

## **ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛО ВЫДЕЛЯЮЩИХ СБОРОК РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДОВ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛОСЪЕМА.**

**Э.А. Болтенко**

ОАО ЭНИЦ, 142530, г. Электрогорск, Московская обл., ул. Святого Константина, 6;  
*boltenko@erec.ru*

Эффективность энергетических установок различного назначения определяется энергонапряженностью, весогабаритными характеристиками, надежностью. Повышение эффективности тепловыделяющих сборок (ТВС) реакторных установок (РУ) возможно на основе внедрения новых технических решений, обеспечивающих повышение интенсивности теплосъема в конвективной области, повышения запасов до кризиса теплоотдачи. Эффективность ТВС РУ возможно улучшить также за счет использования альтернативных схем теплосъема.

В ТВС имеет место значительная неравномерность распределения подогревов теплоносителя по сечению. Неравномерность подогрева теплоносителя по сечению сборки и по длине тепловыделяющих стержней ТВС обуславливает сложную гидродинамическую картину течения. Возможна ситуация, когда из-за неравномерного распределения теплоносителя по сечению сборки в одной части сборки имеет место кипение а, в другой поток теплоносителя однофазный. Повышение запасов до кризиса теплоотдачи возможно за счет устранения неравномерности распределения параметров по сечению сборки и использования методов интенсификации, позволяющих повысить теплосъем и значения критических тепловых потоков на выпуклых теплоотдающих поверхностях твэл.

### **Устранение гидравлических неравномерностей по сечению ТВС**

Для устранения тепловой неоднородности в ТВС, как правило, используют различные методы перемешивания теплоносителя и конструктивные элементы, предназначенные как для внутрикассетного, так и для межкассетного перемешивания теплоносителя в пределах активной зоны. В ТВС перемешивание теплоносителя осуществляется, как правило, с помощью дистанционирующих решеток (ДР), снабженных различными элементами для перемешивания и турбулизации теплоносителя. Разработка конструкций дистанционирующих решеток ДР для ТВС ведется во всех странах, где имеются АЭС. Известно большое количество технических решений, направленных на улучшение перемешивания теплоносителя между ячейками и по кассете, а также турбулизацию потока в отдельных ячейках. Повышение КПД, тепловой мощности достигается за счет усложнения конструкции ДР, которым наряду с функцией обеспечения проектного положения твэлов и других элементов ТВС, передаются функции специального гидродинамического воздействия на поток. Это воздействие направлено на повышение уровня турбулентной теплопроводности и вязкости, а также поперечного потока в пучке твэлов.

По характеру гидродинамического воздействия на поток ДР делятся на несколько типов.

1. ДР, обеспечивающие турбулизацию потока за решетками, осевое направление потока сохраняется.
2. ДР, обеспечивающие направленное течение в пределах одной или двух ячеек.
3. ДР, обеспечивающие поперечный переток теплоносителя по сечению пучка.

Для перемешивания теплоносителя между ячейками и турбулизацию потока в ячейках используют различные смесительные элементы. Конфигурация смесительных элементов и схема их размещения в решетках зависит в основном от формы дистанционирующих и межстержневых ячеек, а также от желаемой направленности создаваемых под их воздействием поперечных течений теплоносителя. Смесительные элементы на решетках создают перемешивание теплоносителя между ячейками и турбулизацию потока в отдельных ячейках. Для создания перемешивания между ячейками смесительные элементы выполняют таким образом, что бы создать закрученное течение между соседними твэлами и (или) создать заданное направление в поперечном сечении в пределах одной или двух ячеек, [1].

Конструкции ДР в виде сот используются в РУ России. Они обладают хорошей технологичностью, высокой прочностью и хорошими эксплуатационными свойствами. Различное гидродинамическое воздействие на поток в сотовых перемешивающих решетках достигается с помощью воздействия на ячейки. На рис.1, 2, 3 представлены некоторые конструкции ДР применительно к геометрии ВВЭР-1000, разработанные в различных организациях России, [2-6]. На рис.1, 2 показаны ДР обеспечивающие турбулизацию потока за решетками и направленное течение в пределах одной или двух ячеек. На рис.3 показан один из вариантов конструктивного решения ДР с направленным поперечным переносом, [2].

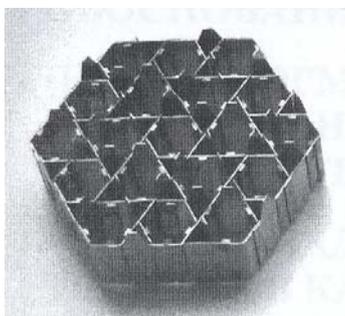


Рис.1

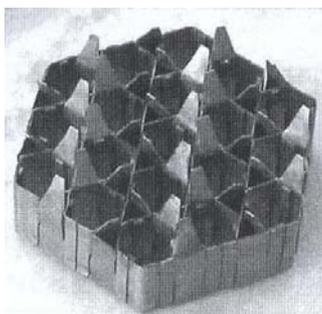


Рис.2

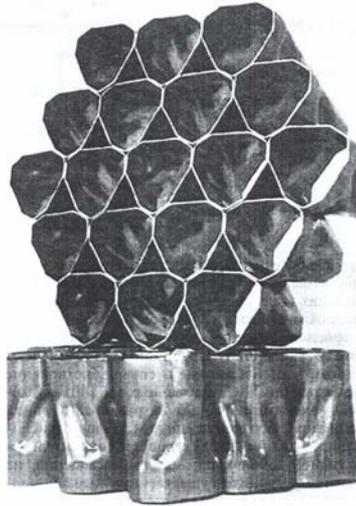


Рис.3

Смесительные решетки (дистанционирующие решетки ДСР и промежуточные ПСР) обеспечивают повышение запасов до кризиса за счет двух эффектов: выравнивания параметров теплоносителя по сечению сборки; повышение КТП при тех же локальных параметрах.

Процессы, связанные с воздействием на поток в отдельных ячейках (турбулизация), достаточно быстро затухают. В связи с этим для получения значительного эффекта необходима установка дистанционирующих решеток на достаточно близком расстоянии.

Внедрение промежуточных смесительных решеток вместе с ДР смесительными решетками (шаг 340 мм) способно обеспечить дополнительное повышение тепловой мощности~ на 10%. Вклад турбулизации в повышение тепловой мощности для перспективных конструкций смесительных решеток составляет: примерно 10% при шаге расположения 250 мм и 2% при шаге расположения 500 мм, [6]. Использование смесительных решеток (3-4 решетки) между дистанционирующими гладкими способно обеспечить повышение мощности на 2-3%. При реализации всех позиций можно предполагать возможность повышения тепловой мощности на 18-22% [6].

Таким образом, для получения эффективного воздействия на поток, приводящего к значительному повышению КТП, необходимо чтобы конструкция дистанционирующей решетки позволяла как улучшить перемешивание по сечению пучка, так и увеличить турбулизацию потока в отдельных ячейках. Создание таких дистанционирующих решеток достаточно сложно. Внесение каких либо конструктивных элементов требует экспериментальной проверки в условиях сборки с большим числом стержней. Расчетные методики, позволяющие оценить эффект от воздействия ДР на запасы до кризиса теплоотдачи отсутствуют.

### **Интенсификация теплосъема с теплоотдающих поверхностей твэл.**

Для интенсификации теплосъема в однофазной области используются различные интенсификаторы [7]: турбулизаторы потока на поверхности, шероховатые поверхности, развитые путем оребрения поверхности, закрутка

потока спиральными ребрами, шнековыми устройствами, завихрителями, установленными на входе в канал и т.д. Наиболее распространенный метод интенсификации теплообмена - нанесение на исходно гладкую поверхность некоторого рельефа путем ее деформации или закрепления на ней системы интенсификаторов. Интенсификация теплосъема достигается за счет генерации вихревых структур, при этом за счет диссипации этих структур растут потери энергии, как правило, рост потерь энергии превышает рост коэффициента теплоотдачи. Экспериментальные исследования показали, что в определенном диапазоне размеров и расположения турбулизаторов на стенке канала рост теплоотдачи может быть больше роста гидравлического сопротивления по сравнению с аналогичным гладким каналом. Как показали визуальные исследования, вдоль периметра канала по линии выступов формируется система упорядоченных вихрей, ось вращения которых направлена под углом к поверхности канала. Эти устойчивые вихревые структуры могут проникать в глубь потока, осуществляя интенсивный теплообмен между пристенными слоями и ядром потока, не вызывая существенного изменения степени турбулентности. Граница значений параметров  $h/d$  и  $Re$ , при которых проявляется закономерность  $Nu/Nu_0 > \xi/\xi_0$  зависит от формы элемента шероховатости. Эта граница сдвигается в сторону больших значений  $h/d$  и  $Re$  для обтекаемых выступов. Наоборот, при острых выступах граница сдвигается в сторону малых значений  $h/d$  и  $Re$ .

Для интенсификации теплосъема во многих случаях используется закрутка потока. Известны сборки, в которых дистанционирование и интенсификация теплосъема достигается с помощью закручивающих устройств. Закручивающие устройства представляют собой проволоку навитую на выпуклую теплоотдающую поверхность твэла. Закручивающие устройства выполняют роль дистанционирующих устройств и интенсификаторов теплосъема. Основным недостатком тепловыделяющих сборок (ТВС) такого типа заключается в низкой эффективности закручивающих устройств, используемых в качестве интенсификаторов. Так, например, в [8] показано, что теплоотдача сборки с относительным шагом навивки проволоки  $T/d = 69,8$  и относительным шагом упаковки  $S/d = 1,23$  в стабилизированном участке течения на 30% меньше по сравнению с теплоотдачей в трубе.

Для повышения интенсивности теплосъема в конвективной области на выпуклой теплоотдающей поверхности возможно использование взаимодействующих закрученных потоков. Упрощенная схема взаимодействующих закрученных потоков в кольцевом канале показана на рис.4. В данном случае второй закрученный поток - это поток с шагом равным бесконечности (транзитный поток), [9]. Интенсификация теплообмена на выпуклой теплоотдающей поверхности в данном случае достигается за счет взаимодействия закрученного и транзитного потоков, кроме того, дополнительное повышение теплоотдачи возникает при взаимодействии закрученного потока с продольными ребрами и транзитного потока с кромками ребер, образующих закрученный поток рис.4. Продольные оси этих вихрей под действием основного потока деформируются и в пределе совпадают с направлением вектора основного потока. Взаимодействие транзитного и закрученного потоков приводит к дополнительной генерации вихрей в межреберном пространстве, причем, интенсивность вихрей выше интенсивности основного закрученного потока. Действительно, размер вихрей основного закрученного потока порядка  $d/2$ , а тангенциальная скорость  $W \sim (\pi \cdot d/T) \cdot U$ , где  $U$  - продольная составляющая скорости. Радиус вихрей в

межреберном пространстве намного меньше  $d$  и равен  $r \sim h$ . В связи с этим, величина центробежных ускорений  $g \approx W^2/r \gg W^2/(d/2)$ . На рис.5 показана зависимость коэффициента теплоотдачи на выпуклой теплоотдающей поверхности кольцевого канала с закруткой и транзитным потоком от температуры воды для массовой скорости  $500 \text{ кг/м}^2\text{с}$ . Как видно из рисунка, на котором для сравнения нанесены значения  $\alpha_{\text{вп}}$  для гладкого кольцевого канала с теми же геометрическими размерами  $d_r, d_{\text{вп}}, d_{\text{вн}}$ , в зависимости от величины  $h$  значения  $\alpha_{\text{вп}}$  по сравнению с гладким кольцевым каналом в 2-3 раза выше.

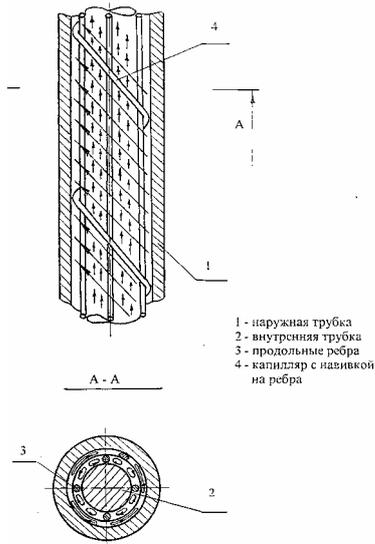


Рис.4. Кольцевой канал с закруткой и транзитным потоком.

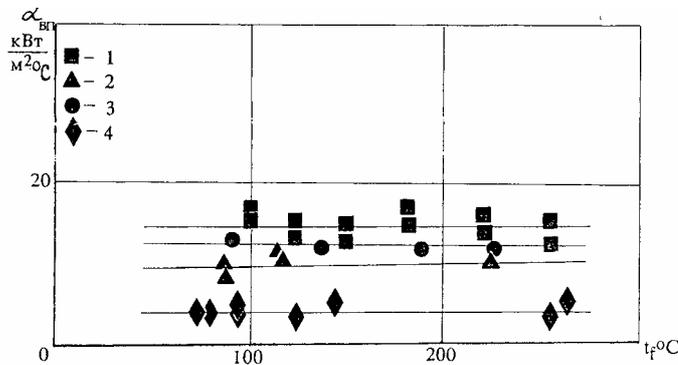


Рис.5.  $d_{\text{вп}}/d_{\text{вн}}=0,714$ ;  $T/d_r=7,5$ ;  $\rho W=500 \text{ кг/м}^2\text{с}$ ;

1 -  $\bar{h}=0,25$ ; 2 -  $\bar{h}=0,5$ ; 3 -  $\bar{h}=0,75$ ; 4 - гладкий кольцевой канал

Сравнение интенсивности теплообмена и гидравлического сопротивления для кольцевого канала с закруткой и транзитным потоком приведено на рис.6. Как видно, для выпуклой теплоотдающей поверхности имеются области с преобладающим увеличением числа  $Nu$  по сравнению с коэффициентом сопротивления  $\xi$  ( $\pi d/T=0.42$ ,  $\bar{h} > 0.5$ ). Для выпуклой поверхности эта зона при

$\pi d/T=0.42$  занимает широкую область изменения  $\bar{h}$  ( $\bar{h} > 0.25$ ). Наличие таких зон косвенно указывает на характер вихреобразования при взаимодействии закрученного и транзитного потоков. По-видимому, в этом случае образуются трехмерные упорядоченные структуры, не вызывающие существенного изменения степени турбулентности, в связи с чем увеличение теплоотдачи не сопровождается опережающим ростом потерь на трение

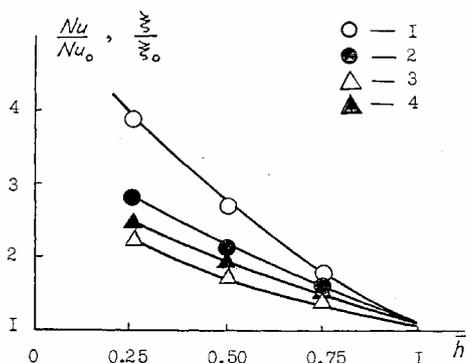


Рис.6.1 - 1 -  $\xi/\xi_0$ ; 2 -  $Nu/Nu_0$ ;  $\pi d/T=0,837$ . 3 -  $\xi/\xi_0$ ; 4 -  $Nu/Nu_0$ ;  $\pi d/T=0,42$ .,  $Re=1000$ .

На рис.7. показан качественный характер зависимости  $q_{кр}=f(x)$  для выпуклой теплоотдающей поверхности кольцевого канала с закруткой и транзитным потоком 2, канала с закруткой 1 и гладкого кольцевого канала 3. КТП в канале с закруткой потока ниже значений КТП для гладкого кольцевого канала, причем при достижении предельного значения паросодержания  $x_{пр}^{вп}$  КТП в канале с закруткой резко падают, кризис практически не зависит от плотности теплового потока, [10]. В этом случае благодаря действию центробежных сил паровая фаза располагается у выпуклой поверхности (истинное объемное паросодержание вблизи стенки  $\sim 90\%$ ) – имеет место обращенный кольцевой режим - кризис имеет гидродинамическую природу. Значения КТП для канала с закруткой и транзитным потоком во всей исследованной области  $x$  выше значений КТП, как для гладкого кольцевого канала, так и канала с закруткой, [11].

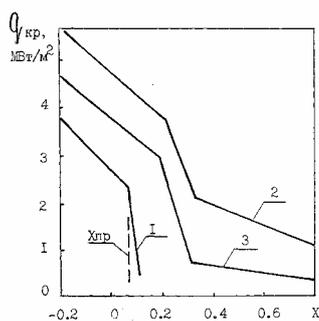


Рис.7. Качественный характер зависимости критического теплового потока от паросодержания: 1 – кольцевой канал с закруткой потока; 2 – кольцевой канал с закруткой и транзитным потоком; 3 – гладкий кольцевой канал.

В сборках процессы образования вихревых структур при взаимодействии закрученных и транзитных потоков, движущихся вдоль выпуклых теплоотдающих поверхностей, будут более сложны, но в целом следует ожидать, что эффект от взаимодействия закрученного и транзитного потоков будет аналогичен. На рис.8 показан один из возможных вариантов выполнения сборки,

в которой реализуется взаимодействие закрученного и транзитного потоков. В этом случае закручивающие устройства установлены по отношению к теплоотдающим поверхностям твэл с зазором, зазоры образованы путем установки фиксирующих элементов на поверхности твэл или путем закрепления фиксирующих элементов к закручивающим устройствам со стороны твэл, [12].

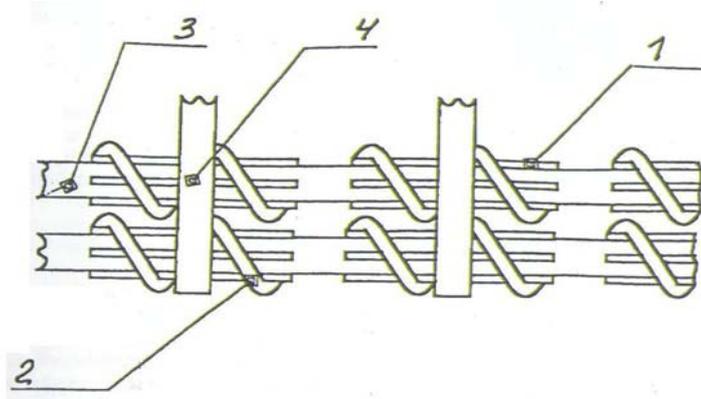


Рис. 8 Тепловыделяющая сборка  
1-продольные ребра, 2- закручивающее устройство, 3- тепловыделяющий элемент, 4- дистанционирующая решетка.

Таким образом, использование взаимодействующих закрученных потоков позволяет повысить интенсивность теплосъема и КТП на выпуклой теплоотдающей поверхности твэл. При оптимальном соотношении закрученных потоков возможно получить увеличение теплоотдачи не сопровождающееся опережающим ростом потерь на трение.

### Альтернативная схема теплосъема.

В РУ с альтернативной схемой теплосъема в твэлах осуществляется как с наружной поверхности твэл (традиционное исполнение), так и с внутренней теплоотдающей поверхности, рис.9. В этом случае твэлы выполняются полыми, в частности, трубчатыми [13]. Предлагаемая схема теплосъема обладает преимуществами, имеющими место в ТВС со стержневыми твэлами – на основе таких твэлов можно выполнить ТВС любой мощности. В месте с тем, эта схема теплосъема обладает преимуществами, имеющими место в ТВС с концентрическими кольцевыми зазорами – обеспечивается обратная тепловая связь между вогнутой и выпуклой теплоотдающими поверхностями твэла. В ТВС с трубчатыми твэлами [14] повышение энергонапряженности и снижение максимальной температуры топлива достигается за счет:

1. Увеличения поверхности теплосъема – теплосъем осуществляется как с наружной (выпуклой), так и с внутренней (вогнутой) теплоотдающих поверхностей.
2. Образования тепловых обратных связей между выпуклой и вогнутой теплоотдающими поверхностями. Любое ухудшение теплосъема на одной из поверхностей приведет к перераспределению тепловых потоков, смещению максимума теплового потока к одной из поверхностей, улучшению тепловой обстановки на поверхности, где ухудшились условия теплосъема.
3. Образования гидравлических обратных связей. Гидравлическая обратная связь (в случае необходимости) реализуется путем перетоков теплоносителя через

отверстия из внутренних полостей твэлов в межтвэльное пространство (или наоборот). Этим самым теплоноситель перемешивается по сечению ТВС, улучшая теплообмен с теплоотдающих поверхностей.

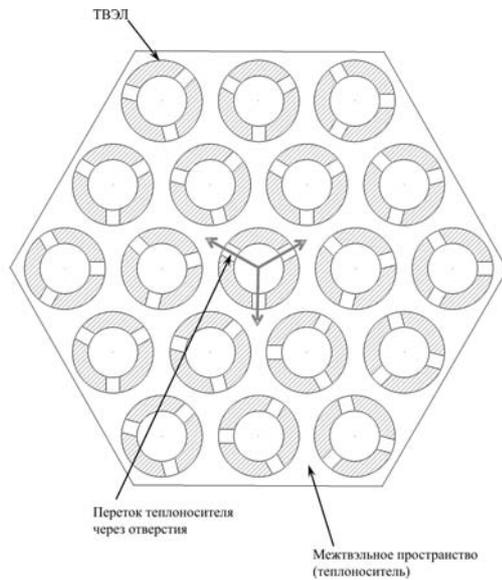


Рис.9. Тепловыделяющая сборка с трубчатыми твэлами.

На рис.10 показан трубчатый твэл с двухсторонним теплосъемом. Расчеты показывают, что переход от стержневых твэл к трубчатым (при сохранении массы топлива и теплоносителя в зоне) практически удваивает поверхность теплообмена.

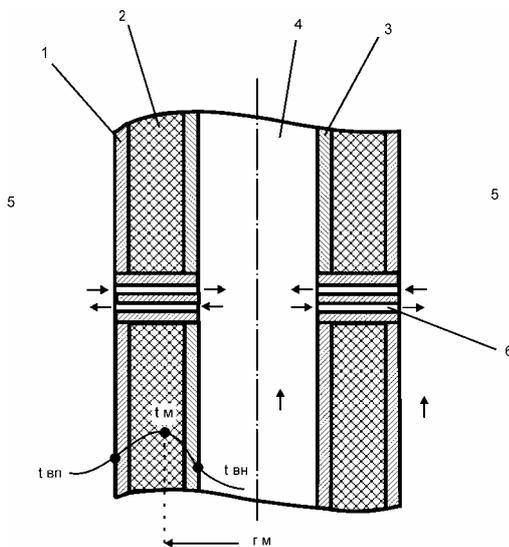


Рис.10. Трубчатый тепловыделяющий элемент с двухсторонним теплосъемом.

1. наружная оболочка твэл; 2 - топливо; 3 - внутренняя оболочка твэл; 4 - внутритвэльное пространство, ВП; 5 - межтвэльное пространство, МП; 6 - необогреваемая вставка с отверстиями; 7 - отверстия, обеспечивающие гидравлическую обратную связь;  $t_{вп}$  - температура выпуклой поверхности твэл;  $t_{вн}$  - температура вогнутой поверхности твэл;  $t_m$  - максимальная температура твэл;  $r_m$  - расстояние (радиус) от центра твэл до поверхности твэл с максимальной температурой.

При этом примерно в два раза снижается толщина топливного слоя. Это, учитывая, теплообмен как с внутренней, так и внешней поверхности, приводит к снижению эффективного термического сопротивления топлива по сравнению со

стержневыми твэл [14]. Максимальная температура топлива существенно понижается. В качестве примера на рис.11, [14], приведено распределение температуры по сечению стержневого твэл в стандартной ТВС 17x17 (Westinghouse) и трубчатого твэл из альтернативной ТВС 13x13 при разных уровнях линейной мощности.

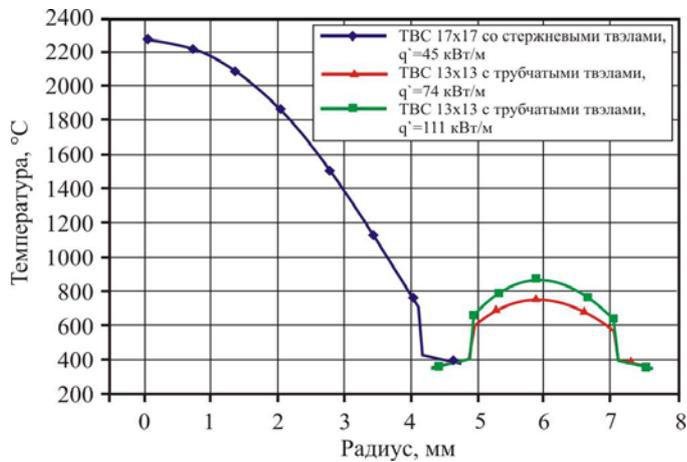


Рис.11. Распределение температуры по сечению стержневого и трубчатого твэлов.  
 1 – ТВС 17\*17 со стержневыми твэлами,  $q' = 45$  кВт/м; 2, 3 – ТВС 13\*13 с трубчатыми твэлами: 2 -  $q' = 74$  кВт/м; 3 -  $q' = 111$  кВт/м

Таким образом, использование трубчатых твэлов с двухсторонним теплосъемом позволяет: существенно увеличить мощность РУ; существенно снизить максимальную температуру топлива (более чем на  $1000^{\circ}\text{C}$  при увеличенной до 150% мощности РУ). Температура топлива уменьшается, т.к. более чем в два раза снижается толщина топливного слоя, кроме того, теплопроводность  $\text{UO}_2$  при снижении температуры растет; снизить энтальпию (запасенную энергию) топлива более чем в два раза, что повышает безопасность РУ при авариях с потерей теплоносителя и таким образом появится возможность оптимизации (уменьшения стоимости) систем безопасности. В первый момент аварии при выравнивании температур по твэлу, температура оболочки не достигает проектного предела  $1200^{\circ}\text{C}$ .

В настоящее время в ряде стран ведутся активные работы по обоснованию ТВС с трубчатыми твэлами.

### Заключение

1. Для повышения запасов до кризиса теплоотдачи в сборках используют дистанционирующие решетки, которым наряду с функцией обеспечения проектного положения твэлов, передаются функции специального гидродинамического воздействия на поток. Это воздействие направлено на повышение интенсивности теплосъема, а также поперечного потока в пучке твэлов. Реализация всех известных в настоящее время конструктивных элементов предположительно позволит повысить тепловую мощность сборки на 18-22% [6].

2. Для интенсификации теплосъема и повышения запасов до кризиса теплоотдачи на выпуклой теплоотдающей поверхности твэл используют различные методы - нанесение на поверхность некоторого рельефа (выступы – впадины, шероховатость, «лунки»), пористое покрытие и т. д. В конвективной области некоторые методы при благоприятном сочетании геометрических и

режимных параметров показывают высокую эффективность. В двухфазной области (поверхностное кипение) возможен отрицательный результат (микрооребрение) – снижение КТП по сравнению с гладкой поверхностью. Закрутка потока на выпуклой теплоотдающей поверхности в конвективной области приводит к понижению коэффициентов теплоотдачи по сравнению с гладкой теплоотдающей поверхностью. В двухфазной области значения КТП для выпуклой теплоотдающей поверхности с закруткой значительно ниже КТП для поверхности без закрутки. Возникновение кризиса практически не зависит от плотности теплового потока.

3. Использование взаимодействующих закрученных потоков (закрутка – транзитный поток) для интенсификации теплосъема на выпуклой теплоотдающей поверхности твэл (кольцевые каналы) позволяет значительно повысить теплосъем в конвективной области (в 2-3 раза по сравнению с гладкой поверхностью). Значения КТП во всей области существования двухфазного потока выше значений КТП для гладкой поверхности (от 30% в области поверхностного кипения до 250% в области дисперсно-кольцевого режима). В сборках процессы образования вихревых структур при взаимодействии закрученных и транзитных потоков, движущихся вдоль выпуклых теплоотдающих поверхностей, будут более сложны, но в целом следует ожидать, что эффект от взаимодействия закрученного и транзитного потоков будет аналогичен. Предложена схема ТВС, в которой для интенсификации теплосъема и повышения запасов до кризиса используются взаимодействующие закрученные потоки.

4. Использование в ТВС трубчатых твэлов с двухсторонним теплосъемом позволяет значительно повысить энергонапряженность РУ, существенно снизить максимальную температуру твэла, повысить безопасность РУ в авариях с потерей теплоносителя.

## Литература

1. Перепелица Н.И. Дистанционирующие решетки со смесительными элементами для ТВС PWR. Обзор. Атомная техника за рубежом, 2010. № 8. с. 3-10.
2. Солонин В.И. Интенсификация процесса перемешивания теплоносителя в ТВС ВВЭР-1000 решетками сотового типа. Сб. докладов Шестая международная научно-техническая конференция. МНТК-2008. Пленарные и секционные доклады. Москва, 21-23 мая 2008 г. с.123-126.
3. Самойлов О.Б., Романов А.И., Молчанов В.Л., Долгов А.Б., Петров И.В., Аксенов И.М., Ефанов А.Д., Пометько Р.С. Разработка и обоснование перемешивающих решеток – интенсификаторов для ТВСА с улучшенными технико-экономическими характеристиками. Сб. докладов Шестая международная научно-техническая конференция. МНТК-2008. Пленарные и секционные доклады. Москва, 21-23 мая 2008 г. с.144-147.
4. Дмитриев С.М., Бородин С.С., Легчанов М.А., Хробостов А.Е., Сорокин О.Б., Самойлов О.Б. Расчетно-экспериментальные исследования локального массообмена потока теплоносителя в ТВСА реакторов ВВЭР-1000 при использовании перемешивающих решеток. Сб. докладов Шестая международная научно-техническая конференция. МНТК-2008. Пленарные и секционные доклады. Москва, 21-23 мая 2008 г. с.178-183.
5. Корсун А.С., Круглов В.Б., Маслов Ю.А., Меринов И.Г., Одинцов А.А., Харитонов В.С., Васильченко И.И., Кобелев С.И., Мальчевский А.В. Расчетные

исследования циркуляции теплоносителя в ТВС с решетками перемешивающего типа. Сб. докладов Шестая международная научно-техническая конференция. МНТК-2008. Пленарные и секционные доклады. Москва, 21-23 мая 2008 г. с.202-206.

6. Ефанов А.Д., Колмаков А.П., Куликов Б.И., Ложкин В.В., Пометько Р.С. и др. Направление теплофизических исследований по обеспечению проектных параметров АЭС-2006 (ВВЭР-1200). Семинар ФЭИ, концерн ТВЭЛ. Обнинск 2007г.

7. Кузма-Кичта Ю.А. Методы интенсификации теплообмена. М.: Изд.-во МЭИ, 1994.

8. Чесна Б. Теплоотдача и гидродинамика в газоохлаждаемых стержневых тепловыделяющих сборках/ Под редакцией Ю. Вилемаса, Каунас. Литовский энергетический институт, 2003 г.

9. Патент России 1540426 МКИЗФ28F13/12. Теплопередающее устройство /Э.А. Болтенко// Заявка №4423162/24-06 от 07.05.88. Открытия. Изобретения. 1992. №31.

10. Болтенко Э.А. Кризис теплообмена в кольцевых каналах с закруткой потока // Теплоэнергетика, 2003, №11.с. 25-30.

11. Boltenko E.A. Heat Removal Augmentation in Steam Generating Channels With Swirled Flows. Fourth International Conference on Compact heat Exchangers and Enhancement Technology for the Process Industries. September 28-October 3, 2003. Crete, Greece

12. Патент России 2295785 МПКЗG 21C 3/34, F28 F 13/12. Тепловыделяющая сборка /Э.А. Болтенко // Заявка №2005108295 от 24.03.2005. Бюл. №8. 2007 г.

13. Патент России 2220464 МКИЗG 21C3/00, 3/30, 3/32. Тепловыделяющая сборка / В.Н. Блинков, Э.А. Болтенко // Заявка №2002104121 от 20.02.2002. Открытия. Изобретения. 2003. №36.

14. Блинков В.Н., Болтенко Э.А., Елкин И.В, Мелихов О.И., Соловьев С.Л. Перспективы использования кольцевых твэлов в атомной энергетике // Теплоэнергетика. 2010, №3. С.28-33

