

КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ ПРОРАБОТКА КОМПАКТНОГО ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ГАЗООХЛАЖДАЕМОГО РЕАКТОРА МАЛОЙ МОЩНОСТИ С КОЛЬЦЕВОЙ АКТИВНОЙ ЗОНОЙ ИЗ МИКРОТВЭЛОВ

Сикорин С.Н., Мандик С.Г. (Научное учреждение «ОИЭЯИ – Сосны»,
Минск, Беларусь), Ахрамович А.П., Колос В.П.
(Институт энергетики НАН Беларуси, Минск, Беларусь)

Введение

В настоящее время в создании реакторов малой мощности (микрореакторов) участвуют ядерные центры практически всего мира. В научном учреждении «ОИЭЯИ-Сосны» разработка таких реакторов для ядерных энергетических установок различного назначения и базирования, в том числе передвижных (транспортабельных) атомных станций малой мощности, началась еще в 60-е годы прошлого века. Наряду с активными зонами со стержневыми ТВЭлами рассматривались насыпные и вихревые активные зоны с шариковыми ТВЭлами малого диаметра (микротвэлами), водяным и газовыми теплоносителями. Информация по некоторым из таких разработок представлена в работах [1–12]. В частности, один из вариантов активной зоны передвижной АЭС «Памир-630Д» базировался на микротвэлах, более детально такой вариант активной зоны был проработан в проекте реактора передвижной АЭС «Памир-2» [3, 4]. Было решено множество теоретических, экспериментальных и технологических задач в обоснование разработки активных зон с микротвэлами.

Инновационное развитие реакторостроения требует постоянного анализа и поиска путей совершенствования физико-математического обеспечения проектирования. При этом необходимо видеть перспективы практического использования компактных реакторов, появившиеся новые технологии и материалы. Создание реакторов 4-го поколения является сложной многоплановой задачей. Научный аспект ее решения требует значительного повышения степени адекватности математического моделирования реальных процессов в активной зоне и разработки теоретических схем сопряженного расчета граничных условий и полей нейтронно-физических и термодинамических параметров в элементах реактора. Следует учесть, что уменьшению массо-габаритных характеристик реакторов неотвратимо сопутствует повышение энергонапряженности активной зоны, а маневренности установки – постоянное изменение ее мощности. В этой связи проблемы организации эффективного теплоотвода на частичных режимах и перегрузки топлива становятся важными для обеспечения надежной и безопасной работы реактора.

Микротвэльное топливо как нельзя более соответствует этим условиям. На его основе возможно поднять энергонапряженность топливного слоя до 10 МВт/дм^3 , а в вихревых реакторах до 30 МВт/дм^3 . Использование пневмо- гидротранспортировки позволяет производить замену тепловыделяющих элементов без вскрытия корпуса.

1. Кольцевая активная зона с микротвэлами

Создание условий для быстрой и безопасной перегрузки топлива повлияло на конструкцию активной зоны, которая не должна была содержать элементов, препятствующих перемещению микротвэлов. Наиболее приемлемым вариантом стала активная зона, содержащая единый кольцевой топливный слой, расположенный между двумя цилиндрическими решетками, с боковыми подводом и отводом теплоносителя (кольцевая активная зона). В процессе научных исследований и конструкторских

проработок она совершенствовалась [5,6,9,11,12]; на рисунке 1 показан ее схематический вид.

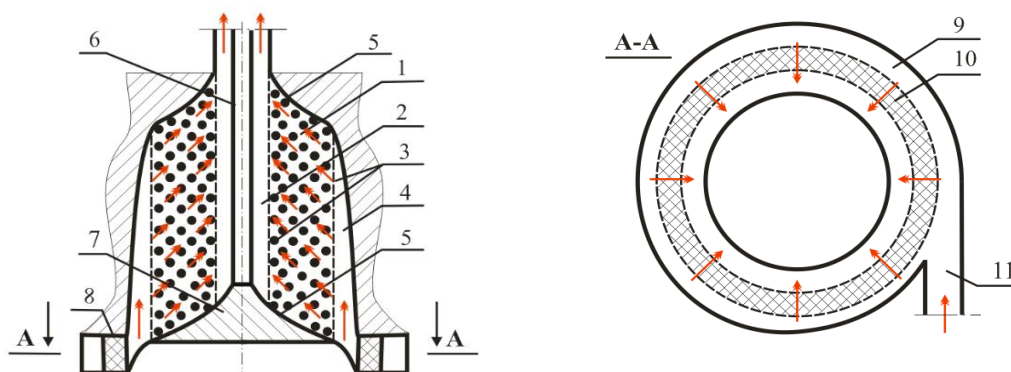


Рис. 1. Схема охлаждения кольцевой активной зоны:

1 – топливный слой из микроотверстий; 2 – отводной канал; 3 – ограждающие решетки; 4 – распределительный канал; 5 – профилированные торцевые стенки; 6 – внутренний канал для размещения стержня регулирования; 7 – обтекатель; 8 – устройство ввода; 9 – улиточный канал; 10 – пористая втулка; 11 – входной патрубок

Микроотверстия находятся между двумя коаксиальными цилиндрическими решетками 3 и профилированными торцевыми стенками 5 и образуют плотную засыпку 1. Теплоноситель поступает в кольцевой канал (распределительный канал) 4, затем фильтруется через топливный слой 1 в продольно-поперечном направлении. Там он снимает генерируемое в микроотверстиях тепло и через внутреннюю ограждающую решетку поступает в отводной канал 2, по которому покидает активную зону. В центре канала может быть помещена цилиндрическая труба при необходимости размещения в ней органов регулирования. Обтекатель 7 обеспечивает плавный, без образования вихрей выход теплоносителя из слоя. Устройство ввода 8 предназначено для равномерного распределения теплоносителя по периметру внешней ограждающей решетки за счет изменения проходного сечения улиточного канала 9.

Форма распределительного 2 и отводного 4 каналов также, как и торцов слоя 5, обеспечивает соответствие между скоростями фильтрации теплоносителя и профилем энерговыделения в слое. Это, с одной стороны, позволяет стабилизировать тепловыделение в топливном слое, а с другой, повысить его энергонапряженность и, тем самым, сделать активную зону более компактной.

Определение геометрических размеров и формы распределяющих теплоноситель конструктивных элементов является одной из важнейших проблем при расчетах активных зон и относится к обратным задачам теплофизики реакторов. Здесь надо одновременно находить и граничные условия, и поля термогидродинамических и нейтронно-физических параметров. Эти задачи имеют явно прикладной характер, поэтому в печати редко можно найти даже общетеоретические работы, особенно, касающиеся энергонапряженных реакторов. Совершенно очевидно, что для их решения необходимо достоверное моделирование физических явлений. И, в первую очередь, это относится к математическому описанию движения теплоносителя в магистралях с пористыми стенками, расчет которых требует высокой точности, чтобы распределить поток по тепловыделяющему слою строго по заданному закону.

2. Гидравлика системы охлаждения активной зоны реактора с микроотверстиями

2.1. Модели течения в магистралях с подводом или отводом жидкости (газа)

На начальном этапе распределение потока в коллекторных системах рассчитывалось по уравнению Бернулли для магистралей с непроницаемыми стенками, не учитывающим обмен потоками [13]. Игнорирование эффектов отделения или

присоединения массы приводило к ошибкам в значениях потерь давления более ста процентов. Попытки устранить такие существенные погрешности привели к широкому применению в гидродинамике теории движения точки с переменной массой, разработанной Мещерским [14]. Созданное на его основе научное направление моделирования движения в пористых каналах, получившее название гидравлики переменной массы, сыграло весомую положительную роль. Была решена задача гидравлического прыжка, получены уравнения движения жидкости с оттоком и притоком массы.

Однако, внутренняя противоречивость гидравлики переменной массы проявилась при решении обратных задач теплофизики. На проверку оказалось, что не все допущения теории Мещерского применимы в гидромеханике. В основу механики жидкостей и газов положена гипотеза сплошной среды, поэтому использование в ней понятия «материальная точка переменной массы» не совместимо с уравнением неразрывности и с такими понятиями, как линия тока, трубка тока, тензор напряжений, сила трения и т.д. При этом имеющее место вращательное и деформационное движение элемента сплошной среды вообще исключены из рассмотрения.

Данные обстоятельства послужили толчком к построению математических моделей течения в проницаемых каналах на основе уравнений классической механики жидкостей и газов. Наметилось два направления в моделировании: многомерное и одномерное. В связи со сложной математической структурой многомерных моделей [15], неясностью законов турбулизации потока вблизи проницаемых стенок и формулировки граничных условий на них предпочтение было отдано одномерным моделям. Наглядность взаимосвязи гидродинамических и геометрических параметров, наличие интегральных коэффициентов, экспериментальное нахождение которых не сопряжено с большими трудностями, предопределило их доминирующее применение в расчетной практике.

2.2. Кинематический образ течения в проницаемом канале

В одномерных моделях теплосъема в слое из микротвэлов базируются на решении системы уравнений фильтрации с граничными условиями на боковых поверхностях, которые находятся путем осреднения уравнений движения жидкости по проходным сечениям каналов. Многообразие полученных выражений [16, 17] объясняется различием дополнительных упрощений, принятых для конкретных задач. По внутреннему содержанию они одинаковы и обобщаются равенством

$$\frac{d \langle P \rangle}{\rho} + \beta w dw + w^2 d\beta + \beta w (w - V_x^*) \frac{dG}{G} + \lambda \frac{w^2}{2D} dX = 0; \quad (1)$$

$$w = \langle V_x \rangle; \quad \beta = \frac{\langle V_x^2 \rangle}{w^2}; \quad \lambda = \frac{8\tau^*}{\rho w^2}; \quad \tau^* = \mu \left(\frac{\partial V_x^*}{\partial r} \right);$$

$$\langle \cdot \rangle = F^{-1} \iint_F (\cdot) dF.$$

Здесь P , ρ – давление и плотность теплоносителя; V_x – продольная компонента вектора скорости; β – коэффициент потока импульса; G – расход теплоносителя; X – продольная координата; D , F – эквивалентный диаметр и площадь проходного сечения канала; λ – коэффициент трения; μ – коэффициент динамической вязкости; τ – тензор напряжений r – текущий радиус. Знак "*" обозначает значение параметра на проницаемой стенке; $\langle \cdot \rangle$ – знак осреднения по проходному сечению.

Данное уравнение движения идентично уравнению, выведенному на основании динамики точки переменной массы. Это обусловлено тем, что после операции осреднения полученное выражение справедливо как для непрерывных подынтегральных функций, так и имеющих конечное число разрывов. То есть оно не исключает разрывы векторного поля скорости, линий тока. В результате течение вязкой жидкости отождествляется с движением твердого тела переменной массы. Таким образом, картина течения в канале с проницаемой стенкой, которое ранее представлялось в виде «твердой» струи, от которой отделяются или присоединяются к ней частицы жидкости, потребовала критического осмысления.

Исследование потока проводилось методами визуализации на плоской модели, содержащей два канала (распределительный и отводной), между которыми были расположены имитаторы засыпки, ограниченные со стороны каналов решетками. Через данное устройство прокачивалась вода. На рисунке 2 показан снимок фрагмента модели, на котором отчетливо видны плавные линии (трубки) тока. Движение по этим трубкам бесспорно подчиняется закону Бернулли, который не согласуется с уравнением (1). Устранение этого несоответствия потребовало построения нового кинематического образа.

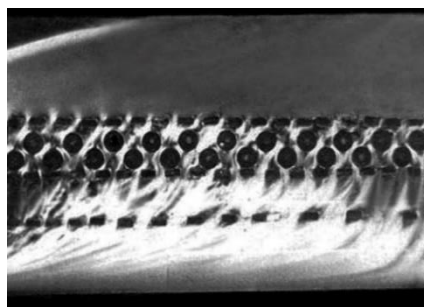


Рис. 2. Фрагмент фотоснимка потока в проницаемом канале

Представим поток в виде бесконечно большого числа L/dx элементарных трубок тока (рис. 3), каждая из которых пересекает проницаемую стенку канала (по одной на отрезках $[x; x + dx]$). Свойство непроницаемости боковых поверхностей этих трубок позволяет описывать бесконечно малые перемещения жидкости вдоль нее, используя основные законы динамики.

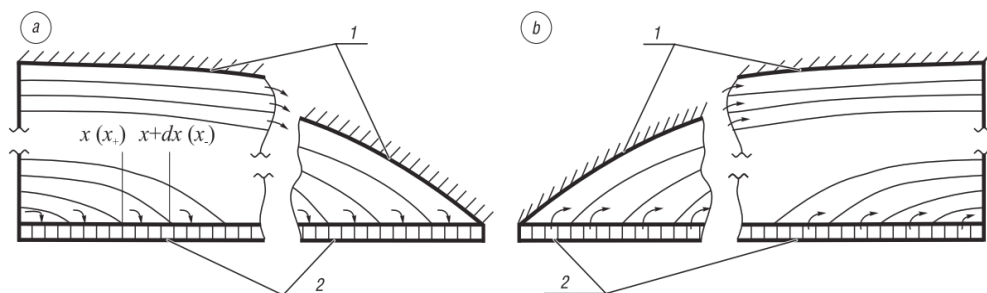


Рис. 3. Кинематический образ течения в проницаемых каналах:
а – с оттоком, б – с притоком; 1 – непроницаемая профилированная стенка канала,
2 – проницаемая стенка канала

С помощью уравнения Бернулли несложно определить перепад давления по длине каждой из трубок и, считая давление постоянным по сечению канала, записать уравнение движения дифференциальной форме

$$\frac{d \langle P \rangle}{\rho} + \tilde{\beta} w dw + \frac{w^2}{2} d\tilde{\beta} + (\tilde{\beta} w^2 - V_x^{*2}) \frac{dG}{2G} + \frac{\xi w^2}{2D} dX = 0; \quad (2)$$

$$\frac{\xi w^2}{2D} = \frac{1}{Fw} \iint_F \bar{\sigma}_x \nabla w (1 + \alpha) dF; \quad \alpha = f(X, r),$$

где $\tilde{\beta}$ – коэффициент Кориолиса (также как и коэффициент потока импульса рассчитывается на основании профиля продольной составляющей вектора скорости); $\bar{\sigma}_x$ – проекция тензора вязких и турбулентных напряжений на ось X .

Сравнение уравнений (1) и (2) показывает существенное различие двух последних слагаемых, отвечающих за вклад в потери давления инерционных и диссипативных эффектов. К настоящему времени предложен ряд эмпирических зависимостей для определения λ в уравнении (1); в большинстве случаев они представляют сумму, например, работа [16]:

$$\lambda = \lambda_0 + \alpha K_{\perp}^b; \quad K_{\perp} = \frac{V_r^*}{\langle V_x \rangle}, \quad (3)$$

где λ_0 – коэффициент сопротивления трения в непроницаемом канале; V_r^* – радиальная составляющая вектора скорости на проницаемой стенке.

Очевидным недостатком (3) является отсутствие явной зависимости второго слагаемого от вязкости, кроме того в некоторых случаях λ может быть равно нулю и даже стать отрицательным. Таким образом, четвертое слагаемое уравнения (1) неверно отражает реакцию потока на изменение массы, в результате чего последний член компенсирует эту неточность, включая наравне с силой сопротивления трения недостающую часть силы инерции.

С таким положением можно было мириться пока предлагаемые зависимости использовались в расчетах сантехнического оборудования и гидротехнических сооружений. Для высокотехнологичных установок, какими являются ядерные реакторы, необходим уже более тщательный подход к определению гидравлического сопротивления, особенно для газообразных теплоносителей. Последние требуют учета тепловых эффектов, вызванных диссипацией энергии потока в проницаемых каналах. Полученное уравнение (2) позволяет устранить этот недостаток. Рассчитанный на его основе коэффициент сопротивления трения по результатам замеров изменения давления вдоль проницаемого канала дает возможность оценить (аналогично как при течении в сплошных трубах) удельную диссипативную мощность потока и в перфорированных магистралях.

2.3. Реализация результатов исследований

Верность описанной картины течения и полученного уравнения движения была подтверждена результатами расчета улиточного входного устройства для обеспечения равномерной раздачи теплоносителя по окружности топливного слоя [18]. Добиться этого можно только при условии идеального слияния потоков в районе замыкания входа-выхода улиточного канала, для расчета профиля которого необходим строгий учет инерционных эффектов. На рисунке 4 показан снимок входного устройства с прозрачной крышкой, на котором отчетливо видны равномерность распределения по окружности потока жидкости и отсутствие ее турбулизации и вихревого перемешивания.

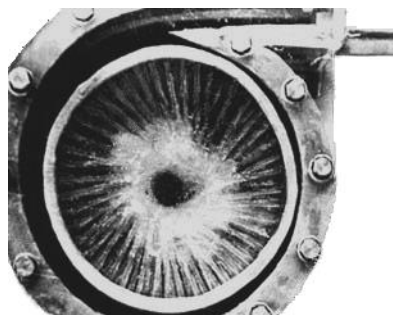


Рис. 4. Снимок течения во входном устройстве с улиточным каналом

Для теплоносителей, теплофизические свойства которых существенно зависят от температуры (газовых теплоносителей), очень важно верное определение диссипативных потерь в проницаемых каналах. Особенно при установке границ зоны устойчивой работы ядерных реакторов высокой удельной мощности при случайных локальных возмущениях нейтронного потока и эксплуатации силовых установок на частичных режимах. Новый кинематический образ течения в проницаемых каналах, позволивший строго разграничить инерционные и диссипативные эффекты, предоставил возможность решить эти задачи и определить профили каналов и торцевых стенок топливного слоя, обеспечивающих автономность теплосъема при изменении расхода теплоносителя [19, 20].

2.4. Условия устойчивого теплосъема в слое микротвэлов

При работе реактора в топливном слое происходят локальные возмущения энерговыделения, которые приводят к колебаниям температуры тепловыделяющих элементов, а вслед за этим и теплоносителя. Возрастание температуры сопровождается увеличением динамической вязкости и уменьшением плотности газа. В результате на таких участках слоя растет газодинамическое сопротивление и снижается массовая скорость фильтрации, что ведет к дальнейшему росту температуры. Возникает угроза перегрева микротвэлов. Таким образом, даже незначительные флуктуации нейтронного потока могут привести при неблагоприятных условиях к аварийной ситуации. Только при определенных соотношениях входных и выходных термодинамических параметров теплоносителя возможно избежать этого негативного эффекта.

Данная задача была теоретически исследована авторами работы [21] в рамках модели квазиидеальной жидкости и установлен критерий устойчивой фильтрации газа через тепловыделяющую среду, получивший название критерия термомеханической устойчивости,

$$\Gamma = \frac{1}{2+m} \ln \left[\frac{\rho_1 \left(\frac{\eta_1}{\eta_2} \right)^m}{\rho_2} \right] < 1, \quad (4)$$

где ρ – плотность газа; η – динамическая вязкость газа; m – показатель степени при Рейнольдсе в формуле для определения коэффициента газодинамического сопротивления $\zeta = CRe^m$; индекс «1» указывает параметры на входе в слой, «2» – на выходе.

Полученный критерий удобен для инженерной практики и позволяет уже на предварительной стадии разработки реактора найти диапазон термодинамических параметров теплоносителя, не обеспечивающих термомеханическую устойчивость, а следовательно, и надежную работу всего реактора.

Рассмотрена активная зона, охлаждаемая бинарной смесью гелия и ксенона с параметрами на входе в активную зону $T_1 = 250$ °C, $P_1 = 5,0$ МПа; температура газовой

смеси на выходе из слоя варьировалась в диапазоне 500–1500 °С, перепад давления 0,5–1 МПа. Граница между устойчивой и неустойчивой фильтрацией теплоносителя в слое микротвэлов, вызванной переходами от одного режима течения в каналах к другому, находится на основании (3). Используя функцию ошибок, получена непрерывная зависимость критерия Γ от числа Рейнольдса и термодинамических параметров на входе и выходе из слоя

$$\Gamma = 0,26 \left[\operatorname{erf} \left(0,85 - \frac{\operatorname{Re}}{1000} \right) + 3,1 \right] \ln \frac{P_1}{P_2} + 0,6 \left[\operatorname{erf} \left(\frac{\operatorname{Re}}{1000} - 0,9 \right) - 2,0 \right] \ln \frac{T_1}{T_2} < 1. \quad (5)$$

Числа Рейнольдса на границе устойчивости фильтрации для различных температур теплоносителя на выходе из слоя получены из равенства Γ единице (рис. 5).

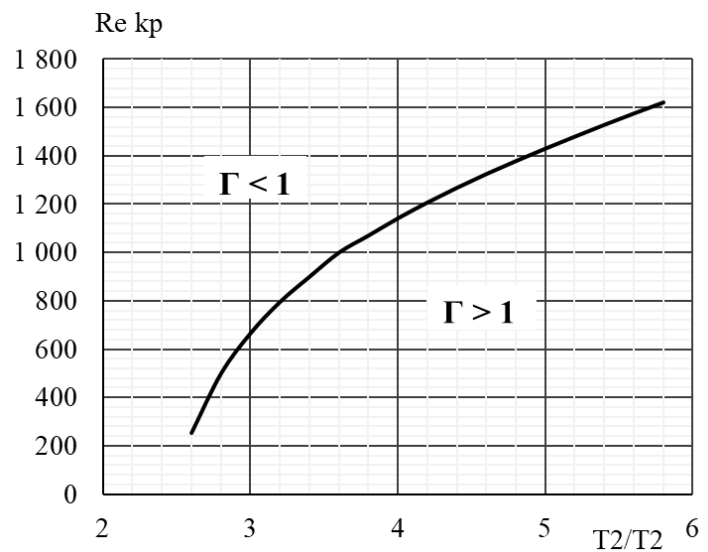


Рис. 5. Граница областей устойчивого и неустойчивого теплосъема в топливном слое с микротвэлами

Ограничение величины числа Рейнольдса говорит о том, что диаметр микротвэлов не может быть произвольным, а должен быть не менее некоторого значения, зависящего от термодинамических параметров.

3 Предварительные результаты концептуальной проработки компактного высокотемпературного газоохлаждаемого реактора

3.1. Основные технические требования к реактору

При выполнении предварительных теплогазодинамических и нейтронно-физических расчетов реактора использовались следующие основные технические требования:

- тепловая мощность реактора – 5 МВт;
- теплоноситель – Хе (92,83 % мас.) – Не (7,17 % мас.);
- температура теплоносителя на входе в реактор – 250 °С;
- температура теплоносителя на выходе из реактора – 800 °С;
- давление теплоносителя на входе в реактор – 5 МПа;
- размер активной зоны (диаметр, высота) – не более 500 мм;
- тепловыделяющий элемент – типа TRISO;
- диаметр тепловыделяющего элемента (с покрытием) – 1,8 мм;
- топливная композиция – UO_2 ;
- обогащение по U-235 – 90%;

- материал внешний и внутренний решеток, ограждающих активную зону – Мо;
- боковой отражатель – Ве;
- торцевой отражатель – ВеО;
- органы регулирования – поворотные барабаны;
- материал поглотителя – В₄С;
- материал корпуса реактора – нержавеющая сталь.

3.2. Результаты теплогазодинамического расчета кольцевой активной зоны реактора

В таблице 1 приведены результаты расчета параметров кольцевой активной зоны реактора, охлаждаемой Хе-Не теплоносителем.

Таблица 1

**Параметры кольцевой активной зоны реактора,
удовлетворяющие условиям устойчивого теплосъема**

Параметр	Результаты расчета				
Внутренний диаметр слоя, см	7,50	10,00	12,5	15,00	20,00
Наружный диаметр слоя, см	36,46	37,06	37,81	38,71	40,91
Наружный диаметр распределительного канала, см	37,45	38,62	40,04	41,66	45,45
Объем активной зоны, дм ³	66,08	70,29	75,53	81,79	97,36
Уплощение активной зоны	0,75	0,77	0,8	0,83	0,91
Энергонапряженность активной зоны, кВт/дм ³	75,67	71,13	66,20	61,13	51,35
Скорость теплоносителя в распределительном канале, м/с	65,69	40,35	27,56	20,12	12,16
Скорость теплоносителя в отводном канале, м/с	193,59	108,89	69,69	48,40	27,22
Температура оболочки микротвэла, °С	809,74	811,71	813,5	815,17	818,24
Температура топливного ядра, °С	811,56	813,53	815,32	817,00	820,06

Температурные перепады на микротвэле невелики. Таким образом, основными факторами, ограничивающими размеры активной зоны, являются, с одной стороны, скорость газового теплоносителя, которая при приближении к скорости звука приводит к скачкообразному росту потерь давления, с другой – заданные внешние габариты.

Результаты расчета дают возможность определить зависимость соотношения размеров активной зоны от удельного энерговыделения в топливном слое и величины ее уплощения и позволяют исключить те варианты, которые не удовлетворяют отмеченным ограничениям.

3.3. Результаты нейтронно-физического расчета реактора с кольцевой активной зоной

Компактный ядерный реактор с шариковыми микротвэлами (рис. 6 и рис. 7) состоит из активной зоны, входного, распределительного и выходного каналов, бокового и торцевых отражателей, рабочих органов системы управления и защиты.

Расчетная модель активной зоны представляет собой засыпку с пористостью 0,4 из шариковых микротвэлов между внутренней и внешней ограждающими коаксиальными цилиндрическими решетками.

Входной канал предназначен для подачи теплоносителя в активную зону. Выходной канал предназначен для выхода теплоносителя из центральной полости активной зоны.

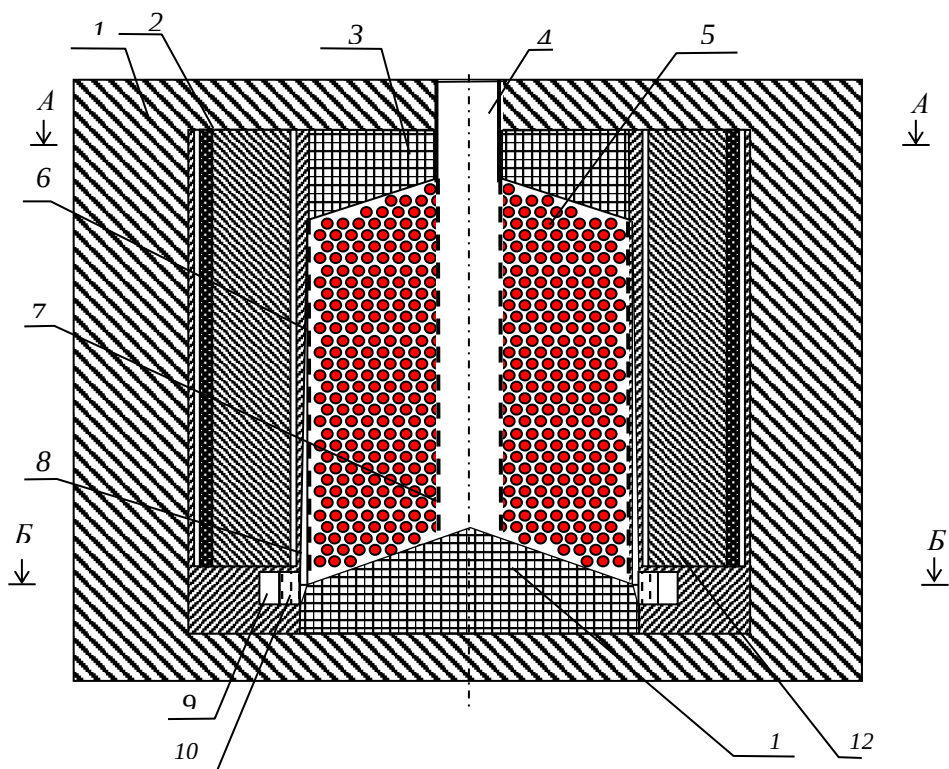


Рис. 6. Продольный разрез расчетной модели компактного ядерного реактора с шариковыми микровэлами:

1 – стальной отражатель; 2 – боковой бериллиевый отражатель; 3 – верхний торцевой отражатель из BeO ; 4 – отводной канал; 5 – активная зона; 6 – внешняя ограждающая решетка; 7 – внутренняя ограждающая решетка; 8 – распределительный канал; 9 – канал входа теплоносителя; 10 – стальная пористая втулка; 11 – нижний торцевой отражатель из BeO ; 12 – поворотный барабан рабочего органа СУЗ

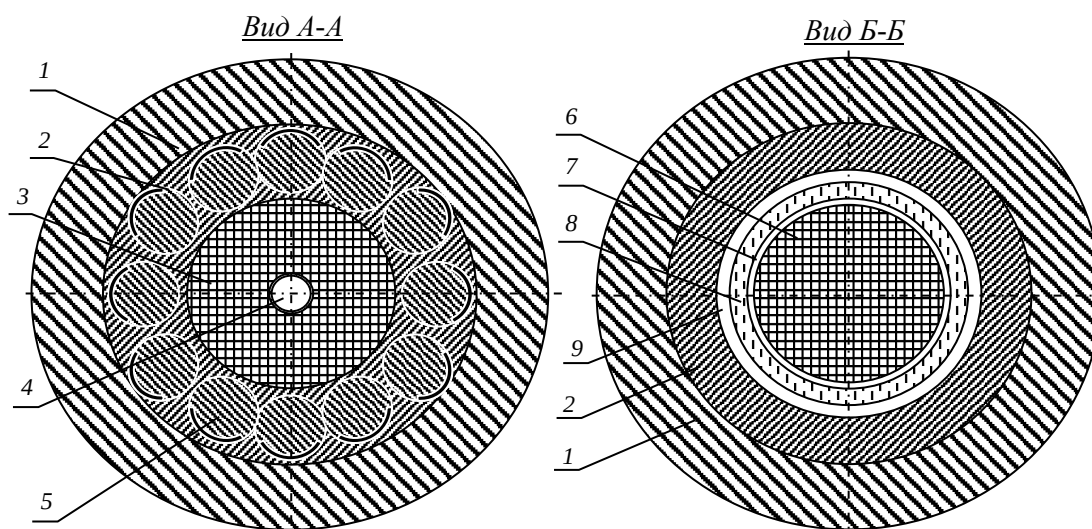


Рис. 7. Поперечные разрезы расчетной модели компактного ядерного реактора с шариковыми микровэлами:

1 – стальной отражатель; 2 – боковой бериллиевый отражатель; 3 – верхний торцевой отражатель из BeO ; 4 – отводной канал; 5 – поворотный барабан рабочего органа СУЗ; 6 – нижний торцевой отражатель из BeO ; 7 – распределительный канал; 8 – стальная пористая втулка; 9 – канал входа теплоносителя

В бериллиевом отражателе по радиусу 252 мм равномерно через 30 ° коаксиально расположены 12 коаксиальных цилиндрических полостей для размещения поворотных барабанов системы управления и защиты. На боковой стороне поворотного барабана на всю высоту по сектору 120° нанесен слой карбида бора.

В таблице 2 приведены некоторые результаты нейтронно-физического расчета реактора с кольцевой активной зоной, охлаждаемой Хе-Не теплоносителем.

Таблица 2

Некоторые результаты нейтронно-физического расчета реактора с кольцевой активной зоной, охлаждаемой Хе-Не теплоносителем

$K_{эф}$		Запас реактивности, $\beta_{эф}$	Эффективность одного барабана, $\beta_{эф}$
Все барабаны вне зоны	Все барабаны в зоне		
$1,13731 \pm 0,00011$	$0,93999 \pm 0,00010$	15,1	1,9

Заключение

Показана необходимость совершенствования физико-математического обеспечения моделирования теплогазодинамических процессов в активной зоне реакторов с микротвэлами. Приведены некоторые результаты таких исследований.

Реакторы с микротвэлами отвечают современной тенденции развития реакторостроения и могут наиболее полно удовлетворять требованиям, предъявляемым к перспективным компактным высокотемпературным газоохлаждаемым реакторам малой мощности. При этом наиболее перспективной конструкцией активной зоны с микротвэлами является кольцевая активная зона с радиальным течением теплоносителя.

Представлены некоторые результаты концептуальных исследований по разработке высокотемпературного газоохлаждаемого реактора малой мощности с кольцевой активной зоной из микротвэлов, которая позволяет оценить возможности и перспективы таких активных зон.

Список литературы

1. Перспективы использования реакторов с шаровыми твэлами малого диаметра в космических ядерных энергодвигательных установках / Ананич П.И., Казазян В.Т., Сикорин С.Н. // Пятая Международная конференция «Ядерная энергетика в космосе», 23–25 марта 1999, г.Подольск, Россия. Сборник докладов, часть 1, Подольск, 1999. С. 131–141.
2. О возможности создания тепловыделяющих сборок на основе шариковых твэлов для перспективных водо-водяных энергетических реакторов / Казазян В.Т., Колыхан Л.И., Михалевич А.А., Полюхович В.М., Сикорин С.Н. // Материалы научно-технической конференции «Перспективы и проблемы развития атомной энергетики России и ряда государств бывшего СССР на пороге XXI века», 5–7 октября 1999, г. Санкт-Петербург. С. 109–115.
3. Пути создания реакторов с шаровыми твэлами малого диаметра для транспортабельных атомных станций / Казазян В.Т., Сикорин С.Н. // Сборник тезисов докладов и сообщений 10-й ежегодной конференции Ядерного общества России «От первой в мире АЭС к атомной энергетике XXI века», 28 июня – 2 июля 1999 г., г. Обнинск. С. 162–163.
4. Возможность создания реакторов с шариковыми твэлами для транспортабельных атомных станций малой мощности / Казазян В.Т., Михалевич А.А., Сикорин С.Н. //

- Международный семинар «Малая энергетика. Итоги и перспективы», 10–11 октября 2001 г., г. Москва, Россия. Тезисы докладов. С. 101.
5. *Ананич П.И., Ахрамович А.П., Казазян В.Т., Колос В.П., Михалевич А.А., Сикорин С.Н., Тетерева Н.А.* Возможность создания реакторов малой мощности с активной зоной на основе шариковых твэлов // *Атомная энергия*, 2004. Т. 97. Вып. 3. С. 168–172.
 6. Концепция активной зоны с шариковыми твэлами водо-водяного реактора малой мощности / *Ананич П.И., Ахрамович П.И., Казазян В.Т., Колос В.П., Михалевич А.А., Сикорин С.Н., Тетерева Н.А.* // Международная научно-практическая конференция «Малая энергетика - 2005», Российская Федерация, Москва, 11–14 октября 2005. Труды. С.105–113.
 7. Концепция высокопоточного исследовательского ядерного реактора с активной зоной на основе шариковых твэлов малого диаметра / *Хлопкин Н.С., Быков В.П., Закиров С.Ю., Лепик П.А., Ананич П.И., Ахрамович П.И., Казазян В.Т., Колос В.П., Сикорин С.Н., Тетерева Н.А., Михалевич А.А.* // Международная научно-техническая конференция «Исследовательские реакторы в XXI веке», Российская Федерация, Москва, 20-23 июня 2006. Тезисы докладов. С.51.
 8. О возможности использования высокопоточных реакторов с активной зоной на основе шариковых твэлов для создания реакторно-лазерных систем / *Ананич П.И., Казазян В.Т., Сикорин С.Н.* // IV Международная конференция «Физика лазеров с ядерной накачкой и импульсные реакторы» ЛЯН-ИР-2007, Российская Федерация, Обнинск, 18–21 сентября 2007. Тезисы докладов. С.144.
 9. Концепция исследовательских реакторов с шариковыми микротвэлами / *Ананич П.И., Казазян В.Т., Кувшинов В.И., Сикорин С.Н., Ахрамович А.П., Колос В.П., Михалевич А.А.* // II Международная конференция «Ядерные технологии XXI века», Минск, 6–8 октября 2010. Доклады. С. 151–158.
 10. Possibility of the design of a high flux pebble bed research reactor with small fuel spheres / *S. Sikorin, P. Ananich, V. Kazazyan* // International Conference on Research Reactors: Safe Management & Effective Utilization, Rabat, Morocco, 14–18 Nov. 2011 : book of Synopsis. P. 129–130.
 11. The concept of the low-power reactor with core on basis of small diameter spherical fuel elements / *S. Sikorin, V. Kazazyan, A. Akhramovich, V. Kolos* // The 4-th International Conference «Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy» (NPAE-Kyiv2012), Kyiv, Ukraine, 3 - 7 September 2012. Book of Abstracts. P. 118.
 12. *Ахрамович А.П., Колос В.П., Михалевич А.А., Сикорин С.Н.* О возможности создания высокоэнергонапряженного ядерного реактора на низкообогащенном топливе // Доклады Национальной академии наук Беларуси. 2012. Т.56, №4. С.115–118.
 13. *Талиев В. Н.* Аэродинамика вентиляции. М.: Стройиздат, 1954. 288 с.
 14. *Мещерский И.В.* Уравнения движения точки переменной массы в общем случае. М.: Гос. изд-во лит. по строительству и архитектуре, 1952. 318 с.
 15. *Сегаль, М. Д., Смирнов Л.П.* Методика расчета продольно-поперечного течения газа в ТВС сложной геометрии // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Атомно-водородная энергетика и технология. 1983. Вып. 3. С. 61–63.
 16. *Коченов И. С., Новосельский О.Ю.* О гидравлическом расчете системы охлаждения ядерного реактора // *Атомная энергия*. 1967. Т. 23. № 2. С.113–120.
 17. *Дильман В. В., Сергеев С.П., Генкин В.С.* Описание движения потока с проницаемыми стенками на основе уравнения энергии // Теоретические основы химической технологии. 1971. Т. 5. № 4. С. 564–572.
 18. *Колос В.П., Кочемазов С.М., Сорокин В.Н.* Гидромеханика входного устройства тепловыделяющего аппарата // *Инженерно-физический журнал*. 1988. Т. XLV. № 3. С. 370–377.

19. *Ахрамович А.П., Колос В.П., Сорокин В.Н.* Оптимизация профилей каналов аппарата радиального типа с учетом точности их изготовления, обеспечиваемой технологией производства // Вести АН БССР. Серия физико-энергетически наук. 1990. № 3. С. 90–101.
20. *Ахрамович А. П., Войтов В.И., Колос В.П.* О работоспособности реактора с микротвэлами. Условия автомодельности теплосъема в активной зоне на частичных нагрузках // Вести НАН Беларуси. Сер. физико-технических наук. 2016. № 2. С. 74–80.
21. *Колос В. П., Сорокин В.Н.* Устойчивый и псевдоустойчивый режимы фильтрации // Теплофизика высоких температур. 1983. Т. 21, № 6. С. 1231–1233.