

ГИДРОДИНАМИКА И ТЕПЛООБМЕН В РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКЕ «МАСТЕР»

С.Л. Дорохович, Ю.А. Казанский*, А.А. Казанцев***,**

С.В. Ковальчук, А.В. Левченко**, В.А. Левченко**, Ю.С. Юрьев*****

** Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ, г. Обнинск*

*** ЭНИМЦ «Моделирующие системы», г. Обнинск*

**** ГНЦ РФ-Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск*



Приведены результаты расчетных исследований теплофизических и гидродинамических процессов, протекающих в реакторной установке МАСТЕР, подробное описание которой было опубликовано в журнале «Известия вузов. Ядерная энергетика» [1, 2].

Полученные результаты обеспечивают расчетное обоснование тепловой мощности, рабочего давления, геометрии и безопасного функционирования установки.

Проводились проектировочный и поверочный расчеты установки с использованием методов вычислительной гидродинамики разрабатываемого программного комплекса «КАНАЛ».

Ключевые слова: гидродинамика, теплообмен, реакторная установка, активная зона, проектировочный расчет, поверочный расчет.

Key words: hydrodynamics, heat exchange, reactor installation, designing calculation, testing calculation.

ВВЕДЕНИЕ

Данная публикация является продолжением работ [1, 2] по обоснованию возможности создания саморегулируемого реактора сверхмалой тепловой мощности до 1 МВт с длительным сроком непрерывной работы (60 лет). По сравнению с другими проектами реакторных установок малой мощности [3, 4] установка МАСТЕР отличается низким давлением в первом контуре охлаждения (0.15 МПа на входе в активную зону (АЗ) реактора) и возможностью передачи тепла от ядерного топлива теплоносителю первого контура за счет теплопроводности [2]. Ранее в [2] были приведены результаты используемого приближенного теплогидравлического расчета, называемого в данной статье проектировочным, но без описания его методики. Кроме того, была изменена концентрация выгорающего поглотителя – диспрозия в стенках внутреннего кольцевого канала АЗ, что привело к изменению соотношения тепловых мощностей, выделяемых во внутреннем и внешнем модулях АЗ.

Целью работы является теплогидравлическое обоснование первого контура установки МАСТЕР путем проведения его уточненных двумерных расчетов. При этом следует принять во внимание трехконтурную систему отвода тепла: первый замк-

© С.Л. Дорохович, Ю.А. Казанский, А.А. Казанцев, С.В. Ковальчук, А.В. Левченко, В.А. Левченко, Ю.С. Юрьев, 2012

нутый контур с естественной циркуляцией; второй контур и контур потребителя с принудительной циркуляцией.

При обосновании первого контура установки необходимо выполнение следующих технических требований:

- температура воды у потребителя не выше 80°C;
- температура теплоносителя ниже температуры кипения при работе установки в номинальном режиме;
- максимальная температура топлива активной зоны ниже предельно допустимой;
- отсутствие высокого давления в контурах;
- приемлемые габариты реактора, тягового участка контура естественной циркуляции, значения площадей поверхностей теплообмена теплообменников первого и второго контуров;
- надежный отвод тепла от реактора в переходных и аварийных режимах работы установки.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- с помощью кода MCNP получено пространственное распределение тепловыделения в АЗ для измененной концентрации диспрозия в стенках внутреннего кольцевого канала АЗ, использованное в теплогидравлическом расчете;
- выполнен проектировочный расчет реакторной установки МАСТЕР тепловой мощностью 1 МВт;
- разработаны нодализационные схемы, позволяющие получить решения для сформулированных теплофизических моделей на доступных средствах вычислительной техники и в приемлемые интервалы времени;
- выполнен уточненный (проверочный) двумерный теплогидравлический расчет первого контура реакторной установки тепловой мощностью 1 МВт с использованием данных по техническим характеристикам и конструкционным материалам, приведенным в [2].

КОНСТРУКЦИЯ И ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕАКТОРА «МАСТЕР»

Конструктивная схема реактора МАСТЕР (первого контура реакторной установки) тепловой мощностью 1 МВт описана в работе [2] и представлена на рис. 1. Первый контур установки включает в себя кольцевые каналы внутри и снаружи АЗ реактора, тяговую трубу, теплообменник и опускной кольцевой канал. Движение воды в реакторе происходит за счет естественной циркуляции.

В таблице 1 приведены данные по техническим характеристикам и конструкционным мате-

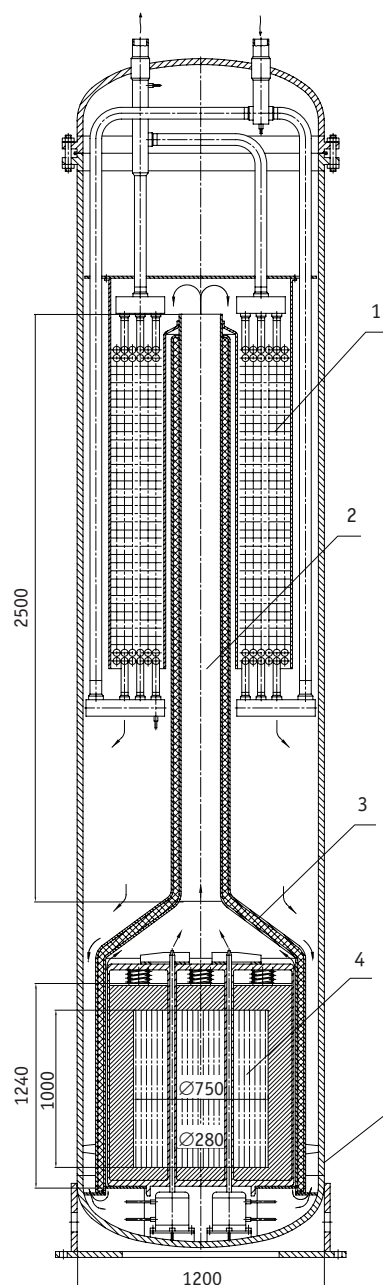


Рис. 1. Конструктивная схема реактора МАСТЕР: 1 – теплообменник; 2 – тяговая труба; 3 – теплоизолирующая обечайка; 4 – активная зона; 5 – корпус реактора

Таблица 1

Параметр	Значение
Высота АЗ, мм	1000
Внешний диаметр внутреннего модуля АЗ, мм	286
Внутренний диаметр внешнего модуля АЗ, мм	336
Внешний диаметр внешнего модуля АЗ, мм	750
Внешний диаметр внешнего модуля АЗ с отражателем, мм	956
Толщина стенки модуля АЗ, мм	3
Количество твэлов во внутреннем модуле АЗ, шт.	199
Внешний диаметр твэла, мм	13,5
Толщина оболочки твэла, мм	0,9
Диаметр топлива в твэле, мм	13,5
Высота тягового участка, мм	2500
Диаметр тягового участка, мм	200
Внутренний диаметр корпуса реактора, мм	1140
Высота корпуса реактора, мм	6100
Толщина корпуса реактора, мм	30
Материал замедлителя и отражателей	Сплав Al(38%)+Be(62%)
Топливо	UO ₂
Материал оболочки твэла	Сплав Zr(99%)+Nb(1%)
Материал внешней стенки внешнего модуля АЗ	Сталь 12Х18Н10Т
Материал стенок внутреннего кольцевого канала АЗ ^{*)}	Сталь 12Х18Н10Т + 1,6% Dy

^{*)} Состав материалов дан в процентах по массе.

^{**)} Содержание диспрозия было изменено и равнялось 4%.

риалам реактора, представленные в [2] и использованные в теплогидравлических проектировочном и поверочном расчетах.

На рисунках 2, 3 приведены расчетные схемы кольцевых каналов охлаждения АЗ реактора. Здесь q_1 , q_2 – соответственно плотности потока тепла на внутренней и внешней стенках канала внутри АЗ; q_3 – плотность потока тепла на внутренней стенке канала снаружи АЗ; G_1 , G_2 – массовые расходы воды через каналы внутри и снаружи АЗ.

Конструктивная схема теплообменника первого контура установки представлена на рис. 4. Поверхность теплообмена выполняется в виде шести трубок из алюминия, свернутых в плоские спирали по высоте теплообменника, объединенных во входном и выходном коллекторах. Площадь поверхности теплообмена составляет 42 м². Вода первого контура движется в межтрубном пространстве теплообменника сверху вниз; вода второго контура – по трубкам теплообменника снизу вверх.

ПРОЕКТИРОВОЧНЫЙ РАСЧЕТ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕАКТОРА МАСТЕР

Проектировочный теплогидравлический расчет реактора для стационарного режима его работы заключался в решении следующей системы уравнений:

$$Q = G_f c_f (t_{f2} - t_{f1}); \quad (1)$$

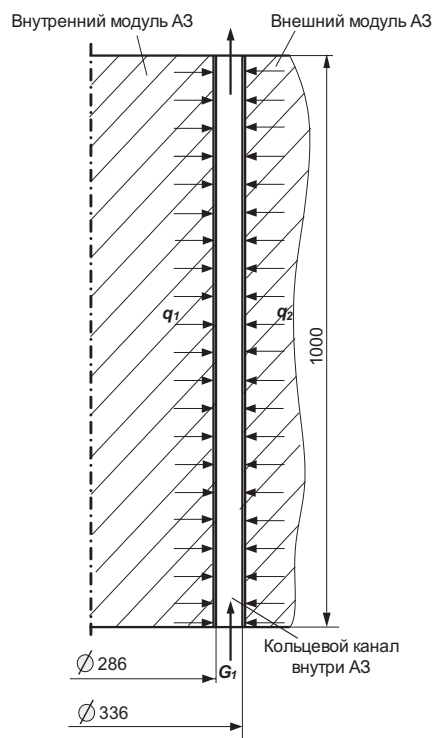


Рис. 2. Расчетная схема кольцевого канала внутри АЗ реактора

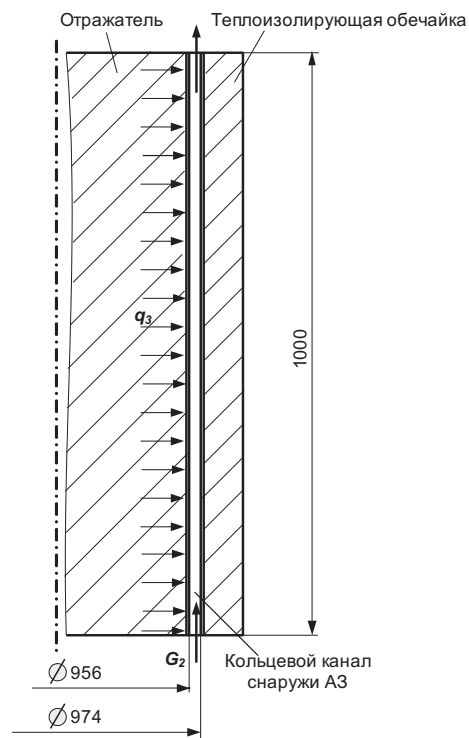


Рис. 3. Расчетная схема кольцевого канала снаружи АЗ реактора

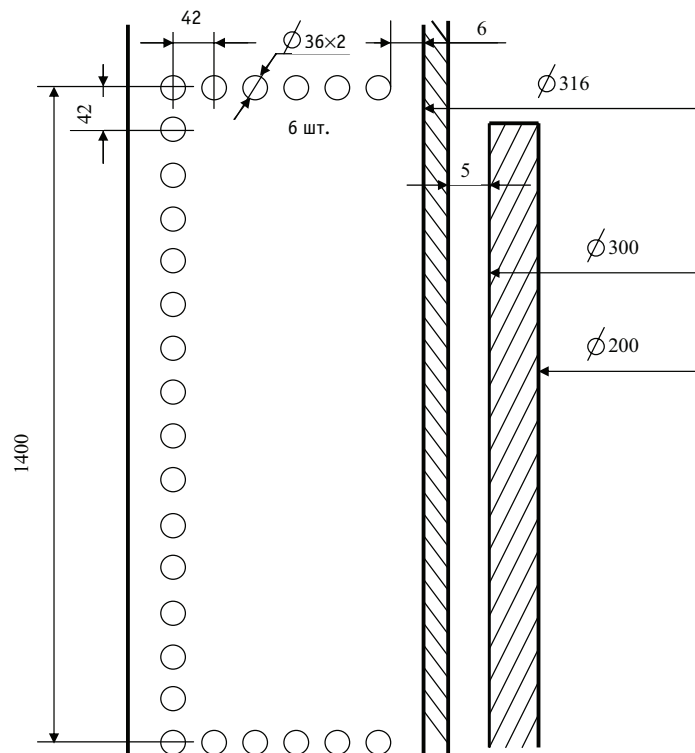


Рис. 4. Схема теплообменника первого контура установки

$$G_f = \rho_f F_{np} \sqrt{\frac{g(H_{a3} + 2h_{ty} - h_{to1})}{\xi_{\Sigma}}} \beta_f (t_{f2} - t_{f1}); \quad (2)$$

$$\bar{t}_c = \frac{t_{f1} + t_{f2}}{2} + \frac{q}{\alpha_f}; \quad (3)$$

$$\bar{t}_R = \frac{t_{f1} + t_{f2}}{2} + q \left(\frac{1}{\alpha_f} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{R}{4\lambda} \right); \quad (4)$$

$$q = \frac{Q_R}{F}, \quad (5)$$

где Q – тепловая мощность реактора; G_f – массовый расход воды в первом контуре установки при естественной циркуляции; t_{f1} и t_{f2} – соответственно средние значения температуры воды первого контура (теплоносителя) перед АЗ и за АЗ; H_{a3} – высота АЗ; h_{ty} – высота тягового участка первого контура установки; h_{to1} – высота теплообменной поверхности первого контура; F_{np} – площадь проходного сечения кольцевого канала внутри АЗ (приведенная площадь); ξ_{Σ} – суммарный приведенный коэффициент сопротивления первого контура; $\bar{t}_c$ – средняя температура внутренней поверхности кольцевого канала внутри АЗ; q – среднее значение плотности потока тепла на внутренней поверхности; α_f – коэффициент теплоотдачи от поверхности внутреннего модуля АЗ к воде первого контура; $\delta_{ст}$ – толщина стенки внутреннего модуля АЗ; $\lambda_{ст}$ – коэффициент теплопроводности стенки внутреннего модуля АЗ; F – площадь боковой поверхности внутреннего модуля АЗ на высоте АЗ; R – радиус внутреннего модуля АЗ; $\bar{t}_R$ – средняя температура внутреннего модуля АЗ; Q_R – тепловая мощность внутреннего модуля АЗ; c_f , ρ_f , β_f – соответственно удельная теплоемкость, плотность, коэффициент термического расширения, взятые для средней температуры воды первого контура.

Значение $t_{f2} = 100^\circ\text{C}$ выбиралось из условий эксплуатации установки (недопустимо объемное кипение на тяговом участке), а значение t_{f1} рассчитывалось по Δt_f .

Суммарный приведенный коэффициент сопротивления первого контура определялся по формуле

$$\xi_{\Sigma} = \sum_i \xi_i \left(\frac{F_{np}}{F_i} \right)^2 + \sum_k \lambda_k \frac{l_k}{d_{гк}} \left(\frac{F_{np}}{F_k} \right)^2; \quad (6)$$

где ξ_i – коэффициент i -го местного сопротивления; F_i – площадь проходного сечения первого контура, по которой определялось значение i -го местного сопротивления; λ_k – коэффициент трения на k -ом участке первого контура; l_k , $d_{гк}$, F_k – соответственно длина, гидравлический диаметр, площадь проходного сечения k -го участка первого контура.

Рассматриваемая система уравнений дополнялась уравнениями теплового баланса для расчета массового расхода воды во втором контуре G и контуре потребителя G_0 , необходимыми для обеспечения заданного температурного режима в контуре потребителя (температура воды на входе контура – 80°C , на выходе – 50°C), а также уравнениями теплопередачи для расчета площади поверхности теплообменников:

$$G_f c_f (t_{f2} - t_{f1}) = G c (t_2 - t_1); \quad (7)$$

$$G_f c_f (t_{f2} - t_{f1}) = G_0 c_{f0} (t_{02} - t_{01}); \quad (8)$$

$$G_f c_f (t_{f2} - t_{f1}) = \frac{F_{\text{т01}}}{\frac{1}{\alpha_{f\text{т0}}} + \frac{\delta_{\text{т0}}}{\lambda_{\text{т0}}} + \frac{1}{\alpha_f}} \frac{(t_{f1} - t_1) - (t_{f2} - t_2)}{\ln \frac{t_{f1} - t_1}{t_{f2} - t_2}}; \quad (9)$$

$$G_f c_f (t_{f2} - t_{f1}) = \frac{F_{\text{т02}}}{\frac{1}{\alpha_{f\text{т0}}} + \frac{\delta_{\text{т0}}}{\lambda_{\text{т0}}} + \frac{1}{\alpha_{f0}}} \frac{(t_1 - t_{01}) - (t_2 - t_{02})}{\ln \frac{t_1 - t_{01}}{t_2 - t_{02}}}, \quad (10)$$

где t_1, t_2 – соответственно температура воды на выходе и входе второго контура; t_{01}, t_{02} – температура воды на выходе и входе контура потребителя; c, c_f – удельные теплоемкости воды второго контура и контура потребителя; $\alpha_{f\text{т}}, \alpha_{f\text{т0}}$ – коэффициенты теплоотдачи в межтрубном пространстве теплообменников второго контура и контура потребителя; $\delta_{\text{т0}}$ – толщина стенки трубки теплообменников; $\lambda_{\text{т0}}$ – коэффициент теплопроводности материала трубок; α_f, α_{f0} – коэффициенты теплоотдачи в трубках теплообменников второго контура и контура потребителя; $F_{\text{т01}}$ и $F_{\text{т02}}$ – площади поверхности теплообмена второго контура и контура потребителя.

Коэффициент теплоотдачи от поверхности внутреннего модуля АЗ к воде первого контура в кольцевом внутреннем канале АЗ оценивался по формуле для воды, не догретой до температуры кипения [5]:

$$\alpha_f = \frac{\lambda_f}{d_r} \frac{\text{Nu}'_1}{1 + \frac{q_2}{q_1} \theta_1 \text{Nu}'_1}, \quad (11)$$

где λ_f – коэффициент теплопроводности воды в канале; d_r – гидравлический диаметр канала; Nu'_1 – число Нуссельта для одностороннего обогрева канала; θ_1 – коэффициент, определяемый по формуле

$$\theta_1 = 22 \frac{0,27 \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^2 - 1}{\text{Re}_f^{0,87} \text{Pr}_f^{1,05}}, \quad (12)$$

где d_1, d_2 – соответственно внутренний и внешний диаметры кольцевого канала; Re_f – число Рейнольдса для воды в канале; Pr_f – число Прандтля для воды в канале.

Число Нуссельта для одностороннего обогрева внутреннего канала АЗ:

$$\text{Nu}'_1 = \text{Nu}_0 \left(1 - \frac{0,45}{\text{Pr}_f + 2,4} \right) \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^n, \quad (13)$$

где Nu_0 – число Нуссельта, рассчитываемое по формулам для круглой трубы с гидравлическим диаметром кольцевого зазора $d_r = d_2 - d_1$ [5]; n – показатель степени,

определяемый по формуле $n = \frac{0,16}{\text{Pr}_f^{0,15}}$.

Массовые расходы теплоносителя по кольцевым каналам внутри и снаружи (ширина канала – 9 мм) АЗ определялись из уравнений

$$G_f = G_1 + G_2; \quad (14)$$

$$G_2 = \sqrt{\frac{B_1}{B_2}} G_1, \quad (15)$$

где B_1, B_2 – коэффициенты, определяемые гидравлическими сопротивлениями параллельных каналов;

$$B_1 = \lambda_1 \frac{H_{a3}}{d_{r1}} \frac{v_1}{f_1^2}; \quad (16)$$

$$B_2 = \lambda_2 \frac{H_{a3}}{d_{r2}} \frac{v_2}{f_2^2}, \quad (17)$$

λ_1, λ_2 – соответственно коэффициенты сопротивления трению в каналах внутри и снаружи АЗ; d_{r1}, d_{r2} – гидравлические диаметры каналов внутри и снаружи АЗ; f_1, f_2 – площади проходного сечения в каналах внутри и снаружи АЗ; v_1, v_2 – удельные объемы теплоносителя в каналах внутри и снаружи АЗ.

Из уравнений (14), (15) следует соотношение для расчета G_1 :

$$G_1 = \frac{G_f}{1 + \sqrt{\frac{B_1}{B_2}}}. \quad (18)$$

Выражения (16), (17) учитывают только сопротивление трения вышеуказанных каналов. В проектировочном расчете гидравлические сопротивления каналов, связанные с ускорением потоков, не рассматривались, т.к. потоки в каналах принимались однофазными; гидростатические сопротивления каналов принимались одинаковыми.

Рассматриваемая система уравнений дополнялась соотношением для определения критической плотности потока тепла во внутреннем кольцевом канале охлаждения АЗ.

Для выбранных значений положения и ширины (25 мм) кольцевого канала охлаждения внутри АЗ тепловые мощности во внутреннем и внешнем модулях АЗ равны соответственно 251 и 749 кВт.

На рисунках 6–8 показаны радиальные и аксиальные распределения температуры для реактора в начале кампании при мощности 1 МВт. Распределения температуры во внутреннем модуле АЗ получены на основании решения одномерного уравнения теплопроводности с учетом граничных условий на внешней поверхности стенки модуля. Из рисунков видно, что температура замедлителя реактора не превышает 290°C. Различие в распределении температуры по радиусу среднего по высоте сечения внутреннего модуля АЗ, показанном на рис. 6, и аналогичном распределении, приведенном в [2], обусловлено различными значениями диаметра и тепловой мощности модуля АЗ. Диаметр внутреннего модуля АЗ – 0.143 м, тепловая мощность – 251 кВт, в то время как в [2] приведено распределение температуры для значений соответственно 0.133 м, 255 кВт.

Согласно результатам проектировочного теплогидравлического расчета, массовые расходы теплоносителя по кольцевым каналам внутри и снаружи АЗ равны соответственно 6.7 и 3.9 кг/с. Подогревы теплоносителя в каналах – соответственно 23,5 и 20,5°C.

Расчет температуры внутренней поверхности кольцевого канала внутри АЗ в его среднем сечении t_c проводился по формулам (3), (11). В качестве q в формуле (3) принималось максимальное значение плотности потока тепла на поверхности $q_{1\max} = 353 \text{ кВт/м}^2$. Расчетное значение t_c составляет 241°C при $\alpha_f = 2,32 \times 10^3 \text{ Вт/(м}^2 \times \text{К)}$.

Полученный результат показывает, что следует ожидать закипания воды на поверхности канала (поверхностное кипение).

При кипении воды на стенке внутреннего кольцевого канала АЗ при малом значении средней массовой скорости (274 кг/(м²×с)) коэффициент теплоотдачи можно рассчитать с помощью соотношения [5]

$$\alpha_f = 4,34q^{0,7} (p^{0,14} + 0,0135p^2), \quad (19)$$

где q выражено в Вт/м²; давление воды в канале p – в МПа; α_f – в Вт/(м²×К). Для рассматриваемого канала значение α_f , полученное с помощью формулы (19) для $q_{1\text{макс}} = 353$ кВт/м² и $p = 0,14$ МПа, составляет $2,52 \times 10^4$ Вт/(м²×К). Расчетное значение t_c в среднем по высоте сечении канала 103°C меньше температуры насыщения ($t_s = 109^\circ\text{C}$) при давлении воды в канале.

Результаты расчета t_c , полученные с помощью различных формул для определения α_f , указывают на возможную гидродинамическую неустойчивость во внутреннем кольцевом канале АЗ.

Радиальные распределения температуры внутри твэлов, находящихся во внутреннем блоке АЗ, показаны на рис. 9: верхняя кривая – для твэлов с максимальной мощностью, нижняя кривая – для твэлов со средней мощностью.

При проведении одномерного расчета принималось, что величина гелиевого зазора между замедлителем и твэлом составляет 0,5 мм. Твэлы с максимальной мощностью расположены вблизи внутреннего кольцевого зазора, где температура матрицы замедлителя самая низкая, около 170°C (рис. 6), а твэлы со средней мощностью расположены на радиусе около 12 см, где температура матрицы замедлителя – примерно 200°C. Результаты проекторочного расчета показывают, что температура топлива в твэле, имеющем максимальную тепловую мощность, не превышает 530°C.

Различия в распределениях температуры для твэлов со средней и максимальной мощностью, показанных на рис. 9, и аналогичных распределениях, приведенных в [2], обусловлены различными значениями тепловой мощности внутреннего модуля АЗ и коэффициента неравномерности тепловыделения по радиусу модуля. Кроме того, согласно [2], твэлы со средней мощностью расположены на радиусе около 8 см, что отличается от значения 12 см, указанного в настоящей статье.

Значения коэффициентов теплоотдачи в межтрубном пространстве и трубках теплообменника оценивались по формулам [6]

$$\alpha_{f1} = 0,29 \text{Re}_{f2}^{0,6} \text{Pr}_{f2}^{0,33} \frac{\lambda_{f2}}{d_n}; \quad (20)$$

$$\alpha_f = 0,023 \text{Re}_{f1}^{0,8} \text{Pr}_{f1}^{0,43} \frac{\lambda_{f1}}{d_b}, \quad (21)$$

где Re_{f1} , Re_{f2} – числа Рейнольдса для воды в трубках и межтрубном пространстве теплообменника; Pr_{f1} , Pr_{f2} – числа Прандтля для воды в трубках и межтрубном пространстве теплообменника; λ_{f1} , λ_{f2} – коэффициенты теплопроводности воды в трубках и межтрубном пространстве теплообменника; d_b , d_n – внутренний и наружный диаметры трубки теплообменника.

ПОВЕРОЧНЫЙ РАСЧЕТ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕАКТОРА «МАСТЕР»

Моделирование первого контура реакторной установки МАСТЕР и его теплообменной поверхности для проведения поверочного расчета выполнялось с использованием кода КАНАЛ.

Принятая концепция трехконтурной схемы с высокотеплопроводной матрицей замедлителя и отражателей АЗ приводит к значительному времени их прогрева, что требует длительных расчетных времен установления при нестационарных расчетах, применяемых для теплогидравлического обоснования установки. Для расчета номинального режима работы в качестве исходных данных использовалось

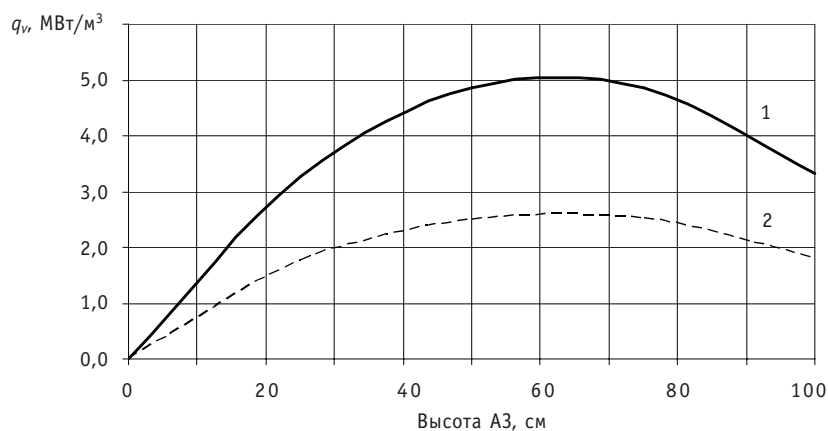


Рис. 5. Распределение тепловыделения по высоте АЗ, принятое в поверочном теплогидравлическом расчете: 1 – внутренний модуль АЗ; 2 – внешний модуль АЗ

полученное при трехмерном нейтронно-физическом расчете распределение тепловыделения по радиусу и высоте внутреннего и внешнего модулей АЗ.

На рисунке 5 приведено распределение тепловыделения по высоте АЗ, принятое в поверочном теплогидравлическом расчете.

В качестве исходных данных использовались также температуры, расходы, давления воды первого и второго контуров, полученные при обосновании установки в проектировочном расчете.

Целью поверочного расчета является оценка влияния пространственных эффектов на полученные ранее результаты проектировочного теплогидравлического расчета.

Расчет выполнялся в два этапа: сначала была разработана нодализационная схема теплообменной поверхности первого – второго контуров, доказана возможность теплосъема заданной мощности. Затем разработана нодализационная схема контура циркуляции при заданных конструкционных материалах и геометрии, поле тепловыделения в АЗ.

При выполнении одномерного и трехмерного (двумерного) расчетов в коде КАНАЛ используется модель нестационарной гидродинамики и теплообмена в двухфазном неравновесном течении пароводяной среды. Указанная модель применяется совместно с трехмерной моделью нестационарной теплопроводности в АЗ и конструкционных материалах реактора и представляет собой следующую систему дифференциальных уравнений в частных производных:

- общее уравнение сохранения энергии;
- уравнение сохранения энергии для паровой фазы;
- уравнение неразрывности для жидкой фазы;
- уравнение неразрывности для паровой фазы;
- уравнение сохранения импульса для жидкой фазы;
- уравнение сохранения импульса для паровой фазы.

Поверочный расчет с помощью кода КАНАЛ позволяет определить распределение объемного паросодержания и плотности теплоносителя при его кипении на стенках кольцевых каналов внутри и снаружи АЗ. Распределение плотности теплоносителя определяет расход теплоносителя при естественной циркуляции и позволяет более точно оценить коэффициент реактивности по температуре теплоносителя.

Разработана нодализационная схема всего первого контура установки, включая каналы активной зоны, тяговую трубу, теплообменник и опускающую кольцевую щель в двухмерной постановке.

Рассмотрено влияние давления в компенсаторе объема первого контура на параметры естественной циркуляции, среднюю скорость воды в тяговой трубе, температуру воды первого контура на выходе теплообменника и на выходе АЗ.

При давлении в компенсаторе объема 1,2 бар получен устойчивый расчетный режим работы установки без запаривания верхней части корпуса реактора. Однако при указанном давлении в верхней части корпуса наблюдались возникновение и исчезновение паровых объемов. При давлении 1,3 бар колебания величин истинного объемного паросодержания в вышеуказанной расчетной области отсутствовали. Выполнены варианты расчетов при различных давлениях в компенсаторе объема первого контура в диапазоне от 1 до 2 бар. Расчеты показали, что в рассмотренном диапазоне давлений наблюдался режим поверхностного кипения теплоносителя в кольцевых каналах АЗ. При давлении в компенсаторе объема 1,3 бар среднее значение объемного паросодержания на выходе канала внутри АЗ составляет примерно 14% на выходе АЗ.

Сравнение результатов проекторочного и поверочного расчетов представлено в табл. 2 и на рис. 6–8. Поверочный расчет теплогидравлических характеристик реакторной установки МАСТЕР дает существенно большее (в 1,4 раза) значение расхода теплоносителя по сравнению с проекторочным расчетом. Это связано с тем, что в поверочном расчете расход теплоносителя в каналах АЗ при его естественной циркуляции определялся с учетом изменения плотности воды при ее кипении на стенках каналов. Такой результат требует проверки возможности уменьшения высоты тягового участка при сохранении мощности реактора. Отличие в значениях расхода определяет различие распределений средней температуры воды в кольцевом

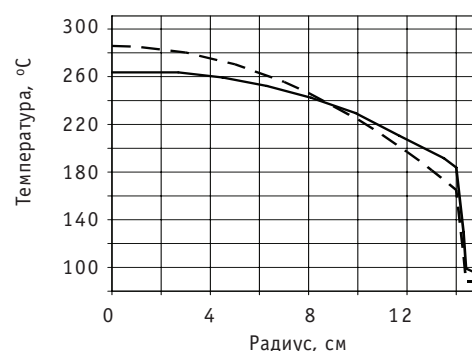


Рис. 6. Распределение температуры по радиусу среднего по высоте сечения внутреннего модуля АЗ: — — — проекторочный расчет; — — — поверочный расчет

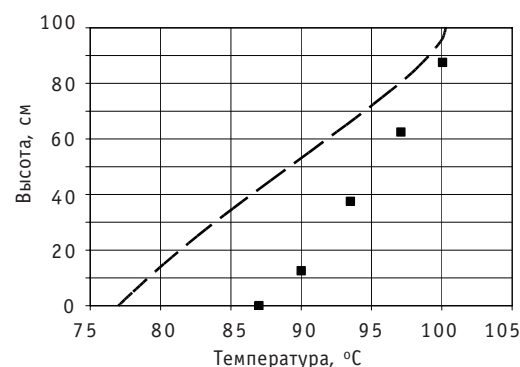


Рис. 7. Распределение средней температуры воды во внутреннем кольцевом канале по высоте АЗ реактора: — — — проекторочный расчет; ■ — поверочный расчет

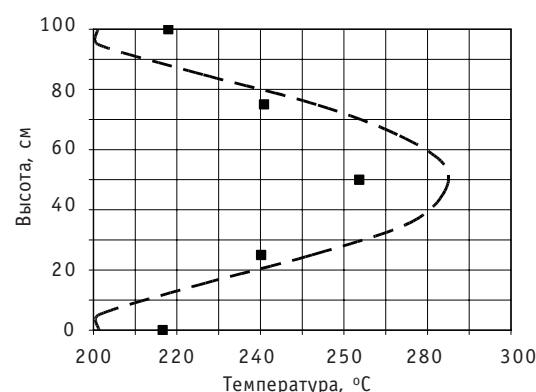


Рис. 8. Распределение температуры замедлителя вдоль оси внутреннего модуля АЗ реактора: — — — проекторочный расчет; ■ — поверочный расчет

Таблица 2

Параметр	Значение	
	Проектировочный расчет	Поверочный расчет
Средняя температура теплоносителя первого контура на входе АЗ, °С	77,5	87
Средняя температура теплоносителя первого контура на выходе АЗ, °С	100	103
Давление в компенсаторе объема, бар	1	1,3
Минимальный запас до кризиса теплообмена	5,55	5,16
Расход воды первого контура (теплоносителя), кг/с	10,6	14,8
Тепловая мощность, отдаваемая во внутренний кольцевой канал от внутреннего модуля АЗ, кВт	251	251
Тепловая мощность, отдаваемая во внутренний кольцевой канал от внешнего модуля АЗ, кВт	408	334
Тепловая мощность, отдаваемая во внешний кольцевой канал, кВт	341	415

канале внутри АЗ, представленных на рис. 7. Различие распределений температуры замедлителя внутреннего модуля АЗ (рис. 6, 8) связано с разными значениями расхода теплоносителя в канале внутри АЗ, а также с учетом пространственных эффектов при выполнении двухмерного поверочного расчета.

Проектировочный расчет теплообменника первого контура, определяющий значения температуры теплоносителя на входе и выходе АЗ реактора, проводился по формулам (8), (9) в рамках точечной модели. Двумерный поверочный расчет выбранного теплообменника в рамках двумерного расчета всего первого контура

установки позволил определить эффективность выбранного теплообменника для отвода тепла, выделяемого в АЗ. Использование теплообменника, показанного на рис. 4, позволило получить расчетное значение температуры на выходе АЗ (103°С), приведенное в табл. 2, которое определило необходимое давление в компенсаторе объема 1,3 бар. На рисунке 10 представлены результаты поверочного двухмерного расчета теплообменника первого контура. На горизонтальной оси графика указаны номера трубок по радиусу теплообменника; столбцы – результаты расчета тепловой мощности шести трубок по выбранной модели с учетом неравномерности значения коэффициента теплоотдачи, вызванной неоднородным профилем скорости при обтекании трубок. Последний столбец показывает суммарную мощность теплообменника. В данном решении не учитывалась коллекторная неравномерность рас-



Рис. 9. Распределение температуры по радиусу твэлов во внутреннем модуле АЗ (проектировочный расчет): 1 – твэл с максимальной тепловой мощностью; 2 – твэл со средней тепловой мощностью

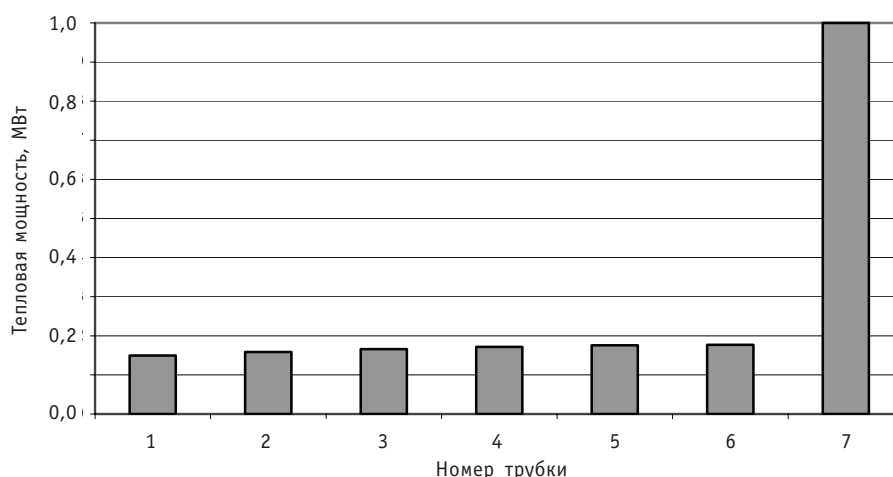


Рис. 10. Распределение тепловой мощности по трубкам теплообменника первого контура

пределения расходов воды в трубках. Расходы воды в трубках принимались одинаковыми и равными 1,283 кг/с, температура воды на входе в трубки – 59°C.

Максимальная разность значений тепловой мощности трубок составляет 18% тепловой мощности первой трубки. Распределение мощности по трубкам теплообменника первого контура (рис. 10) дает практически равномерное радиальное распределение температуры теплоносителя в расчетных ячейках на выходе теплообменника (разность расчетных значений температуры теплоносителя в указанных ячейках составляет не более 2°C).

Таким образом, поверочный расчет позволил получить значение расхода теплоносителя первого контура, в 1,4 раза большее, чем в проектировочном расчете, что привело к уменьшению расчетного подогрева теплоносителя в АЗ и увеличению расчетной средней температуры теплоносителя в АЗ. При этом максимальное значение температуры замедлителя АЗ в соответствии с результатами поверочного расчета на 22°C меньше, чем аналогичное значение из проектировочного расчета. Такой результат подтверждает, что температуры замедлителя и топлива в АЗ реактора не превысят своих предельно допустимых значений. Несколько большее значение температуры воды на выходе АЗ, полученное в поверочном расчете, (103°C по сравнению со 100°C – в проектировочном расчете), потребует увеличения давления в компенсаторе объема с 1 бар до 1,3 бар для того, чтобы не допустить кипения воды в верхней части корпуса реактора.

Расчет показал, что выбор расчетной сетки в области теплообменника и канала внутри АЗ реактора существенно влияет на результаты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны методика проектировочного и двухмерная нестационарная методика поверочного расчетов для описания процессов гидродинамики и сопряженного теплообмена в первом контуре реакторной установки МАСТЕР.

Выполненные расчеты (проектировочный и поверочный) для установки тепловой мощностью 1 МВт показали, что она при работе в номинальном режиме удовлетворяет основным техническим требованиям.

Для полученного в поверочном расчете значения расхода теплоносителя первого контура (в 1,4 раза большее по сравнению с результатом проектировочного расчета) требуется проверка возможности уменьшения высоты тягового участка, а значит, и высоты корпуса реактора при сохранении мощности реактора.

Согласно результатам поверочного расчета, минимальное давление в компенсаторе объема для устойчивого режима работы установки составляет 1,3 бар.

Литература

1. Казанский Ю.А., Левченко В.А., Матусевич Е.С., Юрьев Ю.С. и др. Саморегулируемый реактор сверхмалой мощности для теплоснабжения – МАСТЕР ИАТЭ//Известия вузов. Ядерная энергетика. 2003. – № 3. – С. 63.
2. Казанский Ю.А., Левченко В.А., Юрьев Ю.С., Баршевцев В.А. и др. Некоторые нейтронно-физические и теплогидравлические характеристики усовершенствованной конструкции реактора МАСТЕР//Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2008. – № 1. – С. 41.
3. Кузнецов Ю.Н., Роменков А.Л., Келин Г.Е. Теплофикация на базе атомных энергоисточников/Международный семинар «Малая энергетика. Итоги и перспективы». – М.: Минатом РФ, 2001.
4. Кривицкий И.С. Малая атомная энергетика и проблемы атомной теплофизики/«Малая энергетика-2004». – М.: ААЭ РФ, 2004.
5. Кириллов П.Л., Бобков В.П., Жуков А.В., Юрьев Ю.С. Справочник по теплогидравлическим расчетам в ядерной энергетике. Том 1. – М.: ИздАт, 2010. – 776 с.
6. Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П. Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, прогенераторы). – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 360 с.

Поступила в редакцию 2.05.2012