}$<br>$k_V = 2 k_2 = 1,4$ |

Продолжение таблицы В.2

| Характеристика                                                                                   | Формула или исходное значение                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Высота участка, на котором происходит подогрев теплоносителя до температуры насыщения, м         | $z_n = \frac{(i'_{\text{вх}} - i_{\text{вх}})}{\left(\frac{di'}{dp} \frac{\Delta p'}{H_0} + \frac{\bar{q}_l}{G}\right)}$ $\frac{di'}{dp} = 0,0048$                                                                                                                                                        |
| Среднее значение линейного теплового потока на участке подогрева, Вт/м                           | $\bar{q}_l = \frac{q_{l,0} H}{z_n \pi} \left( \cos \frac{\pi \delta}{H} - \cos \frac{\pi(z_n + \delta)}{H} \right)$ <p><math>\delta = 0,8</math> м - экстраполированная добавка, м<br/> <math>H = H_0 + 2\delta</math> - экстраполированная высота, м<br/> <math>H_0</math> - высота активной зоны, м</p> |
| Энтальпия теплоносителя по высоте канала, Дж/кг, где $z$ изменяется от 0 до $H_0$ через 0,35 м   | $i_T(z) = i_{\text{вх}} + \frac{q_{l,0} H}{G \pi} \left( \cos \frac{\delta \pi}{H} - \cos \frac{\pi(z + \delta)}{H} \right)$                                                                                                                                                                              |
| Массовое паросодержание (относительная энтальпия) по высоте канала                               | $x(z) = \frac{i_T(z) - i'(z)}{i''(z) - i'(z)}$                                                                                                                                                                                                                                                            |
| Линейный тепловой поток по высоте канала, Вт/м                                                   | $q_l(z) = q_{l,0} \sin \frac{\pi(z + \delta)}{H}$                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Тепловая нагрузка по высоте канала, Вт/м <sup>2</sup>                                            | $q(z) = 0,94 q_l(z) / \Pi_{\text{тепл}}$                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Относительная энтальпия в точке начала закипания                                                 | $x_{\text{нк}} = -0,49 \left( \frac{q(z)}{p^{\pi_{\text{вср}}}} \right)^{0,3} Re_q^{0,4} \left( \frac{p}{p_{\text{кр}}} \right)^{0,15}$                                                                                                                                                                   |
| Число Рейнольдса                                                                                 | $Re_q = \frac{\left( \frac{q}{p^{\pi_r}} \right) \sqrt{\sigma / (g(p' - p''))}}{v'}$                                                                                                                                                                                                                      |
| Критическое давление, Па                                                                         | $p_{\text{кр}} = 2,2115 \cdot 10^7$                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Координата точки начала кипения $z_{\text{н.к}}$ , м                                             | $z_{\text{нк}} = z_i + \frac{x_i - x_{\text{нк}}}{x_i - x_{i-1}} \Delta z$                                                                                                                                                                                                                                |
| Истинное объемное паросодержание в точке с координатой $z_n$                                     | $\varphi_n = 0,43 \left( \frac{q(z)}{p^{\pi_{\text{вср}}}} \right)^{0,15} Re_q^{0,2} \left( \frac{p}{p_{\text{кр}}} \right)^{-0,255}$                                                                                                                                                                     |
| Истинное объемное паросодержание на участке от $z_{\text{н.к}}$ до $z_n$                         | $\varphi(z) = \varphi_n \left( 1 - \frac{x(z)}{x_{\text{нк}}} \right)$                                                                                                                                                                                                                                    |
| Объемное расходное паросодержание в области $x > 0$ , при котором начинается равновесное кипение | $\beta_p = 3,22 \left( \frac{q}{p^{\pi_{\text{вср}}}} \right)^{0,2}$                                                                                                                                                                                                                                      |
| Массовое паросодержание в точке начала равновесного кипения                                      | $x_p = \frac{1}{1 + \frac{1 - \beta_p}{\beta_p} \frac{p'}{p''}}$                                                                                                                                                                                                                                          |

Продолжение таблицы В.2

| Характеристика                                                                 | Формула или исходное значение                                                                                                                                                                                                      |
|--------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Координата точки начала равновесного кипения $z_p$ , м                         | $z_p = z_i + \frac{x_p - x_i}{x_{i+1} - x_i} \Delta z$                                                                                                                                                                             |
| Коэффициент проскальзывания в точке $z_p$                                      | $s_p = 1 + \frac{0,6 + 1,5\beta_p^4}{Fr^{0,25}} \left(1 - \frac{p}{p_{np}}\right)$                                                                                                                                                 |
| Число Фруда                                                                    | $Fr = w_{cm}^2 / g d_T$                                                                                                                                                                                                            |
| Скорость смеси, м/с                                                            | $w_{cm} = w''_0 - w'_0$                                                                                                                                                                                                            |
| Приведенная скорость пара, м/с                                                 | $w''_0 = \frac{\beta w_0}{1 - \beta \left(1 - \frac{p''}{p'}\right)}$                                                                                                                                                              |
| Приведенная скорость воды, м/с                                                 | $w'_0 = w''_0 (1 - \beta) / \beta$                                                                                                                                                                                                 |
| Расходное объемное паросодержание $\beta$ на участке $z > z_p$                 | $\beta(z) = \left(1 + \frac{(1 - x(z))p''}{x(z)p'}\right)^{-1}$                                                                                                                                                                    |
| Истинное объемное паросодержание на участке $z \geq z_p$                       | $\varphi(z) = \left(1 + \frac{1 - x(z)}{x(z)} s \frac{p''}{p'}\right)^{-1}$                                                                                                                                                        |
| Массовое паросодержание в точке $z_n$                                          | $x_n = \frac{1}{1 + \frac{1 - \varphi_n p'}{\varphi_n p''}}$                                                                                                                                                                       |
| Определение потери давления по высоте испарительного канала                    | $\Delta p = \Delta p_k + \Delta p_{пк} + \Delta p_{рк}$                                                                                                                                                                            |
| Потеря давления на конвективном участке (от $z = 0$ до $z_{н,к}$ ), Па         | $\Delta p_k = \sum_i \left( \xi_{трк_i} \frac{\Delta z_{к_i}}{d_T} + \xi_{н,к_i} \right) \times \frac{w_0^2}{2} p_{к_i} + \sum_i g p_{к_i}$                                                                                        |
| Потеря давления на участке поверхностного кипения (от $z_{н,к}$ до $z_p$ ), Па | $\Delta p_{пк} = \sum_i \Delta p_{тр пк_i} + \sum_i \Delta p_{м пк_i} + \sum_i \Delta p_{уск пк_i} + \sum_i \Delta p_{нив пк_i}$                                                                                                   |
| Потеря на трение в пределах каждого участка, Па                                | $\Delta p_{тр пк_i} = \Delta p_{тр пк_i}^{6,0} [1 + 1,85 \left( \frac{q_i}{r p'' w_0} \right)^{0,7}]$ $\Delta p_{тр пк_i} = \xi_{тр} \frac{\Delta z_i}{d_T} \times [1 + x_i \left( \frac{p'}{p''} - 1 \right)] \frac{w_0^2}{2} p'$ |
| Потеря на местное сопротивление, Па                                            | $\Delta p_{м пк_i} = \xi_{м_i} [1 + x_i \left( \frac{p'}{p''} - 1 \right)] \frac{w_0^2}{2} p'$                                                                                                                                     |
| Потеря на ускорение, Па                                                        | $\Delta p_{уск пк_i} = \frac{w_0^2}{2} p' \frac{2 \Delta \varphi_i (1 - \frac{p''}{p'})}{1 - \Delta \varphi_i (1 - \frac{p''}{p'})}$                                                                                               |
| Нивелирная составляющая, Па                                                    | $\Delta p_{нив пк_i} = g p_{см i} \Delta z$ $p_{см i} = p'' \varphi_i + p' (1 - \varphi_i)$                                                                                                                                        |

Продолжение таблицы В.2

| Характеристика                                                                                   | Формула или исходное значение                                                                                                                                       |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Потеря давления на участке развитого кипения, Па                                                 | $\Delta p_{рк} = \sum_i \Delta p_{тр рк_i} + \sum_i \Delta p_{н рк_i} + \sum_i \Delta p_{уск рк_i} + \sum_i \Delta p_{нив рк_i}$                                    |
| Потеря на трения, Па                                                                             | $\Delta p_{тр рк_i} = \xi_{тр} \frac{\Delta z_i}{d_r} \times [1 + x_i \left( \frac{p'}{p''} - 1 \right)] \frac{w_0^2}{2} p'$                                        |
| Потеря на местное сопротивление, Па                                                              | $\Delta p_{н рк_i} = \xi_{н_i} \frac{\Delta z_i}{d_r} \times [1 + x_i \left( \frac{p'}{p''} - 1 \right)] \frac{w_0^2}{2} p'$                                        |
| Потеря на ускорение, Па                                                                          | $\Delta p_{уск рк_i} = \frac{w_0^2}{2} p' \frac{2\Delta\varphi_i(1 - \frac{p''}{p'})}{1 - \Delta\varphi_i(1 - \frac{p''}{p'})}$                                     |
| Нивелирная составляющая, Па                                                                      | $\Delta p_{нив рк_i} = g p_{см i} \Delta z$                                                                                                                         |
| Температура теплоносителя по высоте канала                                                       | Определяется по энтальпии и давлению в пределах каждого участка                                                                                                     |
| Температура оболочки твэла на участке теплообмена (от $z = 0$ до $z_{н.к}$ ), °С                 | $t_{об}(z) = t_r(z) + \frac{q(z)}{\alpha}$                                                                                                                          |
| Коэффициент теплообмена, Вт/(м <sup>2</sup> ·К)                                                  | $\alpha = 0,021 \frac{\lambda}{d_r} Re^{0,8} Pr^{0,43}$                                                                                                             |
| Число Рейнольдса                                                                                 | $Re = w d_r / \nu$                                                                                                                                                  |
| Число Нуссельта без кипения                                                                      | $Nu_{БК} = \alpha d_r / \lambda$                                                                                                                                    |
| Определение коэффициента теплоотдачи на участке поверхностного кипения (от $z_{н.к}$ до $z_p$ ), | $\frac{Nu_{кип}}{Nu_{БК}} = 6150 \left[ \frac{q}{r p'' w'} \left( \frac{p''}{p'} \right)^{1,45} \left( \frac{r}{c_p \theta_{\delta}} \right)^{0,223} \right]^{0,7}$ |
| Скорость воды, м/с                                                                               | $w' = \frac{w'_0}{1 - \varphi}$                                                                                                                                     |
| Приведенная скорость воды, м/с                                                                   | $w'_0 = w_{см}(1 - \beta)$                                                                                                                                          |
| Скорость смеси, м/с                                                                              | $w_{см} = w_0 [1 + x \left( \frac{p'}{p''} - 1 \right)]$                                                                                                            |
| Расходное объемное паросодержание                                                                | $\beta = [1 + \frac{1 - x}{x} \frac{p''}{p'}]^{-1}$                                                                                                                 |
| Коэффициент теплоотдачи в зоне поверхностного кипения, Вт/(м <sup>2</sup> ·К)                    | $\alpha_{пк} = \lambda_{пк} Nu_{кип} / d_r$                                                                                                                         |
| Температура оболочки твэла в зоне поверхностного кипения, °С                                     | $\theta_{об}(z) = \theta_r(z) + \frac{q(z)}{\alpha_{пк}}$                                                                                                           |

Продолжение таблицы В.2

| Характеристика                                                                                    | Формула или исходное значение                                                                                                                                                                                                                               |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Определение коэффициента теплоотдачи на участке развитого кипения (от $z_p$ до $z_{\text{вых}}$ ) | $St = 1,25M \left( \frac{p \sqrt{\frac{\sigma}{gp''}}}{\sigma} \right)^{1/3}$ $M = \frac{q}{rp'w_{\text{сн}}} \left( \frac{rp'a}{q \sqrt{\frac{\sigma}{gp''}}} \right)^{1/3} \left( \frac{r}{c_p \theta_{\delta}} \right)^{0,5}$ $a = \frac{\lambda}{p} Pr$ |
| Коэффициент теплоотдачи, Вт/(м <sup>2</sup> ·К)                                                   | $\alpha_{pк} = c_p p' w_{\text{сн}} St$                                                                                                                                                                                                                     |
| Температура оболочки по высоте канала в зоне развитого кипения, °С                                | $t_{o\delta}(z) = t_{\tau}(z) + \frac{q(z)}{\alpha_{pк}(z)}$                                                                                                                                                                                                |
| Критический тепловой поток, Вт/м <sup>2</sup>                                                     | $q_{xp} = 845 \cdot 10^3 (pw)^{0,2} (1 - 3,34 \cdot 10^{-8} p)(1 - x)^{1,2}$ $pw = G/s_{\text{ТБС}}$                                                                                                                                                        |
| Запас до кризиса теплообмена                                                                      | $k(z) = q_{xp}(z)/q(z)$                                                                                                                                                                                                                                     |
| Температура оболочки твэла на внутренней поверхности по высоте канала, °С                         | $t_{o\delta}^{\text{вн}}(z) = t_{o\delta}^{\text{н}}(z) + \frac{0,94q_l(z)\delta_{o\delta}}{\pi d_{o\delta} n \lambda_{o\delta}}$ $\delta_{o\delta} = (d_2 - d_1)/2$ $d_{o\delta} = (d_2 + d_1)/2$ $\lambda_{o\delta} = 20,6$                               |
| Температура топливного сердечника на наружной поверхности, °С                                     | $t_c^{\text{н}}(z) = t_{o\delta}^{\text{вн}}(z) + \frac{0,94q_l(z)}{\pi d_1 n \alpha_3}$ $d_3 = (d_1 + d_0)/2$ $\alpha_3 = f \left( \frac{\delta_3}{d_1} \right) = 4 \cdot 10^3$                                                                            |
| Температура топливного сердечника в i-м слое, °С                                                  | $\theta_{c,i}(z) = \theta_{c,i-1}(z) + \frac{0,94q_l(z)}{4\pi \lambda_{c,i} n}$ $\lambda_c(T) = \gamma_0 \frac{4 \cdot 10^3}{130 + T} + 3,4 \cdot 10^{-14} T^4$                                                                                             |
| Максимальная температура графита по высоте канала (максимальной и средней нагрузки), °С           | $t_{zp,0}(z) = t_{\tau}(z) + \Delta t_{\alpha}(z) + \Delta t_{\text{мр}}(z) + \Delta t_{zp}(z)$                                                                                                                                                             |
| Температурный перепад вследствие теплоотдачи от внутренней поверхности трубы к теплоносителю, °С  | $\Delta \theta_{\alpha}(z) = \frac{q_l^{\text{вн}}(z)}{\pi d_{\text{мр}}^{\text{вн}} \alpha}$ $q_l^{\text{вн}}(z) = 0,06 q_l(z)$                                                                                                                            |

Продолжение таблицы В.2

| Характеристика                                                                              | Формула или исходное значение                                                                                                                                                                                                                                                             |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Коэффициент теплоотдачи $\alpha$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К), в зоне конвективного теплообмена | $\alpha_k = 0,021 \frac{\lambda}{d_{mp}^{0,8}} Re^{0,8} Pr^{1,43}$ $Re = w d_{mp}^{0,8} / \nu$                                                                                                                                                                                            |
| Коэффициент теплоотдачи $\alpha$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К), в зоне поверхностного кипения    | $\frac{Nu_{kш}}{Nu_{\delta k}} = 6150 \left[ \frac{q_s^{zp}(z)}{rp w} \left( \frac{p}{p'} \right)^{1,45} \left( \frac{r}{c_p \theta_{\delta}} \right)^{0,333} \right]^{0,7}$ $q_s^{zp}(z) = \frac{q_i^{cp}(z)}{\pi d_{mp}^{0,8}}$ $Nu_{\delta k} = \frac{\alpha_k d_{mp}^{0,8}}{\lambda}$ |
| Коэффициент теплоотдачи $\alpha$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К), в зоне поверхностного кипения    | $\alpha_{нк} = \frac{\lambda_{нк}}{d_{mp}^{0,8}} Nu_{\delta k}$                                                                                                                                                                                                                           |
| Коэффициент теплоотдачи $\alpha$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К), в зоне развитого кипения         | $\alpha_{рк} = c_p p' w_{cm} St$ $St = 1,25 M \left( \frac{p}{\sqrt{g p}} \frac{\sqrt{\sigma}}{\sigma} \right)^{1/3}$ $M = \frac{q_s^{zp}}{rp w_{cm}} \left( \frac{rp' a}{q_s^{zp} \sqrt{\frac{\sigma}{g p}}} \right)^{1/3} \left( \frac{r}{c_p \theta_{\delta}} \right)^{0,5}$           |
| Температурный перепад по толщине стенки трубы, °С                                           | $\Delta \theta_{mp}(z) = \frac{q_i^{cp}(z) \delta_{mp}}{\pi d_{mp} \lambda_{mp}}$ $\delta_{mp} = (d_{mp}^n - d_{mp}^{en})/2$ $d_{mp} = (d_{mp}^n + d_{mp}^{en})/2$ $\lambda_{\sigma \delta} = 20,6$                                                                                       |
| Температурный перепад по толщине графитового блока, °С                                      | $\Delta \theta_{zp}(z) = \frac{q_i^{cp}(z)}{4 \pi n \lambda_{zp}} \times \left[ \frac{2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \ln \frac{r_2}{r_1} - 1 \right]$                                                                                                                                            |
| Внутренний радиус отверстия графитового блока, м                                            | $r_1 = 0,044$                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Эквивалентный наружный радиус графитового блока, м                                          | $r_2 = \sqrt{\frac{f_{\pi c}}{\pi}}$                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Теплопроводность графита, Вт/(м·К)                                                          | $\lambda_{zp} = 75$                                                                                                                                                                                                                                                                       |