

УДК 621.039.577-182.3

*А. П. АХРАМОВИЧ<sup>1</sup>, И. В. ВОЙТОВ<sup>2</sup>, В. П. КОЛОС<sup>1</sup>*

**О РАБОТОСПОСОБНОСТИ РЕАКТОРА С МИКРОТВЭЛАМИ.  
АНАЛИЗ ОРГАНИЗАЦИИ ТЕПЛОСЪЕМА В АКТИВНЫХ ЗОНАХ**

*<sup>1</sup>Институт энергетики НАН Беларуси, Минск, Беларусь,  
e-mail: ahr@bas-net.by,*

*<sup>2</sup>Белорусский государственный технологический университет, Минск, Беларусь,  
e-mail: rektor@belstu.by*

Проанализирован теплосъем в ядерных реакторах с микротвэлами. Определена область устойчивой фильтрации теплоносителя в топливном слое. Установлено, что стабильность теплосъема не зависит от величины объемного энерговыделения в активной зоне, на нее влияют соотношения термодинамических параметров теплоносителя на входе и выходе из топливного слоя и уровень турбулизации потока в нем. Показано, что в ТВС насыпного типа гармонично сочетаются все достоинства топлива в виде микротвэлов и бокового подвода теплоносителя к слою.

*Ключевые слова:* тепловыделяющая сборка (ТВС), микротвэл, устойчивость теплосъема, энергонапряженность.

*A. P. AKHRAMOVICH<sup>1</sup>, I. V. VOITOV<sup>2</sup>, V. P. KOLOS<sup>1</sup>*

**ON THE PERFORMANCE OF A REACTOR WITH MICRO FUEL.  
ANALYSIS OF HEAT REMOVAL ORGANIZATION IN ACTIVE ZONES**

*<sup>1</sup>The Institute of Power Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus,  
e-mail: ahr@bas-net.by,*

*<sup>2</sup>Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus,  
e-mail: rektor@belstu.by*

Heat removal in nuclear reactors with micro fuel has been analyzed. The area of heat transfer fluid sustainable filtration in the fuel bed has been defined. It appears that heat removal stability does not depend on the size of the core power density. It is influenced by the ratio of thermodynamic parameters of coolant inlet and outlet of the fuel bed and by the level of flow turbulence. It shows that the bulk fuel assembly harmoniously combines all the advantages of micro fuel and the side inlet of coolant in the bed.

*Keywords:* fuel assembly, micro fuel, heat removal stability, power density.

**Введение.** Повышение безопасности ядерных реакторов в настоящее время является одной из самых острых проблем энергетики. Аварии с радиоактивными выбросами наносят ощутимый вред окружающей среде, здоровью человека, а свертывание строительства атомных станций отрицательно отражается на энерговооруженности народного хозяйства. К тому же ядерная энергетика совместно с солнечной могут сыграть важную роль в борьбе с «парниковым» эффектом [1–3] и достойной альтернативы им пока не существует. Следует ожидать, что они заметно потеснят на мировом рынке традиционную углеводородную энергетику, но только в том случае, если технологии переработки топлива и захоронения радиоактивных отходов будут экологически безвредными, а реакторы безопасными.

Различные материалы (в первую очередь, топливо), находящиеся в активной зоне действующей установки, являются главным источником опасности. Поэтому снижение количества ядерного горючего в активной зоне и уменьшение ее объема при переходе на высокоэнергонапряженные реакторы позволят не только сохранить прежний уровень потенциальной угрозы при увеличении суммарной мощности ядерных установок, но дадут возможность даже снизить ее. Кроме того, реакторы с величинами удельной мощности и нейтронного потока на порядок выше, чем

у ныне существующих, будут активно способствовать развитию биотехнологии, медицины, материаловедения, ядерных силовых установок, оборонной, ракетной и космической техники.

К настоящему времени ядерные реакторы со стержневыми твэлами достигли своего предела по удельной мощности  $0,2-0,5$  МВт/дм<sup>3</sup>, нейтронному потоку  $5 \cdot 10^{15}$  нейтрон/(см<sup>2</sup>·с). При разработке первых энергетических ядерных реакторов специалисты понимали, что стержневые твэлы не самая удачная конструкция. По сравнению с ней топливо в виде шариков диаметром порядка миллиметра с защитной оболочкой для удержания радиоактивных продуктов деления, получивших название «микротвэлы», обладает весомыми положительными свойствами – сыпучестью, огромной удельной поверхностью и необычайной стойкостью, которые дают следующие преимущества.

1. Очень большая удельная поверхность теплосъема позволяет иметь в реакторах существенно более высокую удельную мощность и температуру теплоносителя по сравнению с реализованными на практике. Это важно как для снижения массогабаритных характеристик (в том числе и количества топлива в активной зоне), так и для получения высокопотенциального тепла (например, для нужд металлургии) и больших нейтронных потоков для технологических и исследовательских целей.

2. Малые температурные перепады в микротвэлах вызывают незначительные температурные напряжения. Топливо в активной зоне не несет конструкционных нагрузок, механическое воздействие на него также минимально. Все эти факторы способствуют надежной эксплуатации реактора.

3. Изменение конфигурации микротвэлов вследствие радиационного распухания топлива незначительно влияет на гидродинамику и теплообмен в активной зоне, что позволяет достичь более глубокого выгорания делящегося вещества. Это положительно сказывается на экономике топливного цикла и экологии окружающей среды.

4. Наличие возможности распределения потока теплоносителя как по радиусу, так и по высоте активной зоны способствует более рациональной организации теплосъема, при которой можно избежать «горячих пятен», сильно ограничивающих энергонапряженность.

5. Сыпучесть микротвэлов позволяет использовать пневмо- или гидротранспорт. Его применение резко сокращает время и затраты на перегрузку реактора и дает возможность выйти на более высокий уровень автоматизации производства и переработки топлива и приблизиться к тому, что остеклованные отходы по биологической вредности становятся сравнимыми с природным ураном. Изготовление микротвэлов с использованием технологии «кипящего слоя» значительно проще и на 40 % дешевле производства стержневых твэлов [4].

6. Микротвэлы с многослойной оболочкой способны эффективно удерживать продукты деления при любых авариях [4, 5], что позволяет создать на их основе безопасный ядерный реактор.

Однако активная зона в виде неподвижной засыпки, защемленной между решетками, обладает и рядом существенных недостатков.

1. Вследствие силового воздействия потока теплоносителя на микротвэлы последние стремятся перекрыть свободное пространство. Это приводит к росту гидравлического сопротивления слоя и перераспределению потока по его сечению. Возникает клапанный эффект [6].

2. Существует предел скорости потока сквозь неподвижный зернистый слой (существенно меньший скорости звука), превысить который невозможно никаким повышением входного давления [7].

3. В плотном слое образуется непроточная зона, лимитирующая интенсивность теплосъема [8].

4. Наличие режимов с неустойчивой фильтрацией газа в тепловыделяющем слое сужает область приемлемых термодинамических параметров теплоносителя на входе-выходе из реактора и значительно усложняет его управление на частичных и переходных режимах [9].

Чтобы избежать этих недостатков или снизить негативный эффект, вызванный ими, необходимо изменить структуру топливного слоя и рационально организовать подвод теплоносителя, осуществив его распределение по высоте и радиусу активной зоны в соответствии с величиной объемного энерговыделения.

**Особенности расчета энергонапряженных реакторов.** Создание высокоэнергонапряженных ядерных реакторов с микротвэлами является сложной научно-технической задачей. Она может быть решена только на основе экспериментальных данных высокой точности, с помощью схем и методов математического моделирования, позволяющих проводить взаимозависимый (сопряженный) расчет размеров и форм всех элементов активной зоны с одновременным определением термогидродинамических и нейтронно-физических параметров.

Существуют прямая и обратная задачи теплофизики реактора, отличающиеся своей постановкой. В прямых задачах, исходя из размеров конструктивных элементов и их свойств, входных параметров теплоносителя, уравнений связи и функции тепловыделения, определяются температурное поле в активной зоне, давление и скорость движения теплоносителя. С появлением мощной вычислительной техники и разработки эффективных расчетных схем достигнуты значительные успехи в решении данных задач. Не составляет труда провести расчеты полей термогидродинамических параметров для любых конструкций тепловыделяющих сборок при работе реактора на частичных, переходных, штатных и нештатных режимах.

Намного скромнее успехи в области решения обратных задач – определения размеров, количества и форм ТВС, обеспечивающих заданные характеристики теплопереноса в активной зоне. Несмотря на кажущуюся простоту (эти задачи, как правило, одномерные – профили конструктивных элементов не бывают многомерными), они намного сложнее прямых задач. Для их решения отсутствует развитый математический аппарат, к тому же нет должного обмена информацией между специалистами, так как обратные задачи имеют явно прикладной характер, а разработка серьезных аппаратов составляет коммерческую, а в некоторых случаях и государственную тайны. Поэтому в открытой печати редко встречаются даже общетеоретические работы, касающиеся моделирования энергонапряженных реакторов как единого устройства.

Очевидно, что приоритеты ценностей при моделировании физических явлений и объектов для решения прямых и обратных задач совершенно различны, иногда диаметрально противоположны. Поэтому для сопряженной задачи поиска оптимальных размеров и форм конструктивных элементов активной зоны, термогидродинамических параметров теплоносителя и нейтронно-физических характеристик приходится соединять в одно целое, на первый взгляд, несоединяемое – прямую и обратную задачи. Необходимо одновременно определять и граничные условия, и поля термогидродинамических и нейтронно-физических параметров. Сопряженный расчет позволяет достигнуть глубокой оптимизации реактора, сделав его предельно эффективным.

**Конструкции ТВС и анализ теплосъема в них.** Обладая физико-математическим обеспечением проектирования реакторов, основанном на сопряженном расчете, проанализируем организацию теплосъема в активных зонах с топливом сферической формы. Особое внимание уделим термомеханической устойчивости. Незначительное увеличение (случайное возмущение) энерговыделения вызывает рост температуры теплоносителя и соответственно увеличение его вязкости и уменьшение плотности. Это приводит к повышению гидравлического сопротивления участка слоя и снижению массовой скорости фильтрации, что способствует дальнейшему увеличению температуры. При определенных условиях возникает лавинообразное нарастание температуры участка слоя, происходит перегрев топлива, нарушается физика реактора, появляются сложности в управлении.

Существует множество конструкций ТВС с микротвэлами. Большинство из них не имеют под собой серьезной теоретической и экспериментальной основы. Далее будут рассмотрены только реакторы со сборками, обладающими отличиями принципиального характера, проработанные на уровне не ниже эскизного проекта.

Вначале рассмотрим организацию теплосъема в широко известных высокотемпературных графитогазовых ректорах. Основу топливной загрузки здесь составляют микротвэлы, представляющие собой шары из карбида урана диаметром 0,15–0,20 мм, покрытые чередующимися слоями графита и карбида кремния. Наружный диаметр готовых микротвэлов составляет около 0,5 мм. Вместе с графитовым порошком они заполняют объем в шаровых изделиях из графита (твэлах) диаметром 60 мм. Эти реакторы имеют очень простой гидравлический тракт активной зоны – теплоноситель прокачивается через плотный слой шаровых твэлов в аксиальном направлении.

Реактор AVR, построенный в ФРГ [10], принадлежит к этому типу установок, его характеристики приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Основные характеристики реактора AVR (теплоноситель – гелий)

Параметр	Значение
Тепловая мощность, МВт	49
Диаметр активной зоны, м	3,0
Высота активной зоны, м	3,0
Расход теплоносителя, кг/с	13,6
Давление теплоносителя, МПа	1,0
Температура теплоносителя, К:	
на входе	473
на выходе	1123
Диаметр графитовой оболочки твэла, мм	60
Число твэлов в реакторе, шт.	7500
Объемное тепловыделение, кВт/дм <sup>3</sup>	2,3
Максимальная температура топлива, К	1523
Максимальная температура оболочки, К	1223
Выгорание, кДж/кг	1,3×10 <sup>10</sup>
Удельная нагрузка, кВт/кг	3000
Максимальный тепловой поток, кВт/м <sup>2</sup>	58
Средний тепловой поток, кВт/м <sup>2</sup>	46

Применение термостойких материалов и невысокая удельная мощность позволяют довести температуру газа на выходе из активной зоны до 1123 К (в последнем варианте до 1223 К), что на 100–200 К превышает температуру теплоносителя на выходе таких реакторов, как Dragon (Англия) и HTGR (США), где использованы трубчатые твэлы.

Опираясь на результаты исследований процессов переноса в тепловыделяющем зернистом слое [6–9], находим область устойчивой фильтрации гелия в реакторах типа AVR, описываемую следующим неравенством:

$$\Gamma = 0,26 \left[ \operatorname{erf} (0,85 - \operatorname{Re}/1000) - 3,1 \right] \ln \frac{P_1}{P_2} + 0,58 \left[ \operatorname{erf} (\operatorname{Re}/1000 - 1,0) - 2,0 \right] \ln \frac{T_1}{T_2} < 1,$$

где  $\operatorname{Re} = \rho V d / \mu$  – число Рейнольдса;  $\rho$ ,  $V$ ,  $\mu$ ,  $P_1$ ,  $T_1$  – соответственно плотность, скорость потока в незагруженном сечении, динамическая вязкость, давление и температура теплоносителя на входе в топливный слой,  $P_2$ ,  $T_2$  – давление и температура на выходе из него.

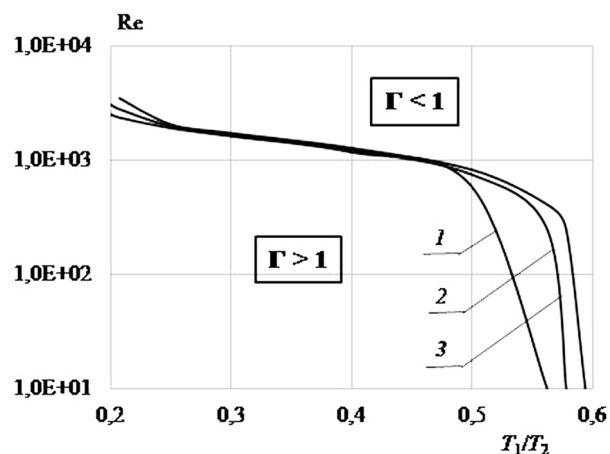


Рис. 1. Границы области устойчивого теплосъема, как функции  $\operatorname{Re}$  и соотношений термодинамических параметров  $T_1/T_2$ ,  $P_1/P_2$ : 1 –  $P_1/P_2 = 1,05$ ; 2 –  $P_1/P_2 = 1,1$ ; 3 –  $P_1/P_2 = 1,15$

На рис. 1 показаны границы области устойчивого теплосъема. Как ни странно, они не зависят от величины объемного тепловыделения, а определяются уровнем турбулизации потока в топливном слое и термодинамическими параметрами теплоносителя на входе-выходе из него. Качественно эти границы похожи для всех газовых реакторов с топливом сферической формы независимо от его расположения в активной зоне и свойств теплоносителя.

Реакторы типа AVR обладают рядом достоинств: отсутствие конструктивных элементов в топливном слое, простота загрузки и выгрузки топлива, устойчивый теплосъем (главным образом, за счет турбулизации пото-

ка при обтекании твэлов большого диаметра). Однако низкое объемное тепловыделение не позволяет считать данный реактор многоцелевым.

В СССР пытались улучшить термогидродинамику топливного слоя за счет движения твэлов (диаметром 60 мм) по своеобразным магистралям в активной зоне [11] и деления слоя на части [12], но добиться заметного роста интенсивности теплосъема в этих реакторах (канальный и модульный типы) не удалось. Чтобы ощутимо увеличить энергонапряженность активной зоны, необходимо диаметр шарового элемента уменьшить с 60 мм (AVR) до 1–3 мм. В этом случае значительно увеличивается теплоотдающая поверхность и охлаждение свободно засыпанных микротвэлов происходит при малых температурных перепадах в них.

При сохранении размеров активной зоны потери давления на слое микротвэлов будут в десятки раз выше, чем в реакторе со стержневыми твэлами. Таким образом, возникает проблема рационального расположения и охлаждения топлива для удержания величины потерь давления в активной зоне в допустимых пределах.

Решая эту задачу, М. Родин с сотрудниками предложил следующую схему отвода тепла [13]. Микротвэлы располагаются плотным слоем в гексагональных коробках (рис. 2). Перфорированная трубка продевается через центральные отверстия в коробках и служит для фиксации их в активной зоне и отвода горячего теплоносителя. Холодный теплоноситель подается в специальные выемки с отверстиями на ребрах шестигранника и проходит через слой в радиальном направлении. Разработчики предполагали, что в реакторе с этой сборкой можно достичь величины энергонапряженности 7,5 МВт/дм<sup>3</sup> при температуре газа на выходе 2573 К. На самом деле реактор с такими параметрами неработоспособен. При исследовании устойчивости теплосъема нами установлено, что при выходе на штатный режим работы приходится пересекать полосу неустойчивого, рискованного теплосъема, возникшую из-за большой разницы между выходной и входной температурами теплоносителя.

Характеристики еще одного реактора, разработанного М. Родиным с сотрудниками, представляются вполне реальными (табл. 2).

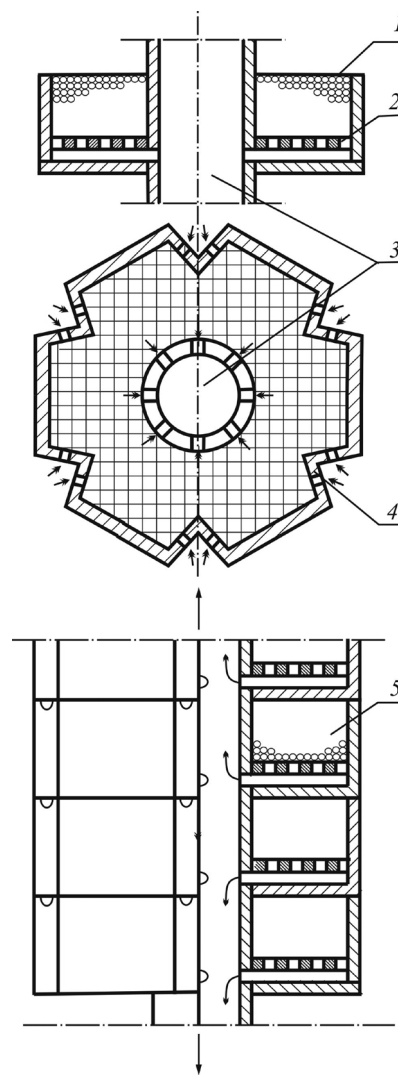


Рис. 2. Шестигранная ТВС с микротвэлами: 1 – топливный слой; 2 – экран; 3 – отводная труба; 4 – входное отверстие; 5 – сборка плоских топливных элементов

Т а б л и ц а 2. Основные характеристики реактора с шестигранными ТВС

Параметр	Значение
Тепловая мощность, МВт	50
Объем активной зоны, дм <sup>3</sup>	66
Масса <sup>235</sup> U, кг	160
Число ТВС, шт.	18
Высота топливного слоя в коробке, см	1,27
Диаметр микротвэлов, мм	0,2
Объемное тепловыделение в топливе, МВт/дм <sup>3</sup> :	
среднее	2,5
максимальное	3,75
Давление газа на входе, МПа	4,13
Падение давления на входном устройстве, МПа	0,105
Отношение мощности на прокачку к мощности реактора	0,023
Температура газа, К:	
на входе	423
на выходе	1253

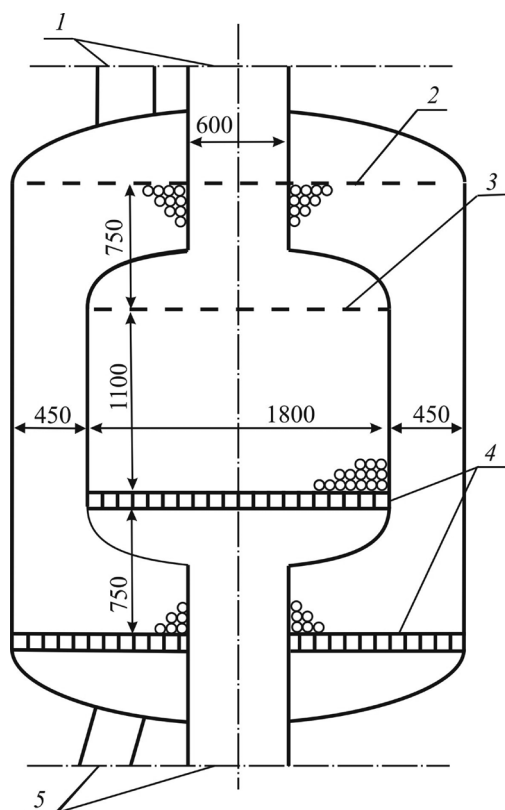


Рис. 3. Быстрый реактор со слоем микротвэлов и аксиальной прокачкой теплоносителя: 1 – вход теплоносителя; 2 – отражатель; 3 – уровень засыпки топлива; 4 – перфорированные пластины; 5 – выход теплоносителя

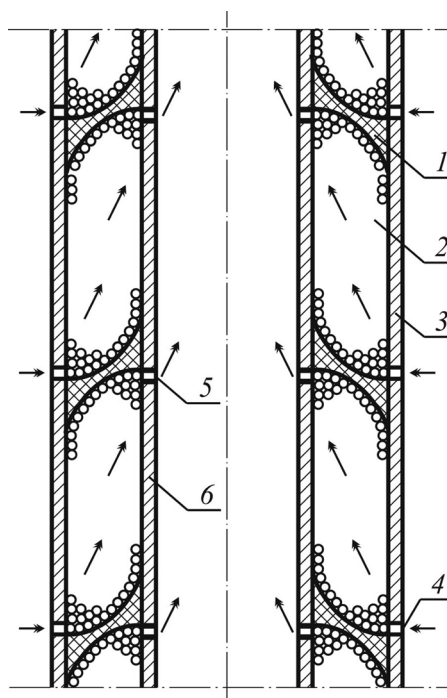


Рис. 4. ТВС с фиксированным слоем между коаксиальными трубами: 1 – диафрагма; 2 – топливный слой; 3 – внешняя труба; 4 – вход воды; 5 – выход пара; 6 – внутренняя труба

В Брукхэйвенской Национальной лаборатории разработан проект установки (рис. 3) с микротвэлами, охлаждаемыми жидкометаллическим теплоносителем – «быстрый реактор со слоем» [14]. Его активная зона выполнена в виде одного слоя микротвэлов, что, естественно, требует большой мощности для прокачки теплоносителя. Чтобы удержать ее в разумных пределах, создатели проекта пошли на увеличение размера микротвэла, доведя его диаметр до 6–10 мм.

Следует отметить, что проектом предусмотрены реакторы с аксиальной и радиальной подачей теплоносителя к слою. В табл. 3 приведены основные параметры этих аппаратов. Они не так ярко демонстрируют преимущества топлива сферической формы, как, например, результаты [13], но являются достаточно высокими по сравнению со стержневыми реакторами. Поместив в одной таблице значения параметров обоих реакторов, можно показать, какой бывает эффект от продуманной схемы прокачки теплоносителя.

Т а б л и ц а 3. Характеристики быстрых реакторов со слоем микротвэлов

Параметр	Аксиальная прокачка	Радиальная прокачка
Тепловая мощность активной зоны, МВт	837	824
Тепловая мощность зоны воспроизводства, МВт	59	57
Объем активной зоны, дм <sup>3</sup>	1540	306
Масса Pu, кг	2800	810
Диаметр микротвэлов в активной зоне (PuC+UC), мм	5,5	3,0
Диаметр микротвэлов в зоне воспроизводства (UC), мм	6,25	3
Объемное тепловыделение в активной зоне, МВт/дм <sup>3</sup>	0,18	0,89
Общая мощность на прокачку, кВт	2500	2200
Температура теплоносителя, К:		
на входе	563	563
на выходе	923	923

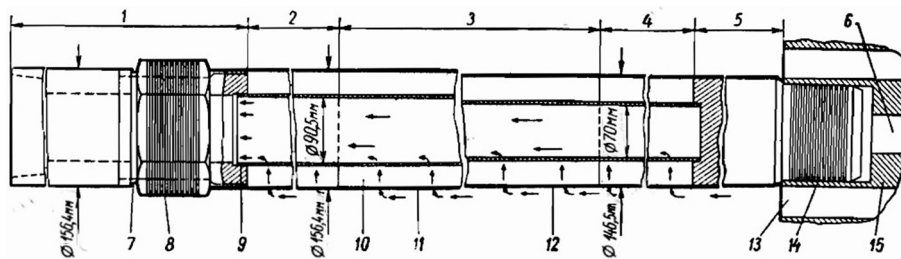


Рис. 5. Пористая ТВС с микровзлами: 1, 5 – графитовый отражатель (60 см); 2, 4 – зона воспроизводства (80 см); 3 – активная зона (100 см); 6 – канал, соединенный с газодувкой; 7 – паз для механизма перегрузки; 8, 14 – уплотнение; 9 – пористая втулка; 10 – засыпка микровзлов; 11 – втулка раздачи газа; 12 – удерживающая сетка; 13 – вход газа; 15 – опорная решетка

Переход от традиционной (аксиальной) подачи жидкого натрия в активную зону к боковой (радиальной) подаче позволяет при том же топливе увеличить удельное энерговыделение более чем в 4 раза и примерно в 3,5 раза уменьшить загрузку плутония, ощутимо снизив потенциальную опасность реактора.

Своеобразная конструкция ТВС (рис. 4) разработана в лаборатории CISE-Segrate (Милан) [15]. Две коаксиальные цилиндрические трубки скреплены диафрагмами, между которыми размещены микровзлы. Вода в качестве теплоносителя подается в специальные отверстия во внешней трубе, проходит топливный слой, снимает тепло, претерпевая при этом фазовый переход, и в виде перегретого пара через отверстия поступает во внутреннюю трубу, двигаясь по которой покидает активную зону.

Отметим, что форма диафрагм ТВС глубоко не прорабатывалась, а, вероятнее всего, выбиралась интуитивно; эти диафрагмы вызывают срыв фильтрационного потока, что сильно лимитирует интенсивность теплосъема.

Конструкции ТВС [13, 15] аналогичны тем, что желаемое распределение теплоносителя по их высоте достигается с помощью специальных раздаточных устройств, которые требуют разделения топливного слоя на секции. Диафрагмы (перегородки) полностью исключают возможность оперативной перегрузки ядерного горючего пневмо- и гидротранспортом. Идеи, воплощенные в этих конструкциях, в настоящее время малоперспективны.

Принципиально иной подход к решению задачи распределения потока газа по высоте активной зоны применен в конструкции ТВС [16], показанной на рис. 5. Здесь микровзлы также окружены непосредственно теплоносителем, что уменьшает содержание посторонних материалов в активной зоне и увеличивает поверхность теплоотдачи. Они располагаются в кольцевом пространстве шириной 3,5 см, образуемом внутри пористой втулкой из карбида кремния, а снаружи металлической сеткой, которая придает конструкции устойчивость. К сетке прилегает перфорированная втулка для равномерной раздачи теплоносителя.

Газ подается через входные отверстия, проходит через слой частиц во внутреннюю полость ТВС и далее вверх через диффузор и центральное отверстие графитового концевика. Положительной осо-

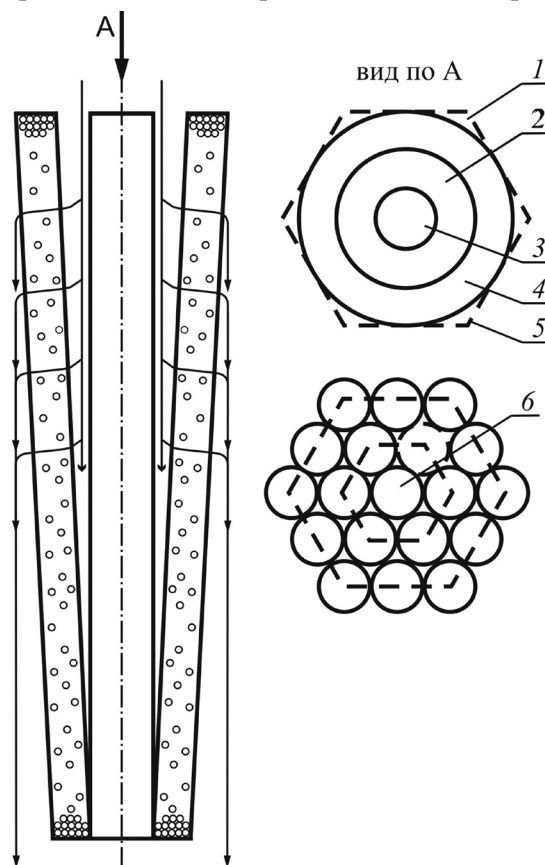


Рис. 6. Кассета плотного изогнутого слоя (модель MLX): 1 – межкассетное пространство; 2 – распределительный канал; 3 – металлогидридный замедлитель; 4 – слой микровзлов; 5 – граница ячейки; 6 – сборка

бенностью этой конструкции является отсутствие разделяющих диафрагм. Однако наличие раздаточной перфорированной втулки с заведомо высоким гидравлическим сопротивлением предотвращает низкий расход теплоносителя через ТВС.

Использование ряда идей по стабилизации распределения теплоносителя [17–20] для улучшения характеристик ТВС не позволило заметно увеличить объемное тепловыделение. В этих конструкциях на переходных режимах проявляется неустойчивость фильтрации газа, что приводит к закручиванию потока в отводящих каналах и нарушению теплогидравлического подобия.

Одновременно с появлением вышерассмотренных конструкций ТВС в США предложена сборка, получившая название «кассета плотного изогнутого слоя – модель MLX» [21]. Она содержит (рис. 6) цилиндрический металлгидридный замедлитель; слой топлива набирается из шаров делящегося вещества малого диаметра. Активная зона состоит из ряда таких элементов, тесно упакованных и расположенных приблизительно по форме цилиндра. Теплоноситель (воздух) входит в ТВС сверху, течет по профилированному распределительному каналу, одновременно подается в радиальном направлении в топливный слой и проходит через него. Горячий воздух покидает активную зону по пространству, окружающему сборку.

Профилирование канала ТВС дает возможность организации желаемого распределения потока газа без лимитирующих теплосъем и затрудняющих перегрузку вспомогательных конструктивных элементов внутри топливного слоя, как это имеет место в моделях [13, 15], и позволяет существенно увеличить надежность теплосъема в активной зоне по сравнению с [16]. Однако устранить срыв и застой потока теплоносителя вблизи торцов топливного слоя в данном проекте не удалось.

Рассмотрим насыпные ТВС (рис. 7) и активную зону (рис. 8). В этой конструкции теплоноситель, выходя из топливного слоя, уже не попадает в межкассетное пространство, как

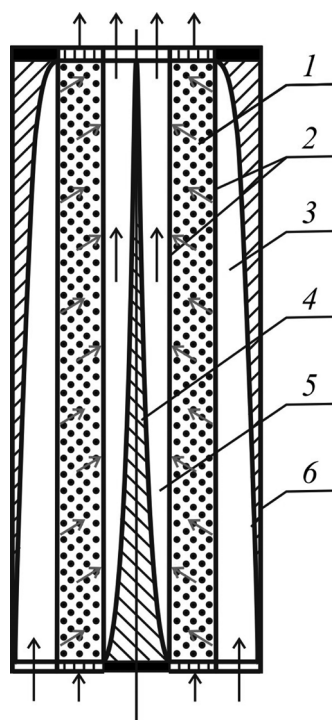


Рис. 7. Схема насыпной ТВС: 1 – слой из микротвэлов; 2 – ограждающие слой решетки; 3 – распределительный канал; 4 – вытеснительный стержень; 5 – отводной канал; 6 – обсадная трубка

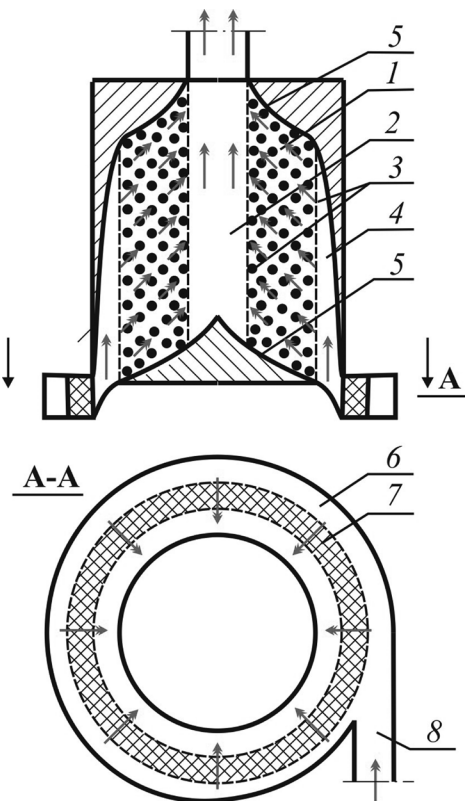


Рис. 8. Схема насыпной активной зоны с устройством ввода теплоносителя: 1 – слой микротвэлов; 2 – отводной канал; 3 – ограждающие слой решетки; 4 – распределительный канал; 5 – профилированные торцы слоя; 6 – литочный канал; 7 – пористая втулка; 8 – канал ввода теплоносителя



у предшествующей модели, а движется по изолированным друг от друга каналам. Эти отводные каналы позволили разрешить конструкционные проблемы, возникшие в «кассете плотного изогнутого слоя» [21]. Так, например, вследствие компактного расположения ТВС в активной зоне реактора MLX у каждой из них существовали шесть линий соприкосновения, что приводило к серьезным искажениям потока воздуха снаружи элементов и значительному росту области «горячих пятен».

Не только в этом заключается положительная роль отводного канала. Его наличие привело к зарождению идеи совместного профилирования обоих каналов – распределительного и отводного [22], что позволило рационально распределить теплоноситель по высоте активной зоны и добиться устойчивого автотеплового теплосъема при работе реактора на частичных нагрузках [23].

**Заключение.** ТВС насыпного типа является естественным результатом развития инженерной мысли. На данный момент это наиболее совершенное устройство, в котором гармонично сочетаются все достоинства топлива в виде микротвэлов и бокового подвода теплоносителя. Предельная энергонапряженность активной зоны достигает 10 МВт/дм<sup>3</sup>.

В любых конструкциях ТВС с микротвэлами устойчивость теплосъема не зависит от величины объемного энерговыделения. На нее влияют соотношение термодинамических параметров теплоносителя на входе-выходе и уровень турбулизации потока в топливном слое. Чем больше отношения  $P_1/P_2$ ,  $T_2/T_1$  и чем меньше диаметр микротвэла (несмотря на рост при этом удельной поверхности), тем выше вероятность перегрева топлива в результате потери устойчивости фильтрации. Специальное профилирование распределительного и отводного каналов насыпной ТВС снижает угрозу возникновения этого негативного эффекта.

#### Список использованной литературы

1. Бабаев, Н. С. Ядерная энергетика, человек и окружающая среда / Н. С. Бабаев, В. Ф. Демин, Л. А. Ильин. – М.: Энергоиздат, 1981. – 296 с.
2. Синева, Н. М. Экономика атомной энергетики / Н. М. Синева, Б. Б. Батуров. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 392 с.
3. Петросьянц, А. М. Ядерная энергетика / А. М. Петросьянц. – М.: Наука, 1981. – 272 с.
4. Пономарев-Степной, Н. Микротвэлами против ядерных катастроф и терроризма [Электронный ресурс] / Н. Пономарев-Степной, Е. Гришанин, Н. Кухаркин // Промышленные ведомости. – 2001. – № 18 (29). – Режим доступа: [http://www.promved.ru/oct\\_2001\\_04.shtml](http://www.promved.ru/oct_2001_04.shtml). – Дата доступа: 18.04.2016.
5. Гришанин, Е. И. Антитеррористическое топливо для АЭС / Е. И. Гришанин // Атомная стратегия. – 2007. – № 29. – С. 15.
6. Гольдштик, М. А. Клапанный эффект в зернистом слое / М. А. Гольдштик, А. В. Лебедев, В. Н. Сорокин // Инж.-физ. журн. – 1978. – Т. 34, № 3. – С. 389–393.
7. Гольдштик, М. А. Процессы переноса в зернистом слое / М. А. Гольдштик. – Новосибирск: Институт теплофизики СО АН СССР, 1984. – 164 с.
8. Гидродинамическая обстановка в свободном объеме слоя катализатора / В. А. Кириллов [и др.] // Докл. АН СССР. – 1972. – Т. 206, № 6. – С. 1409–1411.
9. Колос, В. П. Устойчивый и псевдоустойчивый режимы фильтрации / В. П. Колос, В. Н. Сорокин // Теплофизика высоких температур. – 1983. – Т. 21, № 6. – С. 1231–1233.
10. Красин, А. К. Реакторы атомных электростанций / А. К. Красин. – Минск: Наука и техника, 1971. – 144 с.
11. Выбор концепции конструкции и физические особенности активной зоны ВТГР для энергетических производств / Г. П. Горюшкин [и др.] // Вопр. атом. науки и техники. Сер. «Атом.-водор. энергетика и технология». – 1979. – № 6. – С. 73–78.
12. Ганаев, И. Х. Модульные и кольцевые зоны ВТГР / И. Х. Ганаев, А. Д. Жирнов, В. А. Царюк // Вопр. атом. науки и техники. Сер. «Атом.-водор. энергетика и технология». – 1980. – № 2. – С. 74–75.
13. Rodin, M. B. Study of the packed-bed fuel element concept / M. B. Rodin. – ANL-6193, 1960. – 57 p.
14. Robba, W. A. Settled bed fast reactor / W. A. Robba [itc]. – BNL-713 (T-250), 1961. – 38 p.
15. Perona, G. Fixed bed nuclear reactor / G. Perona, G. Palladino // IAEA. – 1963. – Vol. 1. – P. 157–174.
16. Хоперский, А. И. Быстрые высокотемпературные реакторы с газовым охлаждением / А. И. Хоперский // Атомн. техн. за рубежом. – 1970. – № 10. – С. 3–13.
17. Кузнецкий, Р. С. О равномерном распределении жидкости коллектором с отверстиями / Р. С. Кузнецкий // Теорет. основы хим. технологии. – 1975. – Т. 9, № 4. – С. 622–626.
18. Кузнецкий, Р. С. О перфорации коллектора с заданным распределением вытекающей жидкости / Р. С. Кузнецкий // Теорет. основы хим. технологии. – 1982. – Т. 16, № 1. – С. 64–69.
19. Управление в теплообменных аппаратах коллекторного типа / Ю. В. Богданов [и др.] // Вопр. атом. науки и техники. Сер. «Атом.-водор. энергетика и технология». – 1988. – № 1. – С. 43–45.

20. Расчет радиального расхода в коллекторной системе при равномерном тепловыделении и переменной пористости стенок / Ю. В. Богданов [и др.] // Вопр. атом. науки и техники. Сер. «Атом.-водор. энергетика и технология». – 1988. – № 1. – С. 40–42.

21. *Temme, M. I.* The Heat-hydravlies analisis of possibility of using the fixed bed fuel element in the nuclear reactor with metal-gidrid moderator / M. I. Temme. – AN-MLX-99, 1962. – Vol. 5. – 336 p.

22. Тепловыделяющий элемент насыпного типа: а. с. 797413 СССР: G21C3/04/ А. П. Ахрамович, В. Т. Казазян, В. П. Колос; дата публ.: 15.09.1980.

23. *Ахрамович, А. П.* О работоспособности реактора с микротвэлами. Условия автомодельности теплосъема в активной зоне на частичных нагрузках / А. П. Ахрамович, И. В. Войтов, В. П. Колос // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2016. – № 2. – С. 74–80.

*Поступила в редакцию 28.04.2016*