

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина»
Физико-технологический институт
Кафедра технической физики

РАСЧЁТ ТЕПЛОВЫХ, ГИДРАВЛИЧЕСКИХ И
НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РЕАКТОРА РБМК-1000 ПРИ
ШТАТНОЙ РАБОТЕ ВСЕХ СИСТЕМ
КУРСОВОЙ ПРОЕКТ
ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Преподаватель

Студент группы ФтМ-221401

Александров О. Е.

Яковлев А. С.

Екатеринбург 2024

Список сокращений

АЗ – активная зона.

ТВС – тепловыделяющая сборка.

ТВЭЛ – тепловыделяющий элемент.

ГПК – границы поверхностного кипения.

ГОК – граница объемного кипения.

Введение

Цель: провести расчёт технологического канала РБМК-1000.

АЗ реактора представляет собой цилиндр, в котором находятся технологические каналы, находящиеся в графитовой кладке.

Расчёт проводим для самого загруженного канала – находящегося в центре АЗ, поскольку при соблюдении должных значений расчётных характеристик в этом канале будут выполняться условия для безопасной эксплуатации на других каналах. В роли теплоносителя используется вода, в роли замедлителя – графит.

В технологическом канале находится ТВС. Сборка представляет собой цилиндр из сплава циркония марки Э110. По центру находится несущая труба, выполненная из того же сплава. На двух окружностях относительно центра сборки находятся два пучка ТВЭЛ по 18 штук в каждом. Остальное свободное пространство внутри сборки занято теплоносителем. Вид ТВС представлен на рисунке 1.

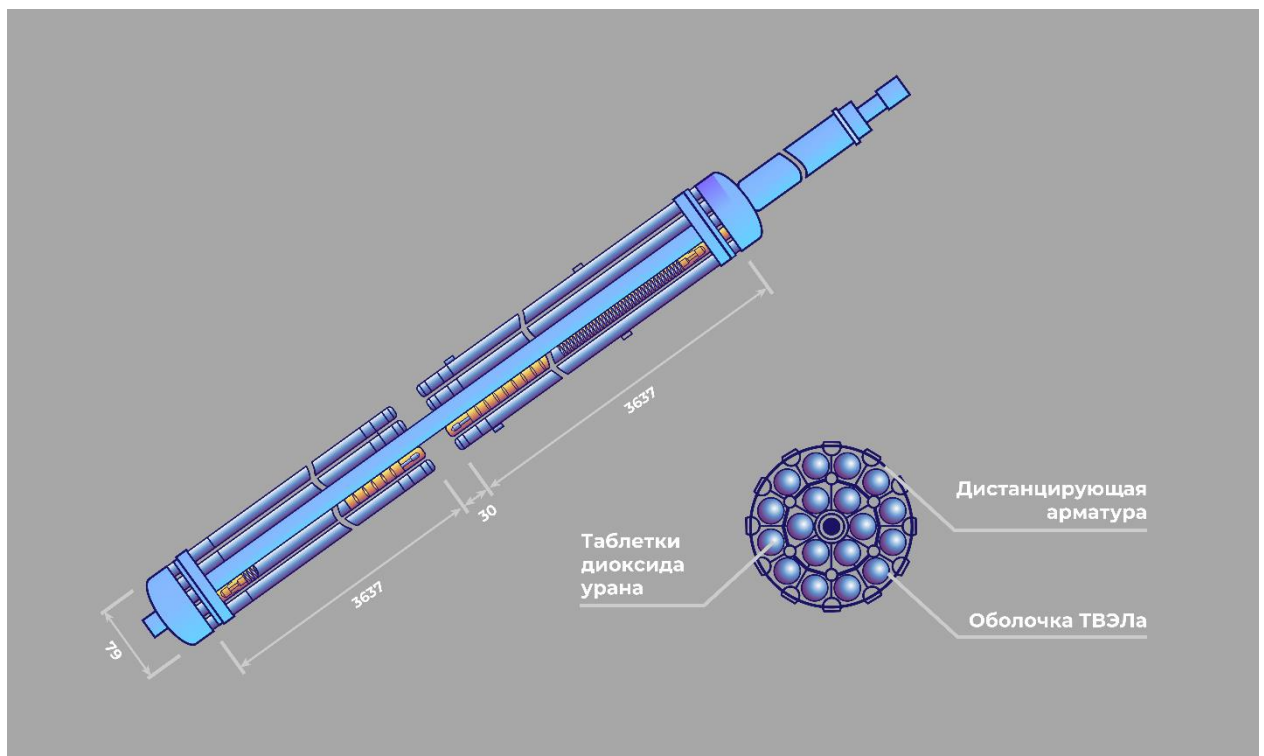


Рисунок 1 Схема ТВС

ТВЭЛ представляет собой цилиндрическую трубу из сплава циркония Э110. Внутри находятся таблетки диоксида урана. В контактном зазоре между таблетками и оболочкой ТВЭЛ находится газообразный гелий под давлением.

Теплоноситель – вода, замедлитель – графит. Параметры реактора приведены в таблице 1.

Таблица 1 Параметры реактора

Характеристика, ед. измерения	Обозначение	Значение физической величины
Тепловая мощность, МВт	Q_T	3200
Электрическая мощность, МВт	$Q_{\text{Э}}$	1000
Число ТВС в АЗ	$N_{\text{ТВС}}$	1693
Число ТВЭЛ в одной ТВС	$N_{\text{ТВЭЛ}}$	18
Радиус АЗ, м	$R_{\text{АЗ}}$	5,9
Высота АЗ, м	$H_{\text{АЗ}}$	7
Диаметр ТВЭЛ, м	$d_{\text{ТВЭЛ}}$	$13,5 \cdot 10^{-3}$
Радиус контактного зазора, м	$R_{\text{КЗ}}$	$6,2 \cdot 10^{-3}$
Радиус топливной таблетки, м	$R_{\text{ТТ}}$	$6 \cdot 10^{-3}$
Диаметр центрального канала, м	$d_{\text{центр}}$	$12 \cdot 10^{-3}$
Внутренний диаметр ТВС, м	$d_{\text{ТВС}}$	$80 \cdot 10^{-3}$
Толщина ТВС, м	$l_{\text{ТВС}}$	$4 \cdot 10^{-3}$
Шаг решетки, м	$l_{\text{шагТВЭЛ}}$	$25 \cdot 10^{-3}$
Шаг ТВС, м	$l_{\text{шагТВС}}$	$250 \cdot 10^{-3}$

Эффективная добавка к радиусу, м	$\delta_{Rэф}$	0,2
Эффективная добавка к высоте, м	$\delta_{Hэф}$	0,2
Средняя температура теплоносителя на входе, °К	$T_{вх}$	543
Средняя температура теплоносителя на выходе, °К	$T_{вых}$	557
Массовый расход теплоносителя через АЗ, кг/с	G_T	$9,861 \cdot 10^3$
Номинальная паропроизводительность, кг/с	$G_{Пном}$	$1,556 \cdot 10^{-3}$
Номинальное массовое паросодержание на выходе АЗ	$X_{вых.ном}$	0,145
Давление теплоносителя на входе, МПа	$p_{вх}$	7,8
Давление теплоносителя на выходе, МПа	$p_{вых}$	7,38

Характеристики материалов представлены в таблице 2.

Таблица 2 Характеристики материалов

Характеристика, ед. измерения	Обозначение	Значение физической величины
Плотность теплоносителя на входе в АЗ, кг/м ³	$\rho_{\text{ВХ}}$	779,676
Плотность теплоносителя на выходе из АЗ, кг/м ³	$\rho_{\text{ВЫХ}}$	733,684
Теплоёмкость теплоносителя на входе в АЗ, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{°К}}$	$C_{\text{ВХ}}$	4972,1
Теплоёмкость теплоносителя на выходе из АЗ, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{°К}}$	$C_{\text{ВЫХ}}$	5447,8
Теплопроводность теплоносителя при входе в АЗ, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{°К}}$	$\lambda_{\text{ВХ}}$	0,6081
Теплопроводность теплоносителя при выходе из АЗ, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{°К}}$	$\lambda_{\text{ВЫХ}}$	0,05224
Коэффициент динамической вязкости при входе в АЗ, Па · с	$\eta_{\text{ВХ}}$	$1,0314 \cdot 10^{-4}$
Коэффициент динамической вязкости при выходе из АЗ,	$\eta_{\text{ВЫХ}}$	$2,04 \cdot 10^{-5}$

Па · с		
Коэффициент теплопроводности сплава марки Э-110, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{К}}$	$\lambda_{\text{об}}$	22,7
Коэффициент теплопроводности гелия, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{К}}$	$\lambda_{\text{кз}}$	0,37
Коэффициент теплопроводности двуокиси урана, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{К}}$	$\lambda_{\text{т}}$	2,3

1 Тепловой расчёт

Смысл теплового расчёта сводится к определению максимальной температуры каждого элемента АЗ, чтобы затем сравнить их с предельными значениями, установленными заранее. Поскольку в РБМК-1000 используется кипящий канал, то в тепловом расчёте необходимо определить параметры пароводяной смеси. При этом основной

Для расчётов используем данные таблиц 1 и 2 без ссылок на них для лучшего восприятия отчёта. Результаты расчёта пронумерованы. При необходимости указываются ссылки на полученные результаты.

1.1 Расчёт геометрических размеров АЗ

Перед началом расчёта рассчитаем экстраполированные размеры АЗ согласно следующим формулам, которые учитывают ненулевой поток нейтронов за пределами АЗ:

$$\begin{aligned}
 H_{\text{эф}} &= H_{\text{АЗ}} + 2\delta_{H\text{эф}} = 7 + 2 \cdot 0,2 = 7,36 \text{ м}; \\
 R_{\text{эф}} &= R_{\text{АЗ}} + \delta_{R\text{эф}} = 5,9 + 0,2 = 6,1 \text{ м}.
 \end{aligned}
 \tag{1.1}$$

Объем вычисляется тривиально:

$$V_{\text{АЗ}} = \pi H_{\text{АЗ}} R_{\text{АЗ}}^2 = \pi \cdot 7 \cdot 5,9^2 = 765,12 \text{ м}^3.
 \tag{1.2}$$

1.2 Расчёт коэффициентов неравномерности энерговыделения

Коэффициенты неравномерности энерговыделения:

$$k_z = \pi \frac{H_{A3}}{2H_{\text{эф}} \sin\left(\pi \frac{H_{A3}}{2H_{\text{эф}}}\right)} = \pi \frac{7}{2 \cdot 7,36 \sin\left(\pi \frac{7}{2 \cdot 7,36}\right)} = 1,498;$$
$$k_r = \xi \frac{R_{A3}}{2R_{\text{эф}} J_1\left(\xi \frac{R_{A3}}{R_{\text{эф}}}\right)} = \xi \frac{5,9}{2 \cdot 6,1 J_1\left(\xi \frac{5,9}{6,1}\right)} = 2,173; \quad (1.3)$$
$$k_V = k_r k_z = 1,498 \cdot 2,173 = 3,257.$$

Используя результат (3), получим тепловую мощность и массовых расход теплоносителя для центрального канала:

$$Q_K = \frac{k_r Q_T}{N_{\text{ТВС}}} = \frac{2,173 \cdot 3200}{1693} = 4,108 \text{ МВт};$$
$$G_K = \frac{k_r G_T}{N_{\text{ТВС}}} = \frac{2,173 \cdot 9,861 \cdot 10^3}{1693} = 12,659 \frac{\text{кг}}{\text{с}}. \quad (1.4)$$

Дальнейший расчёт приводим для центрального канала как для самого загруженного, согласно введению.

1.3 Расчёт температуры теплоносителя по высоте активной зоны для случая канала без кипения

В этом разделе проводим расчёт, считая, что на всем протяжении канала нет кипения.

Считаем, что на всем участке канала теплоемкость теплоносителя постоянна и определяется как среднее:

$$C_{p,\text{ср}} = \frac{C_{\text{вх}} + C_{\text{вых}}}{2} = 5210 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{°К}}. \quad (1.5)$$

Погонное энерговыделение, как функция высоты активной зоны:

$$q_l(z) = \frac{Q_K k_z}{N_{\text{ТВЭЛ}}} \frac{\cos\left(\pi \frac{z}{H_{\text{эф}}}\right)}{H_{A3}}. \quad (1.6)$$

Температура теплоносителя, как функция высота, будет выражаться:

$$T_T(z) = T_{\text{вх}} + \frac{Q_T k_z}{G_T C_{p.\text{ср}}} \left(1 + \frac{\sin\left(\pi \frac{z}{H_{\text{эф}}}\right)}{\sin\left(\pi \frac{H_{\text{АЗ}}}{2H_{\text{эф}}}\right)} \right). \quad (1.7)$$

Здесь необходимо учесть, что расчёт ведется для случая, если в канале нет кипения, однако в реакторе РБМК-1000 оно есть, поэтому полученный результат справедлив только для некоторого ограниченного участка без кипения.

1.4 Распределение температуры наружной поверхности оболочки ТВЭЛ по высоте активной зоны для случая канала без кипения

Для дальнейших расчётов найдем средние величины коэффициента динамической вязкости, теплопроводности и плотности теплоносителя на протяжении всего канала:

$$\begin{aligned} \eta_{\text{ср}} &= \frac{\eta_{\text{вх}} + \eta_{\text{вых}}}{2} = 6,177 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}; \\ \lambda_{\text{ср}} &= \frac{\lambda_{\text{вх}} + \lambda_{\text{вых}}}{2} = 0,33 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{°К}}; \\ \rho_{\text{ср}} &= \frac{\rho_{\text{вх}} + \rho_{\text{вых}}}{2} = 750,68 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}. \end{aligned} \quad (1.8)$$

Находим периметр смачивания и площадь поперечного сечения, занятого теплоносителем, а затем эквивалентный гидравлический диаметр:

$$\begin{aligned} P_{\text{см}} &= \pi(N_{\text{ТВЭЛ}}d_{\text{ТВЭЛ}} + d_{\text{ТВС}} + d_{\text{центр}}) = 1,052 \text{ м}; \\ S_{\text{сеч}} &= \frac{\pi}{4}(d_{\text{ТВС}}^2 - N_{\text{ТВЭЛ}}d_{\text{ТВЭЛ}}^2 - d_{\text{центр}}^2) = 2,337 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2; \\ d_{\text{г}} &= 4 \frac{S_{\text{сеч}}}{P_{\text{см}}} = 8,882 \cdot 10^{-3} \text{ м}. \end{aligned} \quad (1.9)$$

Теперь можно рассчитать число Прандтля и число подобие Рейнольдса:

$$\begin{aligned} Pr_{\text{ТВС}} &= C_{p.\text{ср}} \frac{\eta_{\text{ср}}}{\lambda_{\text{ср}}} = 0,975; \\ Re_{\text{ТВС}} &= \frac{G_K d_{\text{г}}}{S_{\text{сеч}} \eta_{\text{ср}}} = 7,789 \cdot 10^5. \end{aligned} \quad (1.10)$$

Осталось найти константу числа Нуссельта:

$$A_{Nu} = 0,0165 + 0,02 \left(1 - 0,91 \left(\frac{l_{\text{шагТВЭЛ}}}{d_{\text{ТВЭЛ}}} \right)^{-2} \right) \left(\frac{l_{\text{шагТВЭЛ}}}{d_{\text{ТВЭЛ}}} \right)^{0,15} \quad (1.11)$$

$$= 0,0326.$$

Само число Нуссельта:

$$Nu_{\text{ТВС}} = A_{Nu} Re_{\text{ТВС}}^{0,8} Pr_{\text{ТВС}}^{0,4} = 1,668 \cdot 10^3. \quad (1.12)$$

Теперь можно найти температурные коэффициенты – коэффициент теплоотдачи между оболочкой и теплоносителем и термическое сопротивление конвективного теплообмена между оболочкой ТВЭЛ и теплоносителем:

$$\alpha_{\text{ТВЭЛ}} = Nu_{\text{ТВС}} \frac{\lambda_{\text{ср}}}{d_{\text{ТВЭЛ}}} = 4,079 \cdot 10^4 \frac{\text{Вт}}{\text{°К} \cdot \text{м}^2}; \quad (1.13)$$

$$R_{\alpha} = \frac{1}{\pi d_{\text{ТВЭЛ}} \alpha_{\text{ТВЭЛ}}} = 5,78 \cdot 10^{-4} \frac{\text{°К} \cdot \text{м}}{\text{Вт}}.$$

В итоге температура оболочки определяется простым выражением:

$$T_{\text{об}}(z) = T_T(z) + q_l(z) R_{\alpha}. \quad (1.14)$$

Однако, это выражение верно только на участке без кипения, как и с температурой теплоносителя ранее.

1.5 Нахождение границ поверхностного кипения и границы объемного кипения

В реальном канале давление не является постоянной величиной, а зависит от высоты. Поэтому, для повышения точности вычислений, введем следующую зависимость давления от высоты канала:

$$p(z) = p_{\text{вх}} + (p_{\text{вх}} + p_{\text{вых}}) \left(\frac{z}{H_{\text{АЗ}}} + \frac{1}{2} \right). \quad (1.15)$$

Используя справочные данные по зависимости температуры насыщения воды от давления и интерполируя линейно справочные данные, получаем плавную кривую для температуры насыщения воды от высоты канала $T_{\text{К.нас}}(z)$. Далее, учтем, что температура слабо зависит от высоты. Поэтому будем также использовать среднюю температуру насыщения воды $T_{\text{нас.ср}}$.

ГПК определим из условия равенства температуры насыщения воды температуре оболочки ТВЭЛ:

$$T_{K.нас}(z_{ГПК}) = T_{об}(z_{ГПК}). \quad (1.16)$$

Численное решение полученного уравнения относительно ГПК $z_{ГПК}$ даст при начальном приближении $z_{ГПК0} = -1$ м:

$$z_{ГПК} = -2,339 \text{ м}. \quad (1.17)$$

ГОК определим из условия равенства температуры насыщения воды температуре теплоносителя в канале:

$$T_{K.нас}(z_{ГОК}) = T_T(z_{ГОК}). \quad (1.18)$$

Численное решение полученного уравнения относительно ГОК $z_{ГОК}$ даст при начальном приближении $z_{ГОК0} = -1$ м:

$$z_{ГОК} = -1,297 \text{ м}. \quad (1.19)$$

Таким образом температура теплоносителя с учётом кипения:

$$T_{T.K}(z) = \begin{cases} T_T(z), & z < z_{ГОК} \\ T_{K.нас}(z), & z > z_{ГОК} \end{cases}. \quad (1.20)$$

1.6 Расчёт массового паросодержания на выходе центрального канала

Запишем закон сохранения энергии, из которого выражаем массовый расход пара на выходе:

$$Q_T = G_T C_{p.сп}(T_{нас.сп} - T_{вх}) + G_{II} r_{воды}(T_{нас.сп}), \quad (1.21)$$

где $r_{воды}(T_{нас.сп}) = 1,46 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$ – теплота парообразования воды при температуре насыщения воды.

$$G_{II} = \frac{Q_T - G_T C_{p.сп}(T_{нас.сп} - T_{вх})}{r_{воды}(T_{нас.сп})} = 1,433 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{с}}. \quad (1.22)$$

Аналогично посчитаем массовый расход пара через центральный канал:

$$G_{KII} = \frac{Q_K - G_K C_{p.сп}(T_{нас.сп} - T_{вх})}{r_{воды}(T_{нас.сп})} = 1,84 \frac{\text{кг}}{\text{с}}. \quad (1.23)$$

Тогда массовое паросодержание в среднем на выходе АЗ и в центральном канале соответственно:

$$X_{\text{АЗ}} = \frac{G_{\text{П}}}{G_{\text{Т}}} = 0,145,$$

$$X_{\text{ВЫХ}} = \frac{G_{\text{КП}}}{G_{\text{К}}} = 0,145. \quad (1.24)$$

1.7 Расчёт массового паросодержания X , объемного паросодержание β и истинного паросодержание φ на всём протяжении канала

Данный расчёт проводится итерационным образом. Он необходим, во-первых, для определения характеристик пароводяной смеси в канале. Во-вторых, для уточнения ГОК. При этом расчёт приводим только для центрального канала, как для самого загруженного.

Зададим начальное приближение. Начнем с массового паросодержания. Зная, что на ГПК массовое паросодержание равно 0, а на выходе из канала 0,145, линейно аппроксимируем зависимость $X_{\text{ВЫХ}}(z)$.

По полученному приближению рассчитаем энтальпию пароводяной смеси в зависимости от высоты:

$$i_{\text{ПВ}}(z) = i_{\text{В.нас}}(T_{\text{Т.К}}(z))(1 - X_{\text{ВЫХ}}(z)) + i_{\text{П.нас}}(T_{\text{нас.ср}})X_{\text{ВЫХ}}(z). \quad (1.25)$$

Отметим, что здесь уже учтена зависимость от давления в функциях температуры.

Далее, рассчитываем относительную энтальпию потока:

$$x_i(z) = \frac{i_{\text{ПВ}}(z) - i_{\text{В.нас}}(T_{\text{К.нас}}(z))}{r_{\text{воды}}(T_{\text{Т.К}}(z))}. \quad (1.26)$$

Объемное паросодержание:

$$\beta(z) = \frac{X_{\text{ВЫХ}}(z)v_{\text{П.нас}}(T_{\text{К.нас}}(z))}{X_{\text{ВЫХ}}(z)v_{\text{П.нас}}(T_{\text{К.нас}}(z)) + (1 - X_{\text{ВЫХ}}(z))v_{\text{В.нас}}(T_{\text{Т.К}}(z))}, \quad (1.27)$$

где v – удельный объем для пары и воды при насыщении.

Коэффициент проскальзывания фаз:

$$w(z) = 1 + \frac{0,6 + 1,5\beta(z)^2}{\sqrt[4]{Fr}} \left(1 - \frac{p_{\text{ср}}}{p_{\text{кр}}}\right) \sqrt{1 - \exp(-20\beta(z))}, \quad (1.28)$$

где $Fr = \frac{w_{\text{Т}}^2}{gd_{\text{Г}}}$ – число Фруда;

$$W_T = \frac{G_K v_{В.нас}(T_{ср.нас})}{S_{сеч}} - \text{скорость циркуляции теплоносителя};$$

$p_{кр} = 22,12$ МПа – критическое давление для воды.

Истинное объемное паросодержание:

$$\varphi(z) = \frac{X_{ВЫХ}(z)}{X_{ВЫХ}(z) + (1 - X_{ВЫХ}(z)) \frac{v_{В.нас}(T_{Т.К}(z))}{v_{П.нас}(T_{ср.нас})} w(z)} \quad (1.29)$$

Теперь, когда заданы все параметры, необходимо задать первоначальную скорости генерации и конденсации пара соответственно:

$$D_{\Gamma}^0(z) = \begin{cases} 0, & x_i < x_{ГПК} \\ \frac{q_l(z)P_0}{r_{Воды}(T_{Т.К}(z))} \tanh\left(3,5 \left(1 - \frac{x_i(z)}{x_{ГПК}}\right)\right), & x_{ГПК} \leq x_i < x_{ГОК} \\ 1, & x_{ГОК} \leq x_i \end{cases} \quad (1.30)$$

$$D_K^0(z) = \begin{cases} -C_K G_K x_i(z) \varphi(z) \left(1 + 5 \exp(-20\beta(z))\right), & x_i < 0 \\ 0, & x_i > 0 \end{cases} \quad (1.31)$$

Здесь P_0 – периметр обогрева, $C_K = 17 \text{ м}^{-1}$.

Теперь можно замкнуть цикл, посчитав массовое паросодержание:

$$X_{ВЫХ}(z) = \frac{1}{H_{АЗ}} \int_{z_{ГПК}}^z (D_{\Gamma}^0(z) - D_K^0(z)) dz. \quad (1.32)$$

Теперь повторяется цикл, рассчитывая параметры по формулам (25–31). Затем по формуле (32) уточняется массовое паросодержание и так далее до тех пор, пока не будет получена удовлетворяющая точность по скоростям генерации и конденсации пара.

Теперь можно получить уточненное значение ГОК из следующего уравнения относительно $z_{ГОК}$:

$$i_{ПВ}(z_{ГОК}) = i_{В.нас}(T_{К.нас}(z_{ГОК})) \quad (1.33)$$

Получается следующее значение:

$$z_{ГОК} = -1,484 \text{ м}. \quad (1.34)$$

Видно отличие от полученного ранее результата (19).

В заключении пункта приведем график зависимости массового паросодержания от высоты АЗ на рисунке 2.

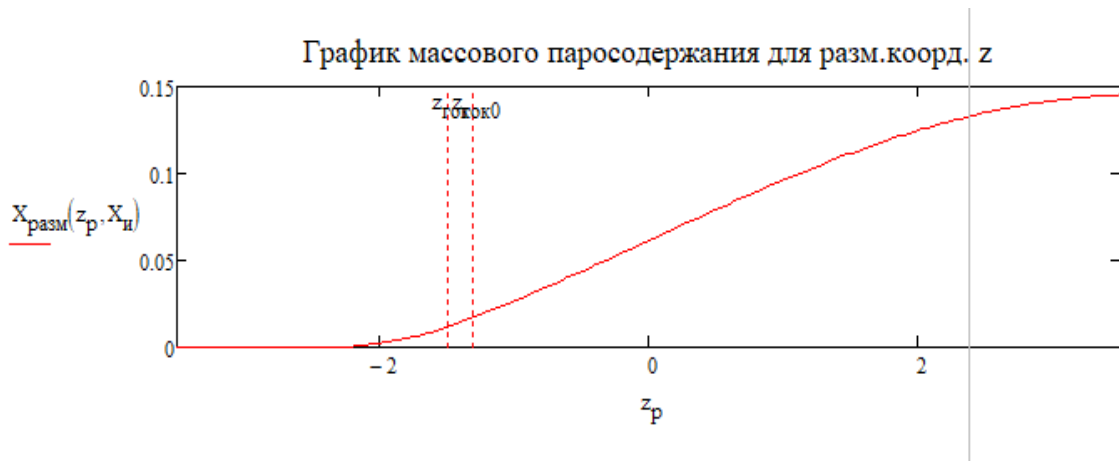


Рисунок 2 Зависимость массового паросодержания от высоты канала

1.8 Расчёт распределения температуры оболочки ТВЭЛа

Теперь проводим расчёт с учетом кипения. Для экономайзерного участка расчёт выполнен в пункте 1.4.

Начнем расчёт с участка объемного кипения, поскольку формулы для участка поверхностного кипения уточняют формулы для объемного кипения.

Для начала рассчитаем мощность, выделяемую единицей поверхности:

$$q(z) = Q_K \frac{k_z}{N_{ТВЭЛ} \pi d_{ТВЭЛ}} \frac{\cos\left(\pi \frac{z}{H_{эф}}\right)}{H_{Аз}} \quad (1.35)$$

Проведем вычисление коэффициента с помощью формулы Боришанского:

$$\alpha_{кип}(z) = \frac{9q(z)^{0,7}}{3,3 - 0,0113(T_{К.нас}(z) - 100)} \quad (1.36)$$

Существуют и другие формулы, с помощью которых можно проверить правильность получаемого результата. Например, формула Лабунцова:

$$\alpha_{кип}(z) = \frac{3,4p(z)^{0,18} q(z)^{\frac{2}{3}}}{1 - 0,0045p(z)} \quad (1.37)$$

Данные функции схожи между собой. Поэтому считаем, что предложенные формулы верные.

Формула для участка поверхностного кипения:

$$\alpha_{пв.кип}(z) = \alpha_{кип}(z) \frac{q(z)}{q(z) + \alpha_{кип}(z)(T_{К.нас}(z) - T_{Т.К}(z))} \quad (1.38)$$

Для лучшей сшиваемости формул для разных участков запишем следующее выражение, действующее на всем протяжении АЗ:

$$\alpha_{\text{ТВЭЛ.кип}}(z) = \begin{cases} \alpha_{\text{ТВЭЛ}}, & \alpha_{\text{пв.кип}}(z) < \alpha_{\text{ТВЭЛ}} \text{ и } z < z_{\text{Гок}} \\ \alpha_{\text{пв.кип}}(z) & \end{cases}. \quad (1.39)$$

Находим термическое сопротивление конвективного теплообмена между оболочкой и теплоносителем:

$$R_{\text{ТВЭЛ.кип}}(z) = \frac{1}{\pi d_{\text{ТВЭЛ}} \alpha_{\text{ТВЭЛ.кип}}(z)}. \quad (1.40)$$

Тогда температура оболочки:

$$T_{\text{об}}(z) = T_{\text{Т.К}}(z) + q_l(z) R_{\text{ТВЭЛ.кип}}(z). \quad (1.41)$$

1.9 Расчёт распределения температуры контактного зазора

Здесь, как и ниже, расчёт достаточно прост. Термическое сопротивление оболочки:

$$R_{\lambda_{\text{об}}} = \frac{1}{2\pi\lambda_{\text{об}}} \ln\left(\frac{d_{\text{ТВЭЛ}}}{R_{\text{КЗ}}}\right). \quad (1.42)$$

Температура контактного зазора:

$$T_{\text{КЗ}}(z) = T_{\text{об}}(z) + q_l(z) R_{\lambda_{\text{об}}}. \quad (1.43)$$

1.10 Расчёт распределения температуры поверхности топлива

Термическое сопротивление контактного сопротивления:

$$R_{\lambda_{\text{КЗ}}} = \frac{1}{2\pi\lambda_{\text{КЗ}}} \ln\left(\frac{R_{\text{ТТ}}}{R_{\text{КЗ}}}\right). \quad (1.44)$$

Температура поверхности топлива:

$$T_{\text{Т}}(z) = T_{\text{К}}(z) + q_l(z) R_{\lambda_{\text{КЗ}}}. \quad (1.45)$$

1.10 Расчёт максимальной температуры (в центре топливной таблетки)

Термическое сопротивление теплопроводности топлива:

$$R_{\lambda_{\text{ТТ}}} = \frac{1}{4\pi\lambda_{\text{ТТ}}}. \quad (1.46)$$

Максимальная температура топлива:

$$T_{max}(z) = T_T(z) + q_l(z)R_{\lambda_{TT}} \quad (1.46)$$

В конце теплового расчёта рассмотрим график получившихся значений температур в зависимости от высоты канала, представленный на рисунке 3.

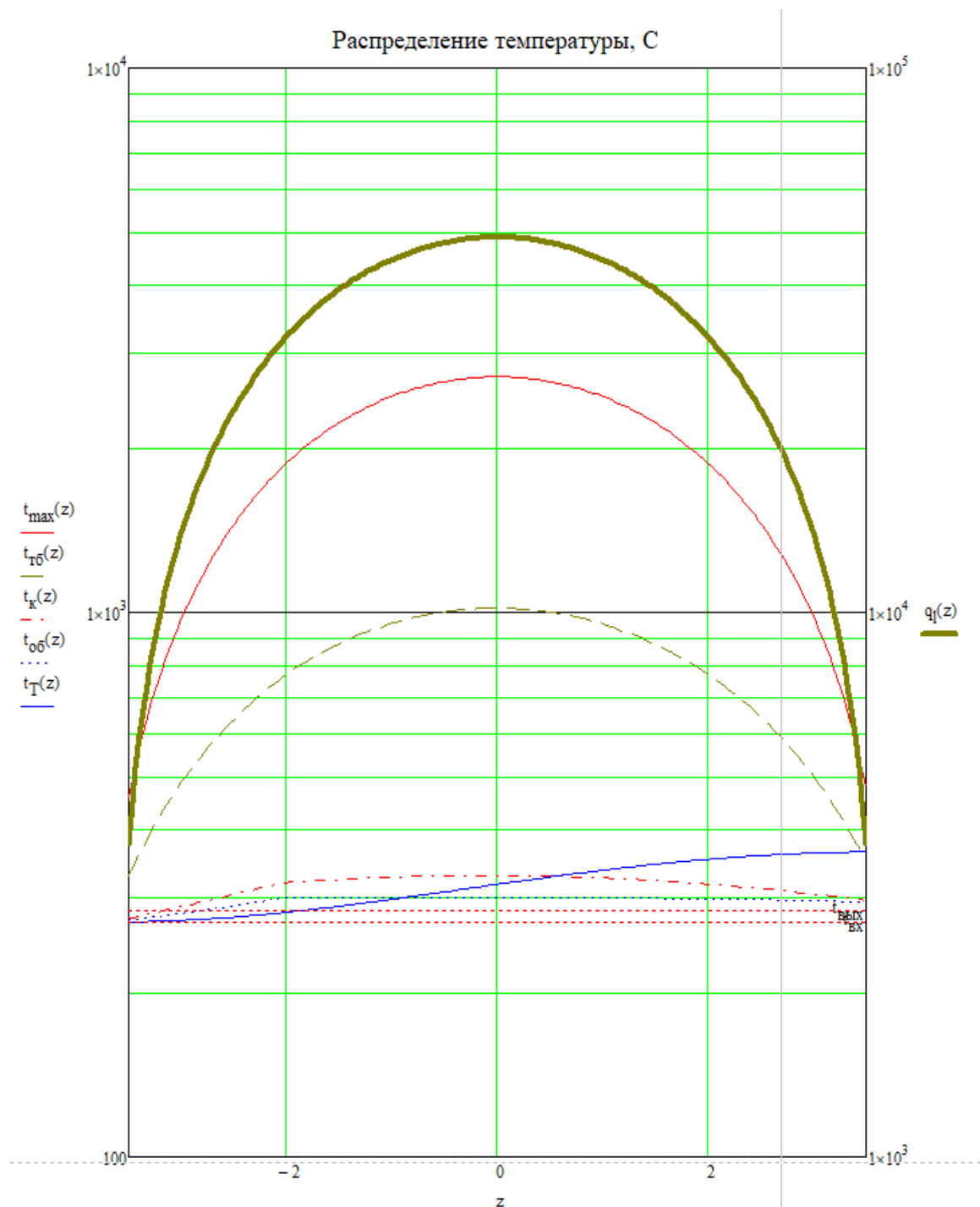


Рисунок 3 График распределения температур в конструкционных элементах АЗ и погонная энергонапряженность в зависимости от высоты канала

Видим, что максимальная температура топлива превышает 2500 °С, то есть при данных вводных будет нарушена нормальная эксплуатация реактора из-за перегрева топлива.

По остальным элементам превышения температурного предела нет.

2 Гидравлический расчёт

Здесь проводится вычисляется перепад давления теплоносителя в контуре, чтобы затем подобрать главный циркуляционный насос так, чтобы обеспечить должный отвод тепла из АЗ.

Для простоты приведен расчёт не для всего контура реактора, а лишь для АЗ. Обсудим общую идею расчёта. Разбиваем всю АЗ на 3 участка: первый пучок ТВЭЛов, небольшой промежуток между пучками и второй пучок ТВЭЛов. На каждом из этих участков проводится расчёт перепада давления. Затем полученные значения суммируются – получается перепад давления на АЗ. Кроме того, необходимо учесть, что между участками происходит резкое изменение геометрии канала. Поэтому необходимо учесть и такие вклады в перепад давления – местные сопротивления.

Однако, стоит отметить, что в канале происходит кипение. Поэтому расчет перепадов давления на отдельных участках нужно проводить с учетом наличие/отсутствия пара в канале.

Компоненты, на которых считаем перепад давления: экономайзерный участок на первом пучке ТВЭЛов, участок поверхностного кипения на первом пучке ТВЭЛов, первый участок объемного кипения на пучке ТВЭЛов, местное сопротивление перехода первый пучок ТВЭЛов – промежуток труба в трубе, второй участок объемного кипения на промежутке труба в трубе, местное сопротивление перехода промежуток труба в трубе – второй пучок ТВЭЛов, третий участок объемного кипения на втором пучке ТВЭЛов.

Поскольку в тепловом расчёте были получены ГПК и ГОК, а также нам известны геометрические параметры каналы, то можно сразу записать длины каждого из участков. Соответственно: $l_3 = 1,16$ м, $l_{п} = 0,86$ м, $l_{ок1} = 1,41$ м, $l_{тт} = 0,14$ м, $l_{ок3} = 3,43$ м.

Наконец, отметим, что вычисления проводим, как и для теплового расчёта, только в центральном канале, поскольку тот является самым загруженным и требующим наибольший отвод тепла.

2.1 Экономайзерный участок на первом пучке ТВЭЛов

Для простоты примем, что число Рейнольдса на протяжении участков с пучками ТВЭЛов не меняется и равно следующему усредненному значению:

$$Re_{\text{ср}} = \frac{1}{2} \frac{G_K d_{\Gamma}}{S_{\text{сеч}}} \left(\frac{1}{\eta_{\text{вх}}} + \frac{1}{\eta_{\text{вк}}} \right) = 1,41 \cdot 10^6. \quad (2.1)$$

Коэффициент трения без учета шероховатости:

$$\lambda_{\text{тр1}} = \frac{0,21}{Re_{\text{ср}}^{0,25}} \left(1 + \left(\frac{l_{\text{шагТВЭЛ}}}{d_{\text{ТВЭЛ}}} - 1 \right)^{0,32} \right) = 0,012. \quad (2.2)$$

Тогда перепад давления на экономайзерном участке:

$$\Delta p_1 = \frac{\lambda_{\text{тр1}} l_{\text{э}} G_K^2}{d_{\Gamma} S_{\text{сеч}}^2 (\rho_{\text{вх}} + \rho_{\text{воды}}(z_{\text{ГПК}}))} = 2,95 \cdot 10^4 \text{ Па}. \quad (2.3)$$

2.2 Участок поверхностного кипения на первом пучке ТВЭЛов

Расчёт с учетом поверхностного кипения несколько сложнее. Для начала необходимо рассчитать вспомогательные величины. Среднее энерговыделение с единицы площади в единицу времени:

$$q_{\text{ср}} = \frac{q(z_{\text{ГПК}}) + q(z_{\text{ГОК}})}{2} = 7,76 \cdot 10^5 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}. \quad (2.4)$$

Средняя теплота парообразования на участке поверхностного кипения:

$$r_{\text{ср}} = \frac{r_{\text{воды}}(z_{\text{ГПК}}) + r_{\text{воды}}(z_{\text{ГОК}})}{2} = 1,52 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}. \quad (2.5)$$

Разница энтальпии пароводяной смеси на конце участка поверхностного кипения и энтальпии воды на линии насыщения:

$$\Delta i_{\text{кпк}} = |i_{\text{в.нас}} - i_{\text{ПВ}}(z_{\text{ГОК}})| = 1,73 \cdot 10^4 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}. \quad (2.6)$$

Разница энтальпии пароводяной смеси на начале участка поверхностного кипения и энтальпии воды на линии насыщения:

$$\Delta i_{\text{нпк}} = |i_{\text{в.нас}} - i_{\text{ПВ}}(z_{\text{ГПК}})| = 6,15 \cdot 10^4 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}. \quad (2.7)$$

Периметр обогрева:

$$P_0 = N_{\text{ТВЭЛ}} \pi d_{\text{ТВЭЛ}} = 0,76 \text{ м}. \quad (2.8)$$

Коэффициент трения:

$$\lambda_{\text{тр}2} = \lambda_{\text{тр}1} \left[1 + 3,09 \left(\frac{\rho_{\text{ср}} q_{\text{ср}} S_{\text{сеч}}}{\rho_{\text{п.нас}} r_{\text{ср}} G_{\text{К}}} \right)^{0,7} \left(7 - \sqrt{1 + 48 \frac{\Delta i_{\text{КПК}}}{\Delta i_{\text{НПК}}}} \right) \frac{P_0}{P_{\text{см}}} \right] \quad (2.9)$$

$$= 0,012.$$

Здесь $\rho_{\text{п.нас}} = 39,15 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ – плотность пара на линии насыщения.

Тогда перепад давления на участке поверхностного кипения:

$$\Delta p_2 = \frac{\lambda_{\text{тр}2} l_{\text{п}} G_{\text{К}}^2}{d_{\text{г}} S_{\text{сеч}}^2 (\rho_{\text{воды}}(z_{\text{ГПК}}) + \rho_{\text{воды}}(z_{\text{ГОК}}))} = 2,43 \cdot 10^4 \text{ Па.} \quad (2.10)$$

2.3 Первый участок объемного кипения на первом пучке ТВЭЛов

Для простоты расчёта аппроксимируем массовое паросодержание по следующей формуле:

$$X(z) = 0,026z + 0,0608 = 2,43 \cdot 10^4 \text{ Па.} \quad (2.11)$$

Координаты границы первого пучка $z_1 = -0,068 \text{ м}$.

Тогда можно посчитать среднее массовое паросодержание:

$$X_{\text{ср}1} = \frac{X(z_{\text{ГОК}}) + X(z_1)}{2} = 0,041. \quad (2.12)$$

Коэффициент трения:

$$\lambda_{\text{тр}3} = \lambda_{\text{тр}1} \left(1 + X_{\text{ср}1} \left(\frac{\rho_{\text{в.нас}}}{\rho_{\text{п.нас}}} - 1 \right) \right) = 0,02. \quad (2.13)$$

Здесь $\rho_{\text{в.нас}} = 737,11 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ – средняя плотность воды на линии насыщения.

Перепад давления на первом участке объемного кипения:

$$\Delta p_3 = \frac{\lambda_{\text{тр}3} l_{\text{ок}1} G_{\text{К}}^2}{2 d_{\text{г}} S_{\text{сеч}}^2 \rho_{\text{в.нас}}} = 6,5 \cdot 10^4 \text{ Па.} \quad (2.14)$$

2.4 Местное сопротивление перехода первый пучок ТВЭЛов – промежуток труба в трубе

Здесь расчёт проводится несколько иначе. Считаем в первом приближении, что происходит резкое уширение. Тогда местное сопротивление:

$$\xi_1 = \left(1 - \frac{S_{\text{сеч}}}{\frac{\pi}{4}(d_{\text{ТВС}}^2 - d_{\text{центр}}^2)} \right)^2 = 0,275. \quad (2.15)$$

Тогда перепад давления:

$$\Delta p_4 = \xi_1 \left[1 + X(z_1) \left(\frac{\rho_{\text{в.нас}}}{\rho_{\text{п.нас}}} - 1 \right) \right] \frac{G_K^2}{2S_{\text{сеч}}^2 \rho_{\text{в.нас}}} = 1,12 \cdot 10^4 \text{ Па}. \quad (2.16)$$

2.5 Второй участок объемного кипения на промежутке труба в трубе

Здесь нужно пересчитать многие параметры. Площадь, занятая теплоносителем:

$$S_{\text{тт}} = \frac{\pi}{4}(d_{\text{ТВС}}^2 - d_{\text{центр}}^2) = 4,91 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2. \quad (2.17)$$

Периметр смачивания:

$$P_{\text{тт}} = \pi(d_{\text{ТВС}} + d_{\text{центр}}) = 0,29 \text{ м}. \quad (2.18)$$

Гидравлический диаметр:

$$d_{\text{гтт}} = 4 \frac{S_{\text{тт}}}{P_{\text{тт}}} = 0,068 \text{ м}. \quad (2.19)$$

Число Рейнольдса:

$$Re_{\text{ср.тт}} = \frac{G_K d_{\text{гтт}}}{S_{\text{сеч}} \eta_{\text{ср}}} = 2,836 \cdot 10^6. \quad (2.20)$$

Коэффициент трения без учета кипения:

$$\lambda_{\text{тр4}} = \frac{0,21}{Re_{\text{ср.тт}}^{0,25}} = 5,12 \cdot 10^{-3}. \quad (2.21)$$

Верхняя граница данного промежутка $z_2 = 0,068 \text{ м}$. Тогда среднее массовое паросодержание:

$$X_{\text{ср2}} = \frac{X(z_1) + X(z_2)}{2} = 0,061. \quad (2.22)$$

Теперь можно посчитать коэффициент трения с учетом объемного кипения:

$$\lambda_{\text{тр5}} = \lambda_{\text{тр4}} \left(1 + X_{\text{ср2}} \left(\frac{\rho_{\text{в.нас}}}{\rho_{\text{п.нас}}} - 1 \right) \right) = 0,011. \quad (2.23)$$

И в итоге перепад давления:

$$\Delta p_5 = \frac{\lambda_{\text{тр5}} l_{\text{тт}} G_{\text{К}}^2}{2 d_{\text{тт}} S_{\text{сеч}}^2 \rho_{\text{в.нас}}} = 96,036 \text{ Па}. \quad (2.24)$$

2.6 Местное сопротивление перехода промежутков труба в трубе – второй пучок ТВЭЛов

Здесь считаем, что у нас происходит внезапное сужение. Тогда коэффициент местного сопротивления можно рассчитать следующим образом:

$$\xi_2 = 0,5 \left(1 - \frac{S_{\text{сеч}}}{\frac{\pi}{4} (d_{\text{ТВС}}^2 - d_{\text{центр}}^2)} \right)^2 = 0,14. \quad (2.25)$$

Тогда перепад давления:

$$\Delta p_6 = \xi_2 \left[1 + X(z_2) \left(\frac{\rho_{\text{в.нас}}}{\rho_{\text{п.нас}}} - 1 \right) \right] \frac{G_{\text{К}}^2}{2 S_{\text{сеч}}^2 \rho_{\text{в.нас}}} = 5,79 \cdot 10^4 \text{ Па}. \quad (2.26)$$

2.7 Третий участок объемного кипения на втором пучке ТВЭЛов

Снова считаем среднее массовое паросодержание:

$$X_{\text{ср3}} = \frac{X(z_2) + X\left(\frac{H_{\text{А3}}}{2}\right)}{2} = 0,107. \quad (2.27)$$

Коэффициент трения:

$$\lambda_{\text{тр6}} = \lambda_{\text{тр1}} \left(1 + X_{\text{ср3}} \left(\frac{\rho_{\text{в.нас}}}{\rho_{\text{п.нас}}} - 1 \right) \right) = 0,035. \quad (2.24)$$

Перепад давления:

$$\Delta p_7 = \frac{\lambda_{\text{тр6}} l_{\text{окз}} G_{\text{К}}^2}{2d_{\Gamma} S_{\text{сеч}}^2 \rho_{\text{в.нас}}} = 2,66 \cdot 10^4 \text{ Па.} \quad (2.25)$$

2.8 Итоги расчёта

Общий перепад давления или потери на трения на АЗ получается:

$$\Delta p = \sum_{i=1}^7 \Delta p_i = 4,018 \cdot 10^5 \text{ Па.} \quad (2.26)$$

Известны номинальное давление теплоносителя на входе и выходе АЗ. Поэтому можно рассчитать номинальный перепад давления:

$$\Delta p_{\text{ном}} = p_{\text{вх}} - p_{\text{вых}} = 4,2 \cdot 10^5 \text{ Па.} \quad (2.27)$$

Видим, что результаты расчёта хорошо соотносятся с паспортным значением реактора. Погрешности определяется, в первую очередь, огрублением при расчете средних величин, особенно массового паросодержания, и расчете перепадов давления на местных сопротивлениях. Дальнейшее уточнение данных величин позволит улучшить соотношение расчетного и номинального значений перепада давления.

3 Нейтронно-физических расчётов

В данном разделе необходимо вычислить, в первую очередь, коэффициент размножения, значение которого позволит судить о возможности протекания самоподдерживающейся ценной реакции деления. Поскольку реактор запускают при одних температурных условиях, а его нормальная эксплуатация происходит при других, то коэффициент размножения необходимо рассчитать для обоих случаев. Первые условия назовем холодным реактором, а вторые горячим. После этого можно рассчитать реактивность. Важность учета температуры обусловлена её заметным влиянием на сечения реакций, а также тепловым расширением конструкций.

Поскольку реактор РБМК-1000 гетерогенный, то для возможности проведения расчета необходимо заменить его гомогенной средой, нейтронно-физические характеристики которой эквивалентны исходной.

Алгоритм, следующий:

1. Задаем элементный состав АЗ и микросечения элементов в 26-групповом приближении;
2. Рассчитываем гомогенных ядерных плотностей веществ и макросечений АЗ;
3. Пересчитываем 26-групповой спектр нейтронов гомогенного приближения;
4. Пересчитываем 4-групповое микросечений по полученному спектру нейтронов для гомогенного приближения;
5. Рассчитываем ядерные плотности вещества и макросечений по трем зонам элементарной ячейки – топливо, замедлитель, оболочка;
6. Рассчитываем следующие сомножители: коэффициент размножения на быстрых нейтронах μ , вероятность избежать резонансного поглощения в ^{238}U φ , коэффициент использования тепловых нейтронов θ , число вторичных нейтронов на один поглощенный топливом нейтрон ν ;
7. Перемножая данные значения, получаем коэффициент размножения нейтронов для бесконечной среды k_{∞} ;
8. Учтя конечные размеры АЗ, получаем эффективный коэффициент размножения нейтронов $k_{\text{эфф}}$.

Используя данный алгоритм и необходимые формулы, расчет для реакторов типа ВВЭР получаем верный результат, однако для реактора РБМК-1000 проблема возникает при вычислении коэффициента использования тепловых нейтронов. Во-первых, его значение сильно отличается от промежутка типичных значений. Во-вторых, для остальных сомножителей выполняется следующее правило: в горячем реакторе значение меньше, чем в холодном. Однако, здесь мы наблюдаем противоположную картину. И

поскольку значение в горячем реакторе сильно больше, чем в холодном. То есть наблюдается положительная реактивность по температуре.

Приведем полученные значения сомножителей для холодного и горячего реакторов, а также получившиеся значения коэффициента размножения нейтронов в таблице 3.

Таблица 3 Значения сомножителей

	Холодный	Горячий
μ	1,039	1,038
φ	0,89	0,864
θ	0,481	0,68
ν	1,7	1,662
k_{∞}	0,756	1,013

Предлагаются следующие способы решения проблемы: использование другого способа алгоритма, уточнение формул для сомножителей в целом для реактора типа РБМК, использование четырех зон элементарной ячейки: топливо, замедлитель, теплоноситель, оболочка.

Выводы

1. Проведен тепловой и гидравлические расчёты для реактора РБМК-1000.

2. В ходе теплового расчёта установлено распределение температур конструктивных элементов центрального канала от высоты. Получено, что температура в центре топлива будет превышать порог. Значит, что сплошные цилиндрические таблетки нельзя использовать в реакторе из-за перегрева. Остальные элементы не превысили температурный порог. В ходе расчёта не вычислена температура замедлителя – графита, а также температура топлива с другой конфигурации таблетки – с отверстием в центре. Не проверено наличие критических тепловых потоков.

3. Кроме того, получено распределение массового паросодержание в центральном канале от его высоты. Вместе с этим получены и распределения других параметров пароводяной смеси.

4. В ходе гидравлического расчёта получены потери на трения или перепад давления на АЗ. Полученное значение практически сошлось с номинальным значением. Предложены способы улучшения расчёта. Прочие участки контура не были приняты во внимание. Определение гидродинамической устойчивости реактора не проведено.

5. Нейтронно-физический расчет не выполнен до конца из-за существенной ошибки при вычислении коэффициента использования тепловых нейтронов. Предложены способы для улучшения расчета.