

СТАТЬИ

УДК 621.039.524:536.24

РЕШЕТКИ СО СМЕСИТЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ ДЛЯ ТВС ВВЭР

Перепелица Н.И. (АО «ГНЦ РФ — ФЭИ», г. Обнинск)

e-mail: nikip@ippe.ru

Повышение мощности ТВС ВВЭР связано, в основном, с использованием перемешивающих решеток. С их помощью теплоноситель перемешивается и турбулизуется, что выравнивает температуру по ячейкам ТВС и повышает критическую мощность и критический тепловой поток. Под воздействием смесительных элементов, находящихся в этих решетках, могут быть образованы три вида поперечных течений теплоносителя: преимущественно закрученные потоки вокруг твэла или между твэлами, потоки с заданным направлением в поперечном сечении канала в пределах одной или двух ячеек и потоки с достаточно протяженным направлением относительно выбранных ориентиров (ряды твэлов, ось ТВС и др.).

В канале с ТВС легководных ядерных реакторов с треугольной упаковкой твэлов, аналогичной ТВС ВВЭР, в основном, используется первый вид течения. Закрученные потоки вокруг каждого твэла образуют с помощью отогнутых лопаток, размещенных на полосах решетки, винтообразной деформации стенок ячеек и центрирующих наклонных гофр и пластин, установленных под углом к продольной оси ТВС. Лопатки могут быть размещены также на ободе решетки для направления потока теплоносителя к твэлам. Для образования закрученных течений между твэлами используется двухъярусная решетка, верхний ярус которой образован из полос с наличием локальных лопастных завихрителей.

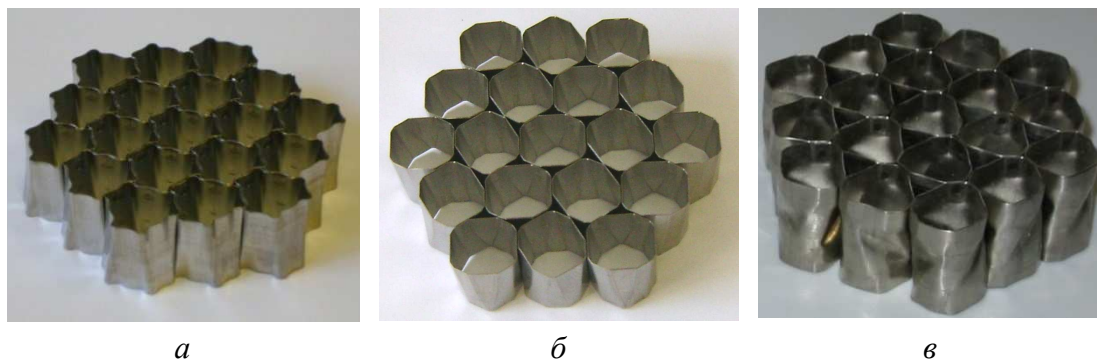
Настоящая статья посвящена анализу эффективных конструкций решеток со смесительными элементами для усовершенствованных ТВС-2М и ТВСА, разработанных АО ОКБ «Гидропресс» и АО «ОКБМ Африкантов» соответственно.

Из имеющихся конструкций дистанционирующих решеток для ТВС ВВЭР можно выделить три группы: трубчатые ячейки сотового типа, полосы разной конфигурации и цельная листовая структура.

Решетки, выполняемые из трубчатых ячеек (муфт). Заданная деформация ячеек сотового типа использовалась АО ОКБ «Гидропресс» и ПАО «НЗХК» при создании перемешивающих решеток типа «циклон», «сектор», «вихрь» и «прогонка», а также ПАО «МСЗ» — сотовой дистанционирующей перемешивающей решетки [1—6].

Общее между решетками типа «циклон» и «сектор» — наличие между стенками ячеек каналов с наклоном, который создается изменением ширины граней ячеек от их нижнего торца к верхнему [1, 2]. Каналы в решетке типа «циклон» создают вращательное движение теплоносителя вокруг каждого твэла, типа «сектор» — течение, перпендикулярное основанию каждого из шести секторов поперечного сечения с противоположно направленным отклонением потоков в смежных секторах. Суммарный момент от возникающих гидродинамических сил должен быть равен нулю, значит, уменьшается воздействие вибрации на ТВС. С этой же целью могут использоваться отогнутые лопатки, расположенные на верхних кромках ячеек. Эти решетки далее не рассматриваются ввиду неперспективности их дальнейшего использования [4].

Фрагменты решеток типа «вихрь», «прогонка» и сотовой дистанционирующей перемешивающей решетки показаны на рис. 1. Смесительные элементы в двух первых — отгибы, выполненные на гранях ячеек. Совокупность трех соседних отгибов в решетке типа «вихрь» спо-



Р и с. 1. Перемешивающая решетка типа «вихрь» (а), «прогонка» (б) [9] и сотовая дистанционирующая перемешивающая решетка [6] (в)

способствует образованию локальных вихревых течений, двух отгибов смежных ячеек в решетке типа «прогонка» — поперечных течений между рядами твэлов. Крайние части ячеек сотовой дистанционирующей перемешивающей решетки имеют многогранную форму, в их средней части сформированы три наклонные канавки, глубина которых позволяет центрировать твэлы. Грани одной части повернуты вокруг продольной оси ячейки относительно граней другой части. При касании ячеек по трем несмежным граням с наибольшей шириной образуются каналы для прохода теплоносителя [5, 6].

Исследованиями установлено слабое воздействие решетки типа «вихрь» и заметное (повышение на 40%) решетки типа «прогонка» на интенсивность перемешивания теплоносителя [4, 7]. Однако в опытах по кризису теплообмена при размещении первой на выходе ТВС обнаружен заметный прирост критического теплового потока [3, 4, 7—9].

Экспериментальные исследования кризиса теплообмена [4] проводили на модели ТВС ВВЭР, состоящей из семи имитаторов твэлов прямого нагрева диаметром 9,1 мм и обогреваемой длиной 1,76 м. Штатные дистанционирующие решетки размещали на расстоянии 70 мм от верхнего конца обогрева с шагом 340 мм, исследуемые решетки — между ними, в верхних пролетах ТВС. В начале опытов решетку типа «вихрь» устанавливали на расстоянии 90 и 140 мм от предшествующей дистанционирующей решетки, в последующем все исследуемые решетки — на расстоянии 140 мм. Опыты проведены при течении воды давлением 14 и 16 МПа, массовой скоростью 2000, 3000 и 4000 кг/(м²·с), температуре на входе 280—320 °С. Повышение критического теплового по-

тока и критической мощности ТВС с исследуемыми решетками оценивали по сравнению с аналогичными для ТВС, оснащенной только дистанционирующими решетками. При размещении решетки типа «вихрь» в трех верхних пролетах ТВС с равномерным аксиальным тепловыделением максимальная критическая мощность повышалась на 15—20%. Затем ее устанавливали только в двух верхних пролетах, ниже, в двух соседних пролетах — решетку типа «прогонка». При неравномерном тепловыделении ТВС, соответствующем концу кампании реактора, все исследуемые решетки были смещены вниз на один пролет по высоте. Критическая мощность повысилась примерно на 14% (критический тепловой поток на ~40%).

Гидравлические испытания полномасштабного макета ТВС-2М с двумя решетками типа «вихрь» и отдельно с двумя типа «прогонка» проведены в двух диапазонах чисел Рейнольдса, 10³: 30—180 при 1 МПа и 30—450 при 15,7 МПа. Средний коэффициент гидравлического сопротивления определяли как разность коэффициентов двух пролетов с одним из двух типов исследуемых решеток и без них в предположении, что коэффициенты для одного типа одинаковы. Установлено, что коэффициент для решетки типа «вихрь» равен $0,28 \pm 0,02$, «прогонка» — $0,21 \pm 0,01$ при числе Рейнольдса $450 \cdot 10^3$, близком для номинального режима работы ВВЭР-1000. Коэффициент гидравлического сопротивления ТВС-2М при размещении в ней двух решеток типа «вихрь» и двух типа «прогонка» увеличился на 6%.

Положительное влияние решетки типа «вихрь» на критическую мощность выявлено также для моделей ТВС ВВЭР с равномерным и косинусоидальным тепловыделением по их

длине [7—9]. Все модели ТВС — 19 имитаторов твэлов с косвенным обогревом диаметром 9,1 мм и обогреваемой длиной ~3,71 м с размещением дистанционирующих решеток по их длине через 340 мм. Кризис теплообмена исследовали при течении фреона-12 и воды [7, 8], фреона-12 с равномерным и неравномерным тепловыделением по поперечному сечению ТВС [9]. Опыты с водой проведены при давлении 10—18 МПа, массовой скорости 1000—5000 кг/(м²·с) и температуре на входе 70—330 °С, с фреоном-12 — при давлении 2,03 и 2,66 МПа, массовой скорости 1760, 2580 и 3580 кг/(м²·с), температуре на входе 35—60 °С. Использование фреона-12 как модельного теплоносителя по сравнению с водой высокого давления существенно упрощает проведение таких опытов. Давление фреона 2,03 и 2,66 МПа соответствует давлению воды 12 и 15,7 МПа.

Три решетки типа «вихрь» на ТВС при течении воды устанавливали только в трех верхних пролетах с длиной самого верхнего 280 мм на расстоянии 140 мм от предшествующей дистанционирующей решетки. Повышение критического теплового потока и критической мощности такой ТВС оценивали с помощью корреляции АО ОКБ «Гидропресс» для ТВС, оснащенной только дистанционирующими решетками. При давлении 16 МПа, массовой скорости 3800 кг/(м²·с) и критическом паросодержании ~0,2 повышение критической мощности и критического теплового потока составило 8—11 и ~20% соответственно.

При течении фреона-12 для установки указанной решетки на ТВС дополнительно использовали четвертый и пятый пролеты, решетку смещали вниз на один-два пролета [7, 8]. Также исследовалась решетка типа «прогонка», которую устанавливали аналогично решетке типа «вихрь», а также совместно, как было указано в опытах [4]. Увеличение критического теплового потока и критической мощности таких ТВС оценивали по сравнению с аналогичными показателями для ТВС с дистанционирующими решетками. Выявлено, что эффективность использования решетки типа «прогонка» существенно ниже, чем типа «вихрь». Наилучший результат повышения критической мощности — в среднем 8,8% получен в опытах с решетками типа «вихрь», установленными в четырех верхних пролетах ТВС. При совместном использовании

двух типов решеток на ТВС в соответствии с той же схемой их расположения прирост критической мощности в среднем по всем опытам составил 5,1% [9].

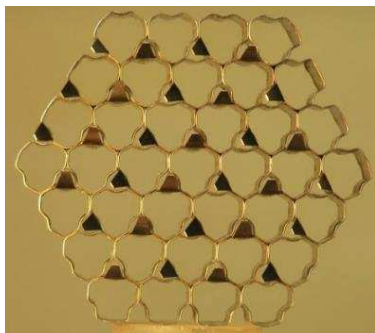
При исследовании смесительных свойств решетки типа «вихрь» на установке «Трассер» с укороченной моделью ТВС ВВЭР в поток воды перед решеткой подавали жидкостный трассер с последующим определением его концентрации в выбранных ячейках сборки [7]. По изменению концентрации с помощью программы ПУЧОК-1000 АО ОКБ «Гидропресс» определяли коэффициент перемешивания — отношение средней пульсационной поперечной скорости к аксиальной скорости потока. Выявлено, что для решетки типа «вихрь» он составляет 0,02—0,05, что соответствует сотовой дистанционирующей решетке. Отсутствие на периферии решетки типа «вихрь» части сотовых элементов не приводит к понижению интенсивности перемешивания.

При разработке сотовой дистанционирующей перемешивающей решетки исследовано влияние сотовой перемешивающей решетки на коэффициенты перемешивания и гидравлического сопротивления в МГТУ им Н.Э. Баумана, а также на кризис теплообмена в АО «ОКБМ Африкантов» [6]. Вторая решетка в отличие от первой имела большее число наклонных канавок, глубина которых была недостаточна для центровки твэлов.

В большей части исследований использовали необогреваемую модель ТВС ВВЭР — сборку из 19-твэльных трубок диаметром 9,1 мм, длиной 1 м с двумя концевыми сотовыми дистанционирующими решетками. Опыты для восьми фрагментов сотовой перемешивающей решетки проведены при продувке воздуха с числом Рейнольдса $40 \cdot 10^3$ и подогревом центральной части потока. Физический смысл данного коэффициента перемешивания аналогичен коэффициенту перемешивания [7], но при его определении отдельно рассчитывали диффузионную и конвективную составляющую переноса воздуха [6]. В итоге был найден оптимальный фрагмент, для которого коэффициент перемешивания больше аналогичного для сотовой дистанционирующей решетки высотой 35 мм в 40 раз. Но коэффициент гидравлического сопротивления для этого фрагмента примерно в 3,5 раза больше, чем у сотовой дистанционирующей решетки.

Кризис теплообмена изучали на модели ТВСА — сборке из 19 имитаторов прямого нагрева диаметром 9,1 мм, длиной 3 м. Ее оснащали шестью фрагментами штатных дистанционирующих решеток, между ними в середине трех самых верхних пролетов — тремя фрагментами сотовых перемешивающих решеток. Опыты проведены в диапазоне режимных параметров активной зоны ВВЭР-1000. Установлено, что такая решетка на ТВСА повысит ее критическую мощность на 16—20,3% по сравнению с оснащенной только дистанционирующими решетками.

В сравнительных испытаниях [10], кроме решетки типа «вихрь» и сотовой дистанционирующей перемешивающей решетки с 37 ячейками, использовали унифицированную дистанционирующую решетку-интенсификатор (УДРИ), разработанную НИЦ «Курчатовский институт» (рис. 2). Это решетка сотового типа высотой 20 мм с лопатками трапецеидальной формы, приваренными к верхней кромке ее ячеек. Длина нижнего и верхнего основания лопаток равна 5 и 1,5 мм соответственно, высота — 8 мм. Все лопатки отогнуты в сторону межтвэльной ячейки на угол 25° относительно продольной оси ТВС и расположены между собой так, чтобы способствовать созданию порядной прогонки теплоносителя. Испытания проведены на двух моделях ТВС, состоящих из 37 имитаторов твэлов прямого нагрева диаметром 9 мм и обогреваемой длиной 2,5 м. Одна модель имела равномерное радиальное тепловыделение, другая — неравномерное (тепловыделение периферийных имитаторов снижено относительно центральных). Вариант модели ТВС, оснащенной только штатными дистанционирующими решетками для ТВС-2М с шагом 340 мм, являлся базовым вариантом. Остальные три варианта определя-



Р и с. 2. Унифицированная дистанционирующая решетка-интенсификатор [10]

лись типом исследуемых решеток, размещаемых на длине, равной трем верхним шагам расположения штатных дистанционирующих решеток. Во всех вариантах на расстоянии 40 мм от конца обогрева ТВС размещали штатную дистанционирующую решетку. Ниже ее в зависимости от варианта устанавливали шесть УДРИ с шагом 170 мм, три сотовые дистанционирующие перемешивающие решетки вместо трех штатных дистанционирующих решеток, три решетки типа «вихрь» на расстоянии 140 мм от предшествующей дистанционирующей решетки.

Опыты проведены при давлении 16 МПа, массовой скорости 1000—3500 кг/(м²·с) и температуре на входе 190—330 °С. Опыты с базовой моделью использовали для оценки повышения критической мощности трех вариантов модели ТВС, оснащенных соответственно тремя типами решеток типа «вихрь», УДРИ и сотовой дистанционирующей перемешивающей решеткой. Выявлено, что наибольшая эффективность использования решеток первых двух типов наблюдается при массовой скорости 3500 кг/(м²·с) для ТВС с равномерным радиальным тепловыделением. Повышение критической мощности ТВС с решетками типа «вихрь» и УДРИ в среднем составило 13 и 20% соответственно, с решетками третьего типа отмечено только для большой температуры на входе и составило 14 и 23% соответственно при неравномерном и равномерном тепловыделении.

Коэффициент гидравлического сопротивления определяли по измеренному полному перепаду давления на выбранном участке с решетками необогреваемой ТВС за вычетом расчетного нивелирного напора, потерь на трение и ускорение потока, а также потерь на дистанционирующей решетке и последующим делением на число находящихся на этом участке исследуемых решеток. Расчетные коэффициенты для штатной дистанционирующей решетки, решетки типа «вихрь», сотовой дистанционирующей перемешивающей решетки и УДРИ при числе Рейнольдса $450 \cdot 10^3$ составили 0,36, 0,33, 1,05 и 0,52 соответственно. Коэффициент гидравлического сопротивления для решетки типа «вихрь» немного больше приведенного 0,28 [4].

Дополнительные исследования для УДРИ1 и УДРИ2 с высотой лопаток 8 и 6 мм соответственно проведены почти в том же диапазоне параметров, что и в [10]. Шаг их размещения 170,

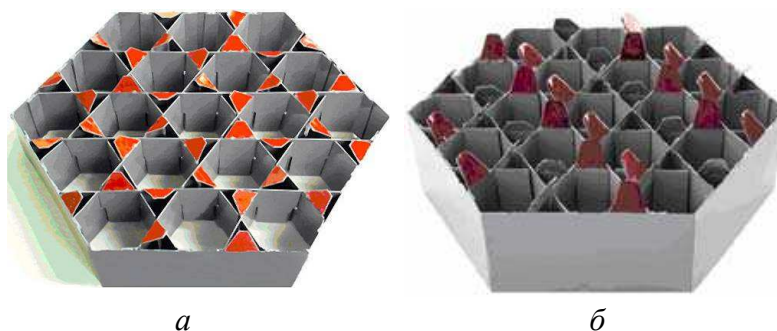
255 мм и 170, 255, 340 мм соответственно [11]. При массовой скорости $3500 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ критическая мощность ТВС с УДРИ1 и УДРИ2, расположенных с шагом 255 мм, повысилась на 10—12%, с шагом 170 мм — на 16—18%. Снижение высоты лопаток с 8 до 6 мм привело к уменьшению коэффициента гидравлического сопротивления с 0,52 до 0,47.

Для дальнейших испытаний в АО ОКБ «Гидропресс» были выбраны решетки типа «вихрь» и «прогонка» [4].

Для повышения критической мощности ТВС предложено оснащать ее устройствами, позволяющими эффективно перемешивать поток теплоносителя в областях с отрицательной энтальпией и турбулизовать в областях с положительной энтальпией [12].

Решетки, выполняемые из металлических полос и листа. При использовании набора трех групп пересекающихся между собой полос в качестве смесительных элементов в основном применяются отогнутые (отклоняющие) лопатки, размещаемые на верхних кромках полос, вблизи мест их пересечения [13—17]. Перемешивающая решетка, разработанная ПАО «МСЗ», состоит из центрующих шестигранных и смежных трехгранных ячеек [13]. Две грани последних ячеек вогнуты, на третьей размещены лопатки трапециевидной формы, отогнутые внутрь в одном окружном направлении для образования вихревого движения вокруг каждого твэла. Применение такой закрутки для перемешивания в ТВС неэффективно, так как смешение теплоносителя происходит только в ячейках, находящихся около каждого твэла, а в области повышенного паросодержания необходимо создавать высокую турбулизацию теплоносителя [12]. Эта решетка может быть выполнена из цельнометаллической структуры [18].

В перемешивающей дистанционирующей решетке, предложенной АО «ОКБМ Африкантов» [14], сформированы два типа смежных ячеек между центрующими ячейками. Поперечное сечение у первого типа — фигура с тремя выпуклыми одинаковыми сторонами, являющимися упорами для твэлов, у второго — обычный равнобедренный треугольник. Лопатки отогнуты внутрь ячеек второго типа и в пределах одной



Р и с. 3. Перемешивающая решетка типа «закрутка вокруг твэла» (а), «порядная прогонка» (б) для моделей 19-стержневой ТВС [15]

группы полос имеют одинаковую ориентацию. Наличие таких лопаток с их меньшим числом способствует не только образованию протяженных поперечных течений между рядами твэлов, но и снижению коэффициента гидравлического сопротивления.

В ТВСА, разработанной АО «ОКБМ Африкантов», используются два типа перемешивающих решеток, отличающихся между собой схемой размещения лопаток: «закрутка вокруг твэла» и «порядная прогонка» (рис. 3). Исследованиями межъячеечного массообмена теплоносителя с помощью метода диффузии газового трассера выявлено, что первый тип способствует образованию закрученных течений вокруг твэлов, второй — протяженных поперечных течений между их соседними рядами [15]. Последнее обеспечивает большую критическую мощность ТВС, чем при закрутке потока [19].

Кризис теплообмена изучен при течении воды на 15 моделях ТВСА — 19-стержневых сборках обогреваемой длиной 3, 3,06 и 3,73 м с использованием решетки второго типа и без нее при тепловом потоке $0,5\text{—}2 \text{ МВт}/\text{м}^2$, давлении $9,8\text{—}16,7 \text{ МПа}$, температуре на входе $270\text{—}310 \text{ }^\circ\text{C}$ и массовой скорости $1000\text{—}3600 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$. Исследуемая решетка была установлена в трех верхних пролетах между дистанционирующими решетками, расположенными с шагом 340 и 510 мм. При ее использовании увеличивалась критическая мощность ТВСА на 12—20% (критический тепловой поток на 25—42%) по сравнению с ТВСА, имеющей только дистанционирующие решетки. Из расчетной оценки теплотехнических характеристик активной зоны с такой ТВСА следует, что максимальное локальное паросодержание снижается

на 30%, минимальный коэффициент запаса до кризиса теплообмена увеличивается на 20%.

Результаты исследований [15, 19, 20] были использованы АО «ОКБМ Африкантов» при разработке усовершенствованных конструкций ТВСА-Т.MOD2 и ТВСА-12PLUS, в которых 12 дистанционирующих решеток установлены с шагом 340 мм, решетка второго типа — посередине трех верхних пролетов между дистанционирующими решетками [21]. Расчетно-экспериментальными теплогидравлическими исследованиями установлено, что для номинальных режимных параметров ТВС ВВЭР критическая мощность повышается на 10—12% (критический тепловой поток на 25—30%) по сравнению с моделями ТВС без перемешивающих решеток [21]. Коэффициент гидравлического сопротивления ТВСА-12PLUS составляет 14.

Одновременное образование в канале поперечных течений с двумя противоположными направлениями при использовании модернизированной перемешивающей решетки в ТВС ВВЭР повышает коэффициент перемешивания [16]. Основное отличие модернизированной перемешивающей решетки, разработанной ПАО «МСЗ» [20], от указанных [15] — размещение в каждой трехгранной ячейке двух лопаток вместо одной (рис. 4). Опыты проведены с помощью установки «Трассер» на 19-стержневой необогреваемой модели ТВС ВВЭР. Модель оснащали пятью типами модернизированной решетки, отличающимися между собой углом отгиба двух лопаток. Оснащение ТВС ВВЭР модернизированной решеткой второго типа вместо решетки типа «порядная прогонка» приводит к заметному повышению эффективности перемешивания теплоносителя при их почти одинаковом коэффициенте гидравлического сопротивления



Р и с. 4. Модернизированная перемешивающая решетка [16]

~0,57. Для полного выявления эффективности использования такой решетки необходимы исследования кризиса теплообмена.

Формирование пластинчатых дефлекторов по торцам каждой шестигранной ячейки в перемешивающей решетке при ее изготовлении из цельного листа способствует закрутке потока теплоносителя между твэлами [22]. Из совокупности трех соседних дефлекторов образованы завихрители потока, направленные в трех углах ячейки по часовой, в других трех углах — против часовой стрелки.

Размещение смесительных элементов на ободе решетки повысит интенсивность перемешивания теплоносителя [23 — 26]. Наличие на верхней кромке обода отбойников в виде отогнутых лопаток способствует направлению части потока теплоносителя от периферии канала к его центру [23, 24]. Для закрутки потока теплоносителя по периферии ТВС на гранях обода под углом к оси решетки формируют специальные просечки [25] и профильные опорные выступы [26]. Такой подход обеспечит создание не только закрутки, но и плотной упаковки ТВС между собой в активной зоне ВВЭР [25, 26].

Заключение. Для повышения мощности ТВС ВВЭР разработан широкий набор конструкций решеток со смесительными элементами. Однако испытания проведены только с частью из них. По их результатам для дальнейших исследований выбраны перемешивающие решетки типа «вихрь» и «прогонка»: первую размещают в двух верхних пролетах между дистанционирующими решетками на ТВС-2М, вторую — ниже, в двух следующих пролетах, типа «порядная прогонка», которую устанавливают в трех верхних пролетах на ТВСА-Т.MOD2 и ТВСА-12PLUS. Такой подход к их размещению обусловлен различиями в характере и протяженности зоны воздействия смесительных элементов на поток теплоносителя, а также гидравлическим сопротивлением ТВС. Такими элементами в решетках типа «вихрь» и «прогонка» являются выполненные на гранях трубчатых ячеек отгибы, в решетке типа «порядная прогонка» — отогнутые лопатки, размещаемые на верхних кромках полос вблизи мест их пересечения.

К основному воздействию на поток отгибов в решетке типа «вихрь» можно отнести образование локальных вихревых течений, вызываю-

щих турбулизацию пристенного слоя теплоносителя в пределах отдельных ячеек ТВС, рассеяние капель и их осаждение на поверхность ТВЭлов. Под воздействием отгибов в решетке типа «прогонка» и отогнутых лопаток в решетке типа «порядная прогонка» создаются поперечные течения между рядами ТВЭлов, способствующие межъячейковому перемешиванию. Вследствие ограниченности теплогидравлических исследований поиск эффективных конструкций решеток со смесительными элементами нельзя считать завершенным. В частности, это относится к модернизированной перемешивающей решетке [17].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Енин А.А., Зарубин М.Г., Иванов Р.С. и др. Структура решетки тепловыделяющей сборки ядерного реактора. Патент № 2273062 С1. — Бюл. «Изобретения. Полезные модели», 2006, № 9 (электронная версия).
- Рыжов С.Б., Мохов В.А., Васильченко И.Н. и др. Способ и устройство перемешивания теплоносителя. Патент № 2391725 С1. — Там же, 2010, № 16 (электронная версия).
- Васильченко И.Н., Кушманов С.А., Махин В.М. и др. Разработка интенсификаторов теплообмена для ТВС ВВЭР. Тезисы докл. 7-й Межд. научно-технич. конф. Москва, 26—27 мая 2010 г., с. 132—133.
- Лисенков Е.А. Экспериментальные исследования в обоснование выбора перемешивающих решеток для применения в ТВС-2М. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2018, вып. 2, с. 64—79.
- Бабенко Ю.Н., Верещак В.Г., Иванов А.В. и др. Структура решетки для тепловыделяющей сборки ядерного реактора. Патент № 2389091 С1. — Бюл. «Изобретения. Полезные модели», 2010, № 13 (электронная версия).
- Бабенко Ю.Н., Цирин С.И., Крапивцев В.Г., Солонин В.И. Разработка сотовой конструкции перемешивающей решетки ТВС реактора типа ВВЭР. — В сб.: 6-я научно-технич. конф. «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». Подольск, АО ОКБ «Гидропресс», 26—30 мая 2009 г., доклад 119.
- Васильченко И.Н., Волков С.Е., Вьялицин В.В. и др. Расчетно-экспериментальные исследования в обоснование конструкции ТВС АЭС-2006 с повышенными параметрами. — В сб.: 14-й Межд. форум по тепло- и массообмену. Минск, 10—13 сентября 2012 г., доклад в секции 4 (электронная версия).
- Лощинин В.М., Пометько Р.С., Селиванов Ю.Ф., Смирнов А.М. Теплогидравлические исследования в обоснование проекта ВВЭР-1200. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерно-реакторные константы, 2016, вып. 5, с. 59—71.
- Селиванов Ю.Ф., Лощинин В.М., Разживин И.В. Влияние на критическую мощность ТВС ВВЭР сотовых решеток, интенсификаторов теплообмена и перемешивания теплоносителя. — Атомная энергия, 2017, т. 123, вып. 6, с. 312—318.
- Кобзарь Л.Л., Косоуров К.Б., Олексюк Д.А. и др. Сравнение эффективности решеток-интенсификаторов тепломассообмена разной конструкции в экспериментах на 37-стержневых моделях ТВС реактора ВВЭР-1000. — В сб.: 8-я научно-технич. конф. «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». Подольск, ОКБ «Гидропресс», 28—31 мая 2013 г., доклад 105.
- Кобзарь Л.Л., Олексюк Д.А. Экспериментальные исследования эффективности дистанционирующих решеток-интенсификаторов тепломассообмена. — Атомная энергия, 2018, т. 125, вып. 5, с. 258—263.
- Васильченко И.Н., Кушманов С.А., Вьялицин В.В. Сборка тепловыделяющая ядерного реактора. Патент № 2594897 С1. — Бюл. «Изобретения. Полезные модели», 2016, № 23 (электронная версия).
- Самойлов О.Б., Романов А.И., Кайдалов В.Б. и др. Перемешивающая решетка тепловыделяющей сборки ядерного реактора. Патент № 2383954 С1. — Там же, 2010, № 7 (электронная версия).
- Перепелица Н.И., Пометько Р.С., Бочаров П.А., Романов А.И. Дистанционирующая решетка для тепловыделяющей сборки. Патент № 2249865 С1. — Там же, 2005, № 10 (электронная версия).
- Бородин С.С., Дмитриев С.М., Легчанов М.А., Хробостов А.Е. Расчетно-экспериментальные исследования массообмена потока теплоносителя в ТВСА реакторов типа ВВЭР при использовании перемешивающих решеток. — В сб.: 6-я научно-технич. конф. «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». Подольск, АО ОКБ «Гидропресс», 26—30 мая 2009 г., доклад 128.
- Перепелица Н.И. Интенсивность перемешивания теплоносителя и гидравлическое сопротивление решеток ТВС. — Атомная энергия, 2019, т. 126, вып. 3, с. 156—159.
- Иванов А.И., Сенин И.С., Цирин С.И. и др. Структура пластинчатой решетки для тепловыделяющей сборки. Патент № 2581620 С1. — Бюл. «Изобретения. Полезные модели», 2016, № 11 (электронная версия).
- Евсигнеев И.В., Кострицин В.А., Колосов М.И. Перемешивающая и дистанционирующая решетки для тепловыделяющей сборки ядерного реактора. Патент № 2638647 С2. — Там же, 2017, № 31 (электронная версия).
- Самойлов О.Б., Фальков А.А., Лукьянов В.Е. и др. Расчетно-экспериментальные исследования в обоснование перемешивающих решеток-интенсификаторов для ТВСА ВВЭР-1000. — В сб.: Межвед. сем. «Теплогидравлические аспекты безопасности активных зон, охлаждаемых водой и жидкими металлами». Обнинск, ГНЦ РФ — ФЭИ, 15—17 октября 2008 г., с. 53—64.
- Самойлов О.Б., Куприянов А.В., Фальков А.А. и др. Экспериментальные исследования теплотехнических характеристик ТВСА с перемешивающими решетками. — Атомная энергия, 2014, т. 116, вып. 1, с. 11—15.
- Лукьянов В.Е., Фальков А.А., Шипов Д.Л., Носков А.С. Теплогидравлические характеристики усовершенствованного топлива ТВСА-Т.MOD2 и ТВСА-

- 12PLUS. — В сб.: 11-я Межд. научно-технич. конф. «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». Подольск, АО ОКБ «Гидропресс», 21—24 мая 2019 г., доклад 097.
22. **Чинов А.В., Зарубин М.Г., Гончаров Ю.В.** Дистанционирующая решетка тепловыделяющей сборки ядерного реактора. Патент № 2632572 С1. — Бюл. «Изобретения. Полезные модели», 2017, № 28 (электронная версия).
23. **Синников Ю.Г., Зарубин М.Г., Енин А.А. и др.** Тепловыделяющая сборка ядерного реактора. Патент № 2163036 С2. — Там же, 2001, № 4 (электронная версия).
24. **Аксенов П.М., Лернер А.Е., Лузан Ю.В.** Тепловыделяющая сборка ядерного реактора. Патент № 2510538 С1. — Там же, 2012, № 2 (электронная версия).
25. **Чапаев И.Г., Батуев В.И., Бычихин Н.А. и др.** Тепловыделяющая сборка ядерного реактора. Патент № 2197021 С2. — Там же, 2003, № 2 (электронная версия).
26. **Афанасьев В.Л., Рожков В.В., Чапаев И.Г. и др.** Тепловыделяющая сборка и активная зона водо-водяного ядерного реактора. Патент № 2216056 С2. — Там же, 2003, № 31 (электронная версия).

Поступила в Редакцию 3.09.19

УДК 533.72

АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ В ВАКУУМНО-ЦЕЗИЕВОЙ СИСТЕМЕ ТЕРМОЭМИССИОННОГО РЕАКТОРА-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ МЕТОДАМИ КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ

*Абанников В.В. (ООО «Техноим», г. Москва), Клосс Ю.Ю., Шайхатаров О.К.,
Додулад О.И., Щербаков Д.В. (МФТИ, г. Долгопрудный, НИЦ «Курчатовский ин-т», г. Москва),
Любимов Д.Ю. (МФТИ, г. Долгопрудный, НПО «Луч», г. Подольск)
e-mail: dmitrii.shcherbakov@phystech.edu*

Одним из перспективных направлений в современной физике является создание космических аппаратов, способных развивать высокую энергетическую мощность, например, для круглосуточного наблюдения за техногенными и природными процессами в различных регионах Земли. Их необходимая мощность не может быть достигнута с помощью традиционных солнечных энергетических установок, поэтому создание ядерных установок является востребованной задачей. В проектных разработках космических ядерных энергетических установок получили развитие термоэмиссионные реакторы-преобразователи на тепловых и промежуточных нейтронах [1]. Одним из элементов такого реактора является электрогенерирующий канал (ЭГК), содержащий вентилируемый ТВЭЛ с ядерным топливом на основе диоксида урана. На работоспособность многоэлементного ЭГК с оксидным ядерным топливом с сообщающимися полостями ТВЭЛА и межэлектродного зазора и, в частности, на изменение выходных электрических характеристик влияют многочисленные факторы, например, наличие в зазоре продуктов деления, образующихся в топливе при работе реактора [2]. Металлические продукты деления и их оксиды попадают в межэлектродный зазор, диффундируя через ловушку и газоотводящий тракт, конденсируясь на стенках. Газообразные

продукты деления, например, криптон и ксенон не конденсируются в ловушке и газоотводящем тракте, попадают в зазор и далее в вакуумно-цезиевую систему [3]. Продукты β -распада криптон и ксенон могут влиять на выходную электрическую мощность ЭГК из-за адсорбции на поверхности коллектора [4]. Для обоснования работоспособности и отработки ЭГК проводятся испытания в петлевом канале. С помощью гамма-спектрометрической системы, размещенной на вакуумном трубопроводе линии откачки, регистрируются радионуклиды и измеряется объемная активность откачиваемых газов [5]. Проблемной задачей в этом случае является определение давления и потока газообразных продуктов деления в генераторе пара рабочего тела цезия, поскольку оценки выхода радиоактивных газов из топлива трудоемки и не позволяют с приемлемой точностью определить поток через газоотводное устройство в межэлектродный зазор. Примесные газы, в частности, монооксид углерода взаимодействует с паром цезия при температуре ниже 1000 К при относительно высоком давлении, что приводит к образованию конденсированных фаз углерода и карбоната цезия по реакции $3\text{CO} + 2\text{Cs} = 2\text{C} + \text{Cs}_2\text{CO}_3$ [3]. Конденсация углерода и карбоната цезия на стенках отверстий в испарителе может приводить к изменению их геометрии и, воз-