

УДК 532.546, 621.039

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ И НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ СБОРОК ДЛЯ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК МАЛОЙ МОЩНОСТИ

*Ю.В. Сморчкова, Е.А. Авдонина, А.В. Дедов

Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия

ORCID*: <https://orcid.org/0000-0002-0989-1212>, SmorchkovaYV@mpei.ru

Резюме: В работе представлены результаты численного исследования гидродинамики и температурного поля в модели тепловыделяющей сборки для реакторной установки КЛТ-40С при переходе к топливу, состоящему из микротвэлов. Предложена оптимальная, с позиции гидродинамики и теплообмена, конструкция модели тепловыделяющей сборки с микротвэлами для реакторной установки КЛТ-40С, которая по габаритным размерам полностью соответствует традиционной сборке со стрежневыми тепловыделяющими элементами. Определены оптимальные параметры перфорации чехлов, удерживающих засыпку микротвэлов. Представлены результаты оценки нейтронно-физических характеристик. Показана работоспособность реакторной установки КЛТ-40С при использовании топлива из микротвэлов.

Ключевые слова: гидродинамика, температурное поле, микротвэлы, тепловыделяющая сборка, шаровая засыпка, численное моделирование.

Благодарности: Работа выполнена при поддержке гранта Правительства Российской Федерации № 14.з50.31.0042.

DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-7-8-23-34

INVESTIGATION OF THERMOHYDRAULIC AND NEUTRON-PHYSICAL CHARACTERISTICS OF PERSPECTIVE FUEL ASSEMBLY FOR LOW-POWER REACTOR FACILITY

Yu.V. Smorchkova, E.A. Avdonina, A.V. Dedov

National Research University “MPEI”, Moscow, Russia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0989-1212>, SmorchkovaYV@mpei.ru

Abstract: The paper presents the results of a numerical study of hydrodynamics and a temperature field in the model of the fuel assembly for the KLT-40S reactor installation in the transition to a fuel consisting of spherical microfuels. The optimal design of a model of a fuel assembly with microfuels for a reactor installation KLT-40S is proposed, from the position of hydrodynamics and heat transfer. The fuel assembly by external dimensions completely corresponds to the traditional assembly with rod fuel elements. The optimal parameters of the perforation of the covers that retain the pebble bed of microfuels are determined. The results of the evaluation of neutron-physical characteristics are presented. The working capacity of the KLT-40S reactor installation is shown when using fuel from microfuel elements.

Keywords: *hydrodynamics, temperature field, microfuels, fuel assembly, pebble bed, numerical simulation.*

Acknowledgments: *The work is supported Grant of the Government of the Russian Federation № 14.z50.31.0042.*

Введение

Самой актуальной проблемой современной ядерной энергетики является повышение безопасности. Все возрастающие требования к системам безопасности приводят к увеличению стоимости станций. Достаточно давно было предложено решение, принципиально увеличивающее безопасность эксплуатации ядерных реакторов [1]. Таким решением является использование тепловыделяющих сборок с микротвэлами (ТВС МТ). Концепция ТВС МТ для реакторов ВВЭР была предложена в работе [1]. В начале 2000-х годов были начаты экспериментальные и расчетно-теоретические исследования теплогидравлических и нейтронно-физических параметров таких сборок, но, к сожалению, эти исследования не были завершены.

В настоящее время возрастает интерес к малой ядерной энергетике. В России этот интерес прежде всего связан с необходимостью освоения отдаленных регионов. Кроме этого, использование атомных станций малой мощности (АСММ) позволит решить задачи, связанные с повышением энергетической безопасности ответственных объектов, таких как промышленные объекты с непрерывным производством, объекты городской инфраструктуры и т.д., обеспечивающие жизненно важные потребности города [2–4]. В настоящее время как в России, так и за рубежом проводятся исследования и разрабатываются проекты ядерных реакторов для АСММ [5–7].

Однако для широкого распространения станций малой мощности чрезвычайно важно обеспечить надежную радиационную безопасность в случае возникновения аварий. В этой связи высокая температурная стойкость, высокая герметичность и хорошее удержание продуктов деления внутри микротвэла вплоть до температур около 1600°C имеют особую значимость. Для обоснования работы реакторных установок с шаровыми микротвэлами необходимо проводить экспериментальные и численные исследования течения и теплообмена в шаровых засыпках при объемном тепловыделении. Результаты экспериментальных исследований гидродинамики и теплообмена при осевом течении теплоносителя через шаровые засыпки представлены в литературе, например [8; 9]. Экспериментальные данные при радиальном течении теплоносителя через шаровые засыпки с объемным тепловыделением в литературе отсутствуют.

Решение теплогидравлической задачи при течении в микротвэльной засыпке с неоднородным по длине сечением и объемном выделении энергии, исследование влияния раздаточного и сборного коллекторов не является тривиальным. Поэтому на этапе поиска наилучших конструктивных решений численное моделирование, по-видимому, является самым оптимальным методом.

В работе представлены результаты численного исследования теплогидравлических характеристик модели ТВС МТ для реакторной установки КЛТ-40С (РУ КЛТ-40С) при переходе к микротвэльным топливным элементам. Проведена оценка нейтронно-физических характеристик. КЛТ-40С представляет собой реакторную установку тепловой мощностью 150 МВт с водо-водяным реактором корпусного типа и кассетной активной зоной, разработанную в ОКБМ имени И. И. Африкантова [5].

Постановка задачи

Схема моделируемой ТВС МТ для реакторной установки КЛТ-40С показана на рис. 1. Сборка является осесимметричной, шаровая засыпка 3 размещается между внутренним 2 и внешним 4 перфорированными чехлами. Теплоноситель в такой

конструкции подается в раздаточный коллектор 1, омывает шаровую засыпку и попадает в сборный коллектор 5. В конструкции ТВС МТ КЛТ-40С раздаточный коллектор образован внутренним перфорированным чехлом и цилиндрическим поглощающим элементом 6.

При выборе конструкции тепловыделяющей сборки с микротвэлами для реакторной установки КЛТ-40С учитывались следующие особенности:

- подобие конструкции моделируемой тепловыделяющей сборки ТВС МТ КЛТ-40С и ТВС МТ ВВЭР [1];
- необходимость организации продольно-поперечного движения теплоносителя относительно слоя микротвэлов с приемлемым гидравлическим сопротивлением;
- соответствие габаритных размеров модели ТВС МТ и стержневой ТВС КЛТ-40С.

При этом были приняты упрощения:

- форма наружного перфорированного чехла ТВС – усеченной шестигранной пирамиды – заменяется осесимметричной в виде усеченного конуса с сохранением величины боковой поверхности этого чехла (поверхности трения) и площади проходного сечения сборного коллектора;

- не учитывается наличие стержней СУЗ в шаровой засыпке.

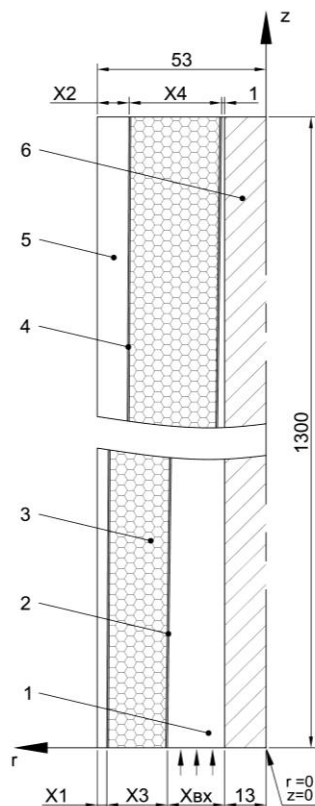


Рис. 1. Схема модели ТВС МТ для РУ КЛТ-40С. X1, X2, X3, X4, Xвх – варьируемые параметры

Основные теплогидравлические и геометрические параметры модели тепловыделяющей сборки приведены в табл. 1.

Основные параметры модели ТВС МТ для РУ КЛТ-40С

Наименование	Величина
Давление в первом контуре, МПа	12,7
Температура воды на входе в ТВС, °С	280
Температура воды на входе из ТВС, °С	317
Тепловая мощность, МВт	150
Расход теплоносителя, кг/с	6
Диаметр микротвэлов, мм	2,0
Высота ТВС, мм	1300
Размер под ключ, мм	97
Пористость засыпки микротвэлов	0,38
Материал чехлов	сталь нержавеющей 0X18Н10Т

Численное моделирование проводилось с использованием компьютерного кода *ANSYS Fluent*. Математическая модель кода состоит из уравнений движения, неразрывности и энергии, а также включает в себя дополнительные уравнения стандартной k - ε модели турбулентности. Решение задачи проводилось в осесимметричной постановке. Для описания гидродинамики и теплообмена в ТВС МТ используется подход, основанный на модели пористой среды с внутренними источниками тепла. При этом шаровая засыпка, а также перфорированные чехлы, рассматриваются как распределенное в потоке дополнительное сопротивление, оказываемое движению жидкости. В уравнение движения вводится дополнительный источниковый член S_i , задаваемый пользователем. Выражение для S_i в *ANSYS Fluent* принимает вид:

$$S_i = - \left(\alpha_i \mu U_{\phi i} + \beta_i \frac{\rho U_{\phi i}^2}{2} \right),$$

где α_i, β_i – коэффициенты вязкостного и инерционного сопротивления пористой среды в направлении координатной оси i ; $U_{\phi i}$ – скорость фильтрации жидкости.

Вязкостный и инерционный коэффициенты шаровой засыпки определялись из формулы Эргуна со скорректированными константами:

$$\frac{\Delta p}{H} = 245 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\mu U_{\phi}}{d_{\text{ш}}^2} + 1,02 \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \frac{\rho U_{\phi}^2}{d_{\text{ш}}}, \quad (1)$$

где ε – пористость засыпки; $d_{\text{ш}}$ – диаметр шарика; H – высота засыпки.

Константы 245 и 1,02 получены на основе экспериментальных исследований [10], проведенных авторами статьи для уточнения формулы Эргуна. Расчет потерь давления по формуле (1) удовлетворительно согласуется с данными других авторов, например [11]. В предположении изотропности шаровой засыпки, коэффициенты сопротивления принимают вид:

$$\alpha = 245 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{1}{d_{\text{ш}}^2}; \quad \beta = 2,04 \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \frac{1}{d_{\text{ш}}}.$$

Для моделирования тонких перфорированных чехлов в *ANSYS Fluent* рекомендуется использовать модель “*porous jump*”. В документации *ANSYS Fluent* отмечается, что использование такой модели является предпочтительным, т.к. она более надежна. При построении геометрии расчетной области чехлы не указываются как отдельная зона. Потери давления на чехлах учитываются заданием коэффициента инерционного сопротивления

$$\beta = \frac{\xi}{h},$$

где ξ – коэффициент гидравлического сопротивления; h – толщина чехла.

Для наружного перфорированного чехла коэффициент гидравлического сопротивления определяется по данным [12]. Для внутреннего перфорированного чехла при наличии шаровой засыпки коэффициент гидравлического сопротивления определялся на основе собственных экспериментальных данных [10].

Параметры шаровой засыпки, принятые при выполнении численного моделирования, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры шаровой засыпки	
Пористость	0,38
Коэффициент вязкостного сопротивления, м ⁻²	4,28·10 ⁸
Коэффициент инерционного сопротивления, м ⁻¹	11500
Теплопроводность материала оболочки микротвэла (SiC), Вт/(м·К)	23
Теплоемкость SiC, кДж/(кг · К)	1047

Внутреннее тепловыделение также задается источниковым членом, который определяется пользователем. Известно, что тепловыделение в активной зоне ядерного реактора неравномерно по объему. В цилиндрической активной зоне со стержневыми ТВЭлами энерговыделение по высоте активной зоны подчиняется закону

$$q_v(z) = \frac{\pi}{2} \bar{q}_v \cos\left(\pi \frac{z - z_c}{H}\right), \quad (2)$$

где \bar{q}_v – среднее объемное тепловыделение; z_c – координата центра активной зоны; H – высота активной зоны.

При замене стержневых ТВЭЛов на шаровые микротвэлы, с учетом того, что количество микротвэлов изменяется по высоте активной зоны, функция тепловыделения, вероятно, также изменится. В литературе таких данных найти не удалось. Поэтому численные эксперименты были проведены с учетом функции распределения тепловыделения по высоте активной зоны согласно уравнению (2).

Решение системы уравнений, составляющих математическую модель, в *ANSYS Fluent* проводится методом контрольного объема. Для этого была построена сетка контрольных объемов, которая состояла из $4 \cdot 10^5$ элементов прямоугольной формы.

Результаты численного моделирования

Для конструкции тепловыделяющей сборки с микротвэлами, показанной на рис. 1, характерно наличие области в засыпке, где температура теплоносителя превышает температуру на выходе из ТВС. Температура в этой области может превышать температуру насыщения жидкости. Закипание теплоносителя в такой конструкции тепловыделяющей сборки может быть опасно из-за изменения замедляющей способности теплоносителя и высокой вероятности запаривания сборки при развитии процесса кипения. Важно выбрать такое соотношение геометрических размеров сборки, при которых максимальная температура не будет достигать значения температуры насыщения.

При проведении численных экспериментов было исследовано влияние геометрических параметров на потери давления и максимальную температуру в засыпке. Целью исследований являлось определение таких параметров, при которых потери давления и температура будут минимальны. При неизменных внешних габаритах ТВС МТ исследовалось влияние размеров сборного коллектора ($X1$, $X2$), размеров входного отверстия раздаточного коллектора ($Xвх$) и степени перфорации (коэффициента живого сечения f) чехлов, удерживающих засыпку микротвэлов.

На рис. 2, 3 показаны зависимости максимальной температуры и потерь давления в сборке при различных размерах сборного коллектора. При этом $Xвх$ был принят равным 18 мм.

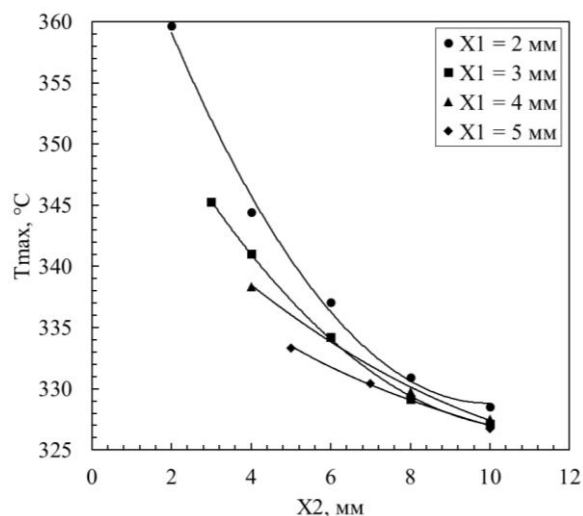


Рис. 2. Зависимость максимальной температуры в засыпке от размеров сборного коллектора

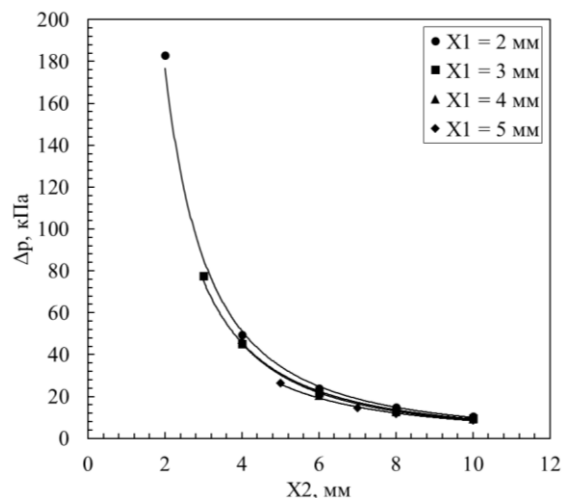


Рис. 3. Зависимость потерь давления от размеров сборного коллектора

На рис. 2 можно видеть, что уменьшение X_1 , приводит к существенному повышению максимальной температуры теплоносителя. Для $X_1 = 3-5$ мм при $X_2 = 10$ мм температура в засыпке минимальна.

На рис. 3 можно видеть, что потери давления слабо зависят от размера нижнего основания сборного коллектора X_1 , но наблюдается сильная зависимость от размера верхнего основания сборного коллектора X_2 . Наименьшие потери давления достигаются при $X_2 = 10$ мм. Значения потерь давления при $X_1 = 3-5$ и $X_2 = 10$ мм практически одинаковы и составляют 9,1 кПа. Следовательно, нижнее основание сборного коллектора может иметь размер от 3 до 5 мм. Представляется наиболее оптимальным выбрать наименьшее значение X_1 , т.к. в этом случае увеличивается ширина зоны, занятой микротрещинами. Таким образом, с точки зрения минимальных потерь давления и минимальной температуры в засыпке размеры сборного коллектора принимаются равными $X_1 = 3$ мм, $X_2 = 10$ мм.

На рис. 4,а показана зависимость максимальной температуры теплоносителя, а на рис. 4,б – потерь давления в сборке от размера входного отверстия раздаточного

коллектора $X_{вх}$. При этом размеры сборного коллектора приняты $X1 = 3$ мм, $X2 = 10$ мм.

На рис. 5 показано, что потери давления уменьшаются с увеличением размера входного отверстия и, следовательно, с увеличением угла конуса раздаточного коллектора. При этом при значении $X_{вх} \geq 18$ мм потери давления практически не изменяются. Максимальная температура также уменьшается с ростом $X_{вх}$. Однако при увеличении размеров раздаточного коллектора уменьшается объем области, занятый микровэлами. Исходя из этих рассуждений, размер входного отверстия раздаточного коллектора принят равным $X_{вх} = 18$ мм.

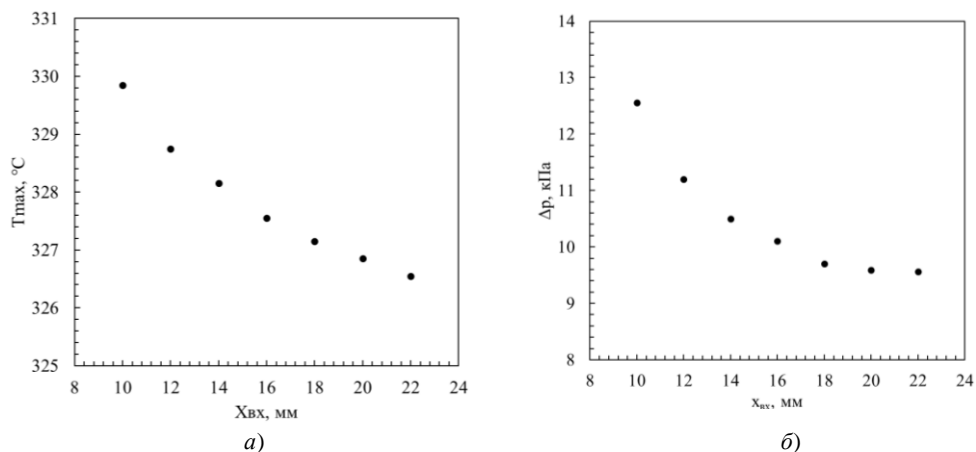


Рис. 4. Зависимость максимальной температуры в засыпке *a)* и потерь давления; *б)* в модели ТВС МТ от размера входного отверстия раздаточного коллектора

На рис. 5, *a)* показана зависимость максимальной температуры, а на рис. 5, *б)* – потеря давления от степени перфорации (коэффициента живого сечения) перфорированных чехлов, удерживающих засыпку микровэлов. Видно, что в рассмотренном диапазоне значений $f = 0,1 - 0,4$ степень перфорации не оказывает существенного влияния на значение максимальной температуры и потери давления. При дальнейших расчетах степень перфорации была принята равной 0,2.

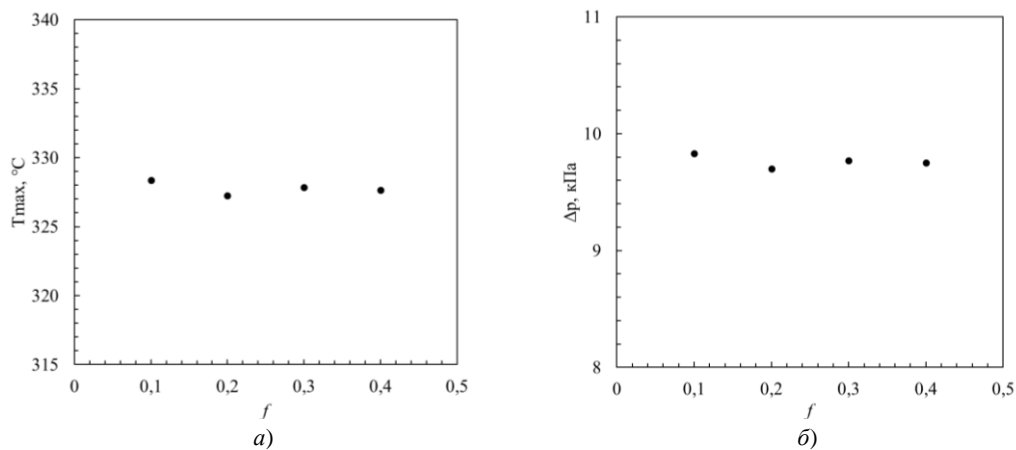


Рис. 5. Зависимость максимальной температуры *a)* и потерь давления *б)* от коэффициента живого сечения перфорированных чехлов

Оптимальные параметры модели тепловыделяющей сборки с микровэлами для РУ

КЛТ-40С, определенные в результате исследования, приведены в табл. 3.

Таблица 3

Параметры модели ТВС МТ для РУ КЛТ-40С				
Геометрические параметры				
Хвх, мм		18		
Х1, мм		3		
Х2, мм		10		
Х3, мм		19		
Х4, мм		29		
Параметры перфорации чехлов				
–	Коэф-т живого сечения f	Толщина чехла h , м	Коэффициент гидравлического сопротивления ξ	Инерционный коэф-т сопротивления β , 1/м
Внутренний чехол	0,2	0,0005	46	92000
Наружный чехол	0,2	0,0005	37	74000

Для модели ТВС МТ с оптимальными геометрическими параметрами на рис. 6 показаны поля температуры, скорости, избыточного давления и линии тока жидкости.

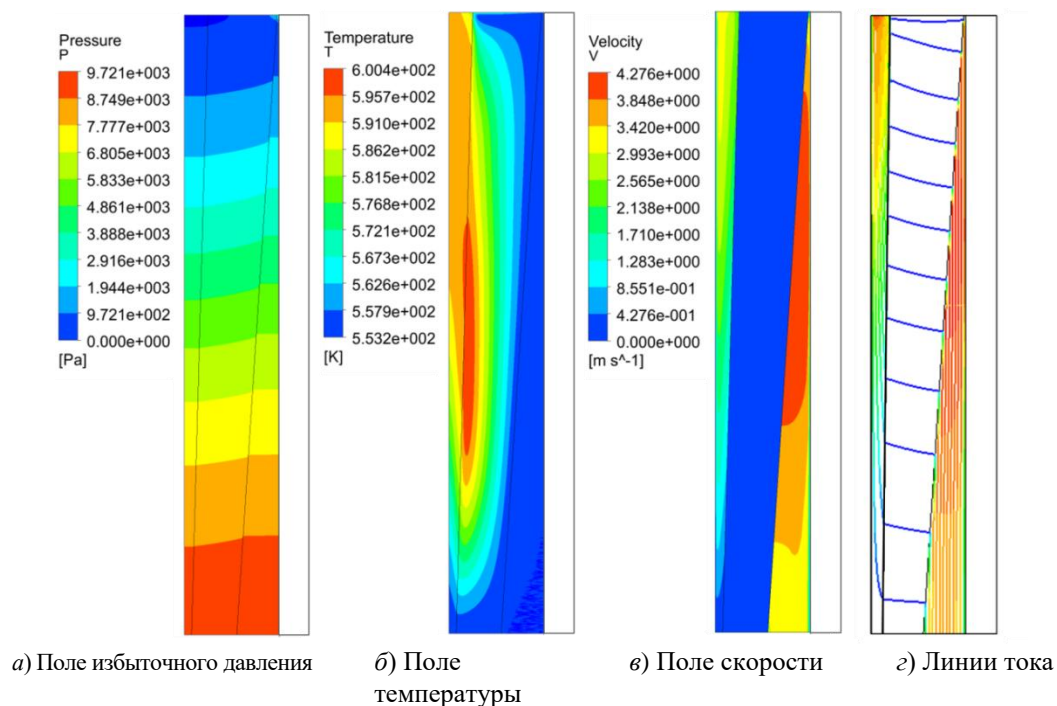


Рис. 6. Результаты численного моделирования

Можно видеть, что перфорированные чехлы практически не оказывают сопротивления движению теплоносителя, в радиальном направлении давление меняется слабо. Потери давления происходят в осевом направлении. На рис. 6,б наблюдается максимум температуры вблизи внешнего перфорированного чехла, что характерно для такой конструкции тепловыделяющей сборки. Течение жидкости (рис. 6,г) приближено к радиальному в области шаровой засыпки, что обеспечивает наименьшие потери давления.

Оценка нейтронно-физических характеристик модели ТВС МТ для КЛТ-40С

Одним из наиболее важных параметров, характеризующих состояние ядерного

реактора, является эффективный коэффициент размножения нейтронов, равный отношению числа нейтронов данного поколения к числу нейтронов предыдущего поколения. Критическое состояние реактора характеризуется значением $k_{эф} = 1$, при этом реактор работает на постоянной мощности. Если $k_{эф} < 1$, то цепная реакция деления затухает и энерговыделение в реакторе практически прекращается. Состояние реактора, когда $k_{эф} > 1$, называется надкритическим, а цепная реакция деления быстро нарастает; для ограничения роста энерговыделения необходимо снижать значение $k_{эф}$ до 1 с помощью элементов, поглощающих нейтроны. Одним из определяющих условий $k_{эф} = 1$ является расчет эффективного коэффициента размножения в бесконечной среде k , т.е. без учета потери нейтронов за счет выхода их за пределы активной зоны реактора. Оценка k для предложенной конструкции тепловыделяющей сборки реакторной установки КЛТ-40С была выполнена в программе *UNK System*, разработанной в РИЦ «Курчатовский институт».

Коэффициент размножения нейтронов k для рассматриваемой конструкции ТВС МТ изменяется по высоте. Для определения зависимости $k(z)$ в программе *UNK System* производился расчет пяти элементарных ячеек, в сечениях по высоте ТВС МТ: при $z = 0; 325; 650; 975$ и 1300 мм. Для расчета коэффициента размножения нейтронов в программе *UNK System* необходимо задать геометрические размеры элементарной ячейки, температуру и ядерные концентрации материалов. Для определения ядерных концентраций в ТВС МТ были выделены следующие зоны (рис. 1): 1, 5 – сборный и раздаточный коллекторы, заполненные водой; 2, 4 – зоны перфорированных чехлов, выполненных из стали 0X18H10T; 3 – зона засыпки микротвэлов, представляющих собой сложную многослойную структуру и окруженных водой; 6 – зона вытеснителя.

В расчетах принято, что сферический микротвэл состоит из четырех концентрических слоев: сердечник из диоксида урана UO_2 , буферный слой пористого пирографита PuC , слой плотного пиролитического углерода PuC , слой карбида кремния SiC .

На рис. 7 показана зависимость эффективного коэффициента размножения нейтронов от времени работы реактора при номинальной мощности $P=150$ МВт и обогащении топлива 17%, характерном для реакторных установок малой мощности [13].

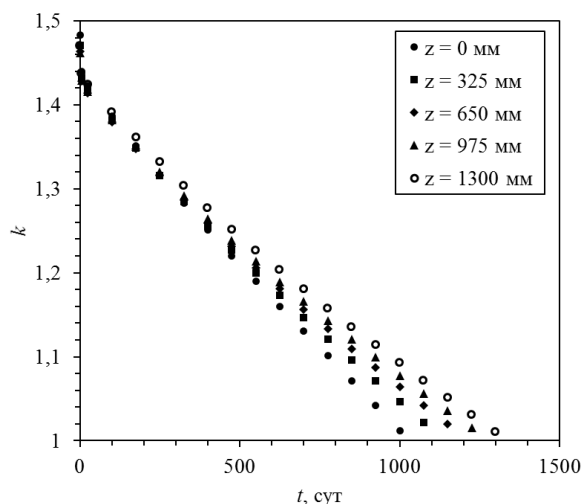


Рис. 7. Зависимость эффективного коэффициента размножения нейтронов от времени работы реактора при $P = 150$ МВт и обогащении 17%

На рис. 7 показано, что k зависит от высоты ТВС МТ. Минимальное значение

коэффициента размножения наблюдается в нижней части сборки при $z = 0$, т.к. в этой части объем топлива минимальный. Поэтому завершение кампании ядерного топлива необходимо определять при $k = 1$ в координате $z = 0$.

На рис. 8 показана зависимость эффективного коэффициента размножения нейтронов от времени работы реактора при номинальной и среднеэксплуатационной мощности.

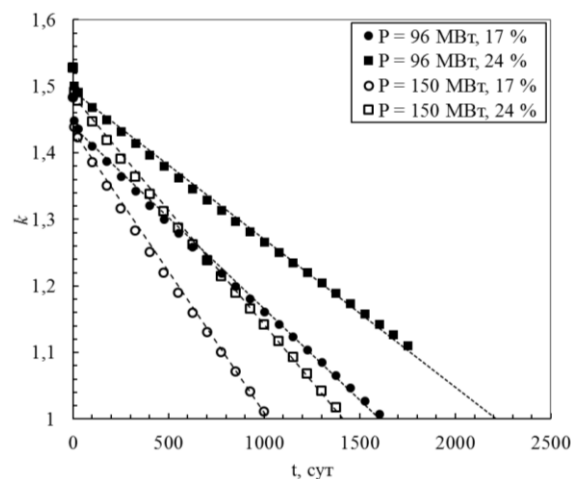


Рис. 8. Зависимость эффективного коэффициента размножения нейтронов от времени работы реактора

При работе реактора на среднеэксплуатационной мощности, равной 96 МВт, и обогащении топлива 17% продолжительность топливной кампании составит 1600 суток, при обогащении топлива 24% – 2200 суток. Для реактора КЛТ-40С со стержневыми тепловыделяющими элементами расчет коэффициента размножения нейтронов представлен в работе [13]. При использовании металлокерамического топлива с обогащением 17% продолжительность топливной кампании при работе реактора на среднеэксплуатационной мощности составляет 2500 суток. При использовании топлива из диоксида урана с обогащением 24% период топливной кампании составляет 5000 суток. Сравнивая значения, можно видеть, что при использовании микротвэлов продолжительность работы реактора сокращается. Однако безопасность реактора с топливом из микротвэлов существенно выше. В активной зоне с микротвэлами не используется цирконий, а следовательно, при возникновении аварии с потерей теплоносителя не может возникнуть парциркулиевая реакция.

Заключение

Проведено численное исследование гидродинамики и температурного поля в модели тепловыделяющей сборки с микротвэлами для реакторной установки КЛТ-40С. Исследовано влияние геометрических размеров сборного и раздаточного коллектора на максимальную температуру теплоносителя и потери давления в тепловыделяющей сборке. Определены оптимальные геометрические размеры и оптимальные параметры перфорации чехлов такой сборки. Однако даже при таких параметрах недогрев теплоносителя до температуры насыщения мал, а значит, может начаться процесс кипения теплоносителя. Для увеличения недогрева необходимо повышать давление в первом контуре реакторной установки.

Выполнена оценка нейтронно-физических характеристик модели ТВС МТ для

КЛТ-40С. Показана работоспособность реакторной установки КЛТ-40С при использовании топлива из микротвэлов и неизменных внешних габаритах по сравнению с традиционной сборкой.

Литература

1. Пономарев-Степной Н.Н., Кухаркин Н.Е., Хрулев А.А., Дегальцев Ю.Г. и др. Перспективы применения микротвэлов в ВВЭР // Атомная энергия. 1999. Т. 86, № 6. С. 443–449.
2. Саркисов А.А. Новое направление развития – ядерная энергетика малой мощности // Атомная энергия. 2011. Т. 111, № 5. С. 243–245.
3. Драгунов Ю.Г., Шишкин В.А., Гречко Г.И., Гольцов Е.Н. Малая ядерная энергетика: задачи и ответы // Атомная энергия. 2011. Т. 111, № 5. С. 294–297.
4. Mark Cooper Small modular reactors and the future of nuclear power in the United States // Energy Research & Social Science. 2014. No. 3. P. 161–177.
5. Сайт ОКБМ им. И.И. Африкантова <http://www.okbm.nnov.ru/reactors#asmm> (15.03.2018).
6. K. Shirvan, M. Kazimi, Superheated Water-Cooled Small Modular Underwater Reactor Concept, Nuclear Engineering and Technology (2016) <http://dx.doi.org/10.1016/j.net.2016.06.003>.
7. Lee K.H., Kim M.G, Lee J.I., Lee P.S. Recent advances in Ocean Nuclear Power Plants // Energies. 2015. Vol. 8. No. 10. P. 11470–11492.
8. Guangzhan Xu, Zhongning Sun, Xianke Meng, Xiaoning Zhang Flow boiling heat transfer in volumetrically heated packed bed // Annals of Nuclear Energy. 2014. No. 73. С. 330–338.
9. Nazari M., Vahid D.J., Saray R.K., Mahmoudi Y. Experimental investigation of heat transfer and second law analysis in a pebble bed channel with internal heat generation // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2017. No. 114. С. 688–702.
10. Yu.V. Smorchkova, A.N. Varava, A.V. Dedov, A.V. Zakharenkov and A.T. Komov The experimental determination of the coefficient of hydraulic resistance of a perforated plate with a layer of balls adjoining to it // Journal of Physics: Conference Series, 2017, Vol. 891, Paper number 012038.
11. Авдеев А.А., Балунев Б.Ф., Рыбин Р.А., Созиев Р.И., Филиппов Г.А. Гидродинамическое сопротивление при течении двухфазной смеси в шаровой засыпке // ТВТ. 2003. Т. 41, 3. С. 432–438.
12. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Машиностроение, 1992. С. 672.
13. Увеличение энергозапаса кассетной активной зоны реактора КЛТ-40С при переходе к топливной композиции на основе диоксида урана. Техническая справка. М.: РНЦ «Курчатовский институт», 2005. 19 с

Авторы публикации

Сморчкова Юлия Владимировна – ассистент кафедры «Общая физика и ядерный синтез» НИУ «МЭИ» (диссертант).

Авдонина Евгения Александровна – студент (магистр) кафедры «Общая физика и ядерный синтез» НИУ «МЭИ».

Дедов Алексей Викторович – чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, заведующий кафедрой «Общая физика и ядерный синтез» НИУ «МЭИ».

References

1. Ponomarev-Stepnoj N.N., Kukharkin N.E., Khrulev A.A., Degol'tsev Yu.G. and etc. Prospects of coated fuel particle application in the wwer reactors // Atomic Energy, T.86, №6, 1999. P. 443–449.

2. Sarkisov A.A New Directions of Development - Small Power Capacity Nuclear Energy // Atomic Energy. 2011. T. 111. № 5. C. 243–245.
3. Dragunov Yu.G., Shishkin V.A., Grechko G.I., Goltsov E.N. Small and Medium-Sized Reactors in the Nuclear Power Industry - Goals and Objectives // Atomic Energy. 2011. T. 111. № 5. C. 294–297.
4. Mark Cooper Small modular reactors and the future of nuclear power in the United States // Energy Research & Social Science 3 (2014) 161–177
5. «Afrikantov OKBM» <http://www.okbm.nnov.ru/reactors#asmm> (15.03.2018)
6. K. Shirvan, M. Kazimi, Superheated Water-Cooled Small Modular Underwater Reactor Concept, Nuclear Engineering and Technology (2016) <http://dx.doi.org/10.1016/j.net.2016.06.003>
7. Lee K.H., Kim M.G, Lee J.I., Lee P.S. Recent advances in Ocean Nuclear Power Plants. // Energies. 2015. Vol. 8. № 10. P. 11470–11492.
8. Guangzhan Xu, Zhongning Sun, Xianke Meng, Xiaoning Zhang Flow boiling heat transfer in volumetrically heated packed bed // Annals of Nuclear Energy. № 73. 2014. P. 330–338.
9. Nazari M., Vahid D.J., Saray R.K., Mahmoudi Y. Experimental investigation of heat transfer and second law analysis in a pebble bed channel with internal heat generation // International Journal of Heat and Mass Transfer. № 114. 2017. C. 688–702.
10. Yu V Smorchkova, A N Varava, A V Dedov, A V Zakharenkov and A T Komov The experimental determination of the coefficient of hydraulic resistance of a perforated plate with a layer of balls adjoining to it // Journal of Physics: Conference Series, 2017, Volume 891, Paper number 012038.
11. Avdeev A.A., Soziev R.I., Filippov G.A., Balunov B.F., Rybin R.A. Hydrodynamic Drag under Conditions of Flow of a Two-Phase Mixture in a Pebble Bed // High Temperature. 2003. V. 41. No 3. P. 377–383
12. Idelchik I.E. Guide of hydraulic resistance. M.: Mashinostroenie, 1992
13. The increase in the energy reserve of the cluster active zone of the KLT-40C reactor during the transition to a fuel composition based on uranium dioxide. Technical Reference. M.: RSC «Kurchatov Institute», 2005. 19 c

Authors of the publication

Yuliya V. Smorchkova – assistant of the Department of General Physics and Nuclear Fusion NRU “MPEI”.

Evgeniya A. Avdonina – student (master) of the Department of General Physics and Nuclear Fusion NRU “MPEI”.

Alex V. Dedov – member corr. RAS, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of General Physics and Nuclear Fusion NRU “MPEI”.

Поступила в редакцию

20 апреля 2018 г.