

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ТВС АЭС-2006 С ПОВЫШЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

**И.Н. Васильченко¹, С.Е. Волков², В.В. Вьялицын¹, Д.В. Мальчевский¹,
Р.С. Пометько³, Ю.Ф. Селиванов³, А.М. Смирнов³**

1 - ОАО "ОКБ Гидропресс", г. Подольск, Россия; 2 - ОАО "ТВЭЛ", г. Москва, Россия;

3 - ГНЦ "РФ-ФЭИ", г. Обнинск, Россия

ВВЕДЕНИЕ

Для достижения целевых показателей проекта АЭС-2006 в части повышения тепловой и электрической мощности реакторной установки в кассетах предусматривается использование промежуточных решеток-интенсификаторов (РИ), интенсифицирующих теплообменные процессы. Использование дополнительных решеток неизбежно связано с повышением гидравлического сопротивления кассет. Для устранения этой проблемы разработаны конструкции новых дистанционирующих решеток (ДР) с оптимизированной геометрией ячеек, что позволило снизить коэффициент гидравлического сопротивления. Соответствующие изменения внесены и в технический проект. Снижение общего гидравлического сопротивления существующих кассет (например, типа ТВС-2М) позволяет использовать в конструкции дополнительные элементы в виде РИ и антидебризного фильтра (АДФ). Это обеспечивает сохранение гидравлической совместимости усовершенствованной тепловыделяющей сборки (ТВС) с используемой серийной ТВС, эксплуатирующейся в настоящее время.

В докладе представлены результаты исследований двух вариантов РИ. Один из вариантов способствует, в основном, повышению интенсивности поперечного перемешивания потока теплоносителя и, тем самым, выравниванию параметров теплоносителя по сечению модели ТВС (РИ типа "циклон"). Второй вариант ориентирован на создание вихрей, приводящих к осаждению жидкости на обогреваемые поверхности и интенсифицирующих тем самым теплообмен в двухфазных потоках (РИ типа "вихрь"). Оба варианта РИ способствуют повышению мощностей как ТВС, так и зоны в целом.

Исследования моделей ТВС с названными решетками были проведены с использованием трёх экспериментальных установок:

- стенд высокого давления СВД-2 с установленной мощностью 11 МВт, теплоноситель – вода;
- стенд СТФ с фреоновым теплоносителем мощностью 540 кВт (в пересчете на воду – 8 МВт);
- установка ТРАССЕР (для исследований смесительных свойств и гидравлических сопротивлений решеток в адиабатических условиях).

Наличие трех различных установок позволяет оптимальным образом оценить качество и возможность использования различного типа решеток в натуральных кассетах. Исследования на установке ТРАССЕР и фреоновом стенде СТФ являются менее затратными по сравнению с исследованиями, проводимыми на стенде высокого давления. К тому же эти исследования позволяют исключать из дальнейших исследований решетки с неприемлемым гидравлическим сопротивлением, с низкими смесительными свойствами и малоэффективными в плане повышения критической мощности. Завершающие исследования по обоснованию проектных требований к натурным кассетам выполняются на стенде с натурным теплоносителем, т.е. на стенде СВД-2.

Целью данной работы является:

- получение экспериментальных данных по локальным параметрам теплоносителя, данных по интенсивности перемешивания и кризису теплообмена в моделях ТВС АЭС-2006, оснащённых РИ типа "циклон" и "вихрь", рисунок 1;
- анализ полученных данных, включая расчет локальных параметров потока с использованием программ ОКБ "Гидропресс" и ФЭИ;
- разработка рекомендаций по запасам до кризиса теплообмена в ТВС, возможностям повышения тепловой мощности кассет при использовании перемешивающих решёток.

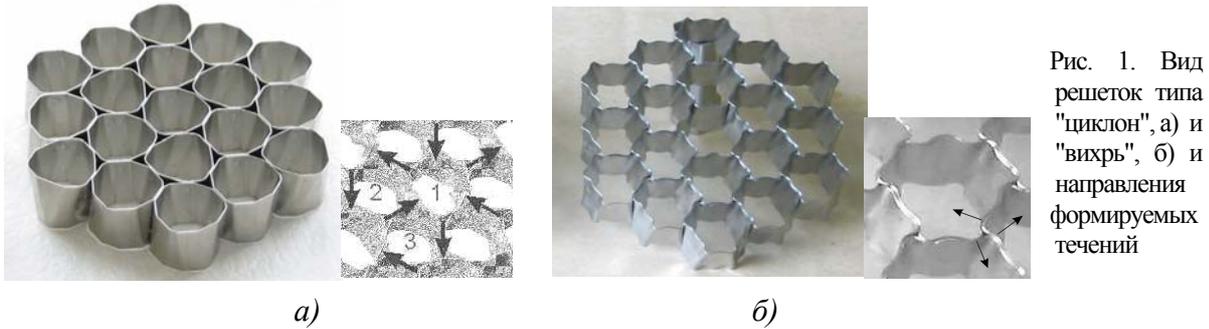


Рис. 1. Вид решеток типа "циклон", а) и "вихрь", б) и направления формируемых течений

1. Экспериментальные модели и их оснащение решетками

Экспериментальные сборки представляют собой модели натурной ТВС АЭС-2006 с 19 имитаторами твэлов (или 18 имитаторов твэлов и имитатор направляющего канала), располагающиеся в шестигранном канале, рисунок 2. В опытах использовались имитаторы твэлов длиной 3,68 и 3,73 м. Диаметр имитаторов твэлов - 9,1 мм, шаг расположения – 12,75 мм.

В преобладающей части моделей центральная область из 7-ми имитаторов имела более высокое тепловыделение с целью исключения появления кризиса на периферии, где геометрия ячеек не соответствует натурной ТВС. На рисунке 3 приведено типичное расположение решеток ДР и РИ по длине моделей ТВС. Для характеристики профиля тепловыделения в поперечном сечении примем следующие обозначения: $Kr = q_{гор}/q_{сред}$, где $q_{гор}$ –тепловой поток через поверхность имитаторов с высоким тепловыделением, $q_{сред}$ – осреднённый тепловой поток через поверхность всех обогреваемых имитаторов.

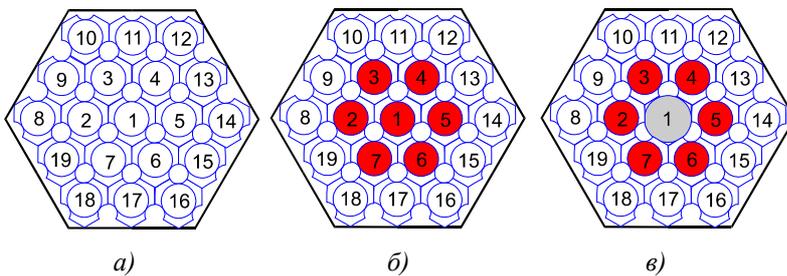


Рис. 2. Вид поперечного сечения моделей в месте расположения ДР
а) – $Kr = 1,00$; б) – $Kr = 1,15$;
в) – $Kr = 1,15$ (модель с имитатором направляющего канала в центре сборки).

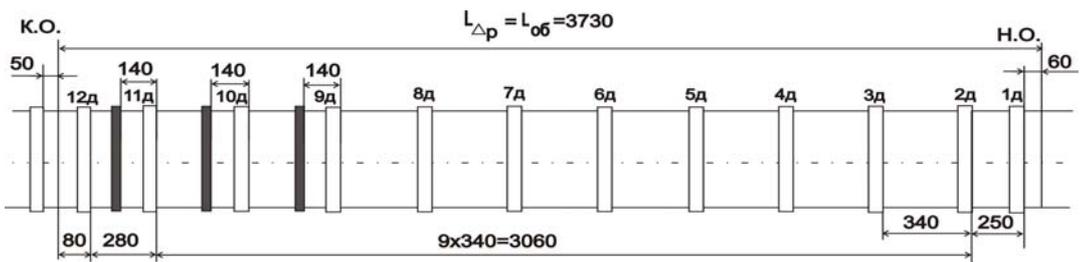


Рис. 3. Типичная схема расположения решеток по длине модели ТВС. Н.О. – начало обогрева; К.О. – конец обогрева; 1д – 12д - дистанционирующие решетки; 1п – 3п – решетки-интенсификаторы

2. Экспериментальные исследования величин критического теплового потока и критической мощности ТВС при использовании в качестве теплоносителя фреона

Экспериментальная сборка состояла из девятнадцати имитаторов твэлов с наружным диаметром 9,1 мм косвенного нагрева (типа ТЭН), размещенных с шагом 12,75 мм в треугольной упаковке в шестигранном канале. В качестве дистанционирующих устройств использовались решетки высотой 30 мм, изготовленные из сотовых элементов. Шаг расположения этих решеток по высоте сборки составлял 340 мм. В трех верхних пролетах между дистанционирующими решетками были установлены решетки-интенсификаторы типа "вихрь". Обогреваемая длина модели ТВС составляла 3,53 м.

В опытах применялись два вида распределения тепловыделения по поперечному сечению канала: равномерное тепловыделение и неравномерное радиальное (центрально-симметричное) тепловыделение с повышенным энерговыделением семи центральных стержней. Отношение энерговыделения стержня из периферийной группы к энерговыделению стержня центральной группы составляло около 0,80. Вид распределения теплового потока по поперечному сечению сборки представлены ранее на рисунке 2а, 2б.

На рисунках 4 и 5 приведено сравнение экспериментальных данных по критическим тепловым потокам (КТП) в зависимости от температуры фреона на входе в сборку T_{in} при равномерном распределении тепловыделения в поперечном сечении. Экспериментальные данные получены с использованием моделей, оснащенных только дистанционирующими сотовыми решетками с различным шагом, а также при наличии в дополнение к ним трёх решеток-интенсификаторов типа "вихрь" и "циклон".

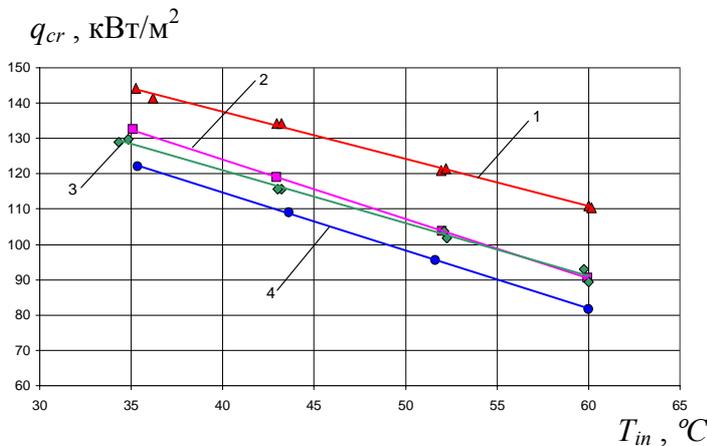


Рис. 4. Сравнение КТП в моделях ТВС, оснащенных различными решетками. Давление фреона – 20,3 бар, массовая скорость – 2580 кг/(м²·с)
 1 – сборка с решетками типа “вихрь”;
 2 – сборка с решетками типа “циклон”;
 3 – сборка только с ДР при шаге 170 мм;
 4 – сборка только с ДР при шаге 340 мм (как в натурной ТВС)

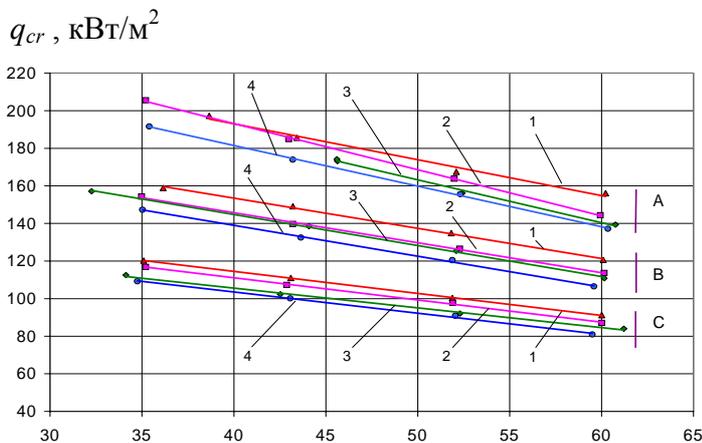


Рис. 5. Сравнение КТП в моделях ТВС, оснащенных различными решетками. Давление фреона – 26,6 бар, массовая скорость:
 А – 3580 кг/(м²·с); В – 2580 кг/(м²·с);
 С – 1760 кг/(м²·с).
 1 – сборка с решетками типа “вихрь”;
 2 – сборка с решетками типа “циклон”;
 3 – сборка только с ДР при шаге 170 мм;
 4 – сборка только с ДР при шаге 340 мм

$$T_{in}, \text{ } ^\circ\text{C}$$

Как видно из рисунков 4 и 5, модель, оснащенная тремя решетками типа "вихрь", отличается существенно более высокими КТП по сравнению с моделями, оснащенными решетками типа "циклон" или только стандартными дистанционирующими сотовыми решетками. Из рисунка также видно, что использование РИ типа "циклон" не приводит к существенному повышению КТП, как и использование увеличенного количества дистанционирующих решеток. В связи с этим решетка типа "циклон" была признана недостаточно эффективной и после некоторых дополнительных исследований была исключена из дальнейших испытаний.

Относительный прирост критического теплового потока (или мощности) в моделях ТВС с использованием РИ при различных режимных параметрах приводится в таблице 1.

Таблица 1

Относительное повышение КТП в моделях ТВС с решетками "вихрь" и "циклон" в сравнении с КТП в моделях с ДР при шаге их расположения 340 мм в опытах при равномерном распределении тепловыделения по длине и поперечному сечению сборок

Давление, бар	20,3		26,6	
ρW , кг/(м ² ·с)	2580	1760	2580	3580
РИ "вихрь"	25,1 %	11,2 %	11,7 %	8,4 %
РИ "циклон"	8,9 %	7,5 %	5,6 %	5,5 %

С повышением давления и массовой скорости наблюдается снижение влияния решеток типа "вихрь" на величину КТП. Видно также, что решетки типа "вихрь" существенно превосходят решетки типа "циклон" по интенсифицирующему теплообмен воздействию.

Вывод о смесительных свойствах решеток можно сделать на основе анализа величины прироста критического теплового потока в сборке при переходе от равномерного к неравномерному по сечению сборки тепловыделению. Некоторые из результатов такого эксперимента приведены на рисунке 6.

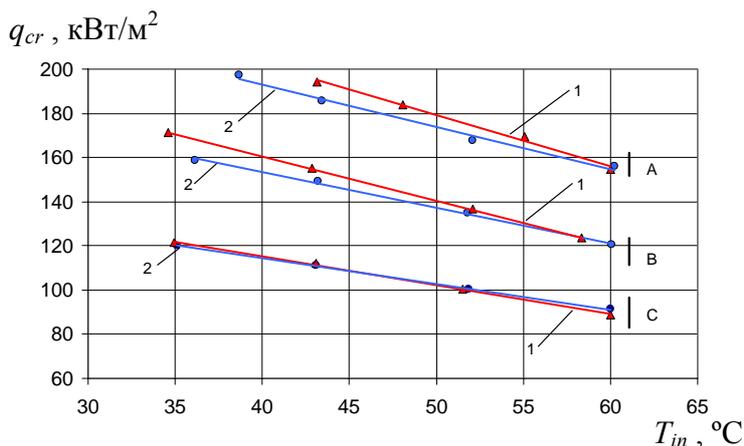


Рис. 6. Критический тепловой поток в сборке с решётками-интенсификаторами типа "вихрь" при равномерном и неравномерном распределении тепловыделения по сечению сборок. Давление фреона – 26,6 бар (соответствует давлению в опытах с водой 157 бар). Массовые скорости: А – 3580 кг/(м²·с); В – 2580 кг/(м²·с); С – 1760 кг/(м²·с). 1 – $Kr = 1,15$; 2 – $Kr = 1,00$

Небольшое различие КТП при равномерном и неравномерном тепловыделении в поперечном сечении моделей свидетельствует о низких смесительных свойствах решетки типа "вихрь". При наличии хорошего перемешивания при неравномерном тепловыделении по сечению КТП были бы существенно выше за счет перемешивания теплоносителя в

"горячей" центральной области модели с теплоносителем "холодной" периферийной области.

На фреоновом стенде проведены также исследования с использованием модели с неравномерным ступенчатым тепловыделением по длине сборки (типа косинус), рисунок 7.

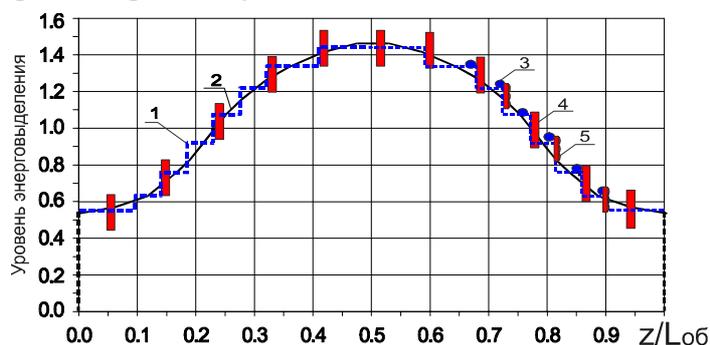


Рис. 7. Распределение тепловыделения по длине имитаторов твэлов и оснащение одной из моделей решётками-интенсификаторами. 1 - экспериментальный ступенчатый профиль тепловыделения по длине; 2 - проектный профиль; 3 - термопары в имитаторах твэлов; 4 - дистанционирующие решетки; 5 - решетки – интенсификаторы типа ("вихрь")

Нагрев каждого имитатора осуществлялся с помощью цилиндрического ступенчатого нихромового стержня, расположенного по центру оболочки и изолированного от оболочки уплотненной керамикой. В каждом имитаторе имелось по 6 термопар, расположенных по длине имитатора. В модели использовались две группы имитаторов с различным расположением термопар.

Неравномерность распределения тепловыделения по длине сборок оказала заметное влияние на результаты экспериментов. Для сравнения результатов воспользуемся данными, полученными в опытах с моделью с равномерным тепловыделением по длине при оснащении её только сотовыми дистанционирующими решетками и в опытах с моделью с дополнительно размещёнными РИ типа "вихрь".

Характеристикой вида распределения тепловыделения по длине сборки служит критерий Kz , представляющий собой отношение максимальной величины теплового потока к среднему по длине сборки тепловому потоку. Таким образом, равномерному распределению тепловыделения соответствует значение $Kz = 1,0$.

Поскольку при неравномерном распределении тепловыделения по длине сборки показателем эффективности решёток-интенсификаторов может служить их влияние на критическую мощность N_{cr} модели сборки, в таблице 7 приведены данные о критической мощности идентичных сборок при равномерном и неравномерном по длине распределении тепловыделения. Сравнение критической мощности различных сборок представлено на рисунке 8.

N_{cr} , кВт

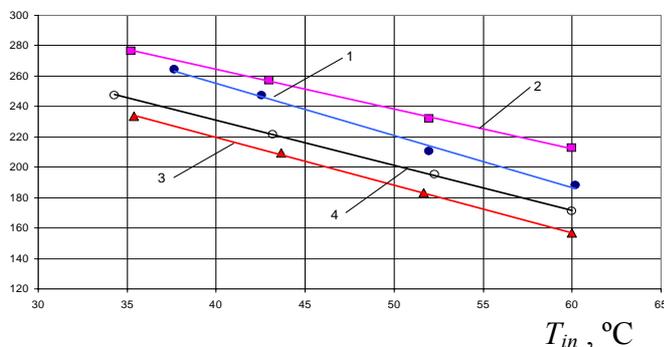


Рис. 8. Сравнение критических мощностей моделей с ДР и РИ типа "вихрь" при равномерном тепловыделении по сечению модели. Давление фреона 20,3 бар. Расход 15,6 т/ч (массовая скорость – 2580 кг/(м²·с)).

- 1 – модель с решетками типа "вихрь", $Kz = 1,42$;
- 2 – модель с решетками типа "вихрь", $Kz = 1,00$;
- 3 – модель только с ДР при шаге 340 мм; $Kz = 1,00$;
- 4 – модель только с ДР при шаге 170 мм; $Kz = 1,00$.

Анализируя критические мощности различных сборок, можно сделать вывод о достаточно высоком повышении критической мощности сборок с равномерным и неравномерным тепловыделением по длине при использовании решеток типа "вихрь".

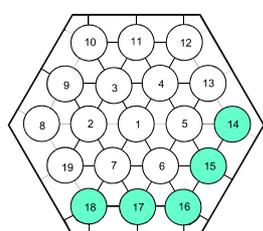
Исследования показали, что при распределении тепловыделения с $Kz = 1,42$ место возникновения кризиса теплообмена может находиться на расстоянии до 1210 мм от конца зоны обогрева, между тем как при равномерном тепловыделении по длине кризис теплообмена, чаще всего, возникает в конце зоны обогрева. Критические мощности модели с неравномерным распределением тепловыделения по длине существенно превзошли критические мощности модели, содержащей только дистанционирующие решётки, при равномерном тепловыделении по длине моделей, таблица 2.

Таблица 2

Относительное отличие критической мощности моделей с $Kz = 1,42$ и $Kz = 1,0$, оснащенных решетками типа "вихрь", от критической мощности сборки, содержащей только дистанционирующие решетки с шагом 340 мм. Равномерное поперечное тепловыделение.

Давление, бар	20,3	26,6		
ρW , кг/(м ² с)	2580	1760	2580	3580
Осевая неравномерность	17,2 %	15,2 %	14,9 %	16,0 %
Равномерное распределение	26,0 %	11,4 %	12,0 %	9,6 %

Одной из особенностей решеток типа "вихрь" является наличие отгибов, выходящих за пределы сотовых дистанционирующих решеток с таким же количеством элементов, что может сказаться на поперечном размере натурной ТВС. В связи с этим требуется некоторая доработка периферийных элементов решетки. Одним из вариантов решения задачи может служить исключение из решётки-интенсификатора периферийных фигурных элементов. При этом на двух боковых гранях решетки из 19 элементов было изъято 5 фигурных элементов, рисунок 9. Для обоснования этого варианта проведены исследования на установке ТРАССЕР и фреоновом стенде.



а)



б)

Рис. 9. Решетка типа "вихрь" с 14 фигурными элементами.

а) - расположение 5-ти боковых имитаторов твэлов, вокруг которых отсутствуют фигурные элементы решётки;
б) - вид решетки с 14-тью фигурными

Исследование кризиса теплообмена на модели с "урезанными" решетками показали, что критические мощности фактически не изменились. Различия не выходят за пределы погрешностей данных.

На первый взгляд такой результат кажется нелогичным. Однако в этом проявляется бесспорная закономерность, связанная с изменением распределения гидравлических сопротивлений по поперечному сечению канала. Отсутствие части сотовых элементов в РИ приводит к снижению гидросопротивления в области расположения изъятых элементов и, как следствие, вызывает направленные поперечные течения. В результате возникает достаточно интенсивный массоперенос в этой области, что было подтверждено опытами на установке ТРАССЕР. Согласно полученным результатам можно сделать вывод, что отсутствие перемешивающих элементов в периферийном ряде решёток не приведет к снижению вклада решеток типа "вихрь" и в натурной кассете.

По результатам исследований с фреоновым теплоносителем можно отметить, что РИ типа "вихрь" оказались достаточно эффективными по влиянию на критическую мощность

сборки. Относительно низкие смешительные свойства этого типа решёток вряд ли можно считать серьезной проблемой, так как поперечные неравномерности параметров теплоносителя в натуральных ТВС относительно невелики. Как показывают оценки, повышение коэффициента перемешивания даже в 5-7 раз может способствовать повышению критической мощности лишь на уровне двух процентов. В связи с этим были проведены исследования влияния РИ на кризис теплообмена в ТВС с натуральным теплоносителем, проведен анализ данных с использованием локальных параметров потока и подготовлены результаты для разработки расчетных зависимостей.

3. Результаты исследований на стенде с водяным теплоносителем СВД-2

Следующим важным шагом при обосновании ТВС является получение экспериментальных данных при использовании натурального теплоносителя – воды.

Как правило, детальное обоснование кассет новой конструкции требует проведения исследований в достаточно широком диапазоне параметров. Статистически приемлемый объем данных включает более 400-500 значений КТП, полученных в опытах с четырьмя и более моделями ТВС. На данном этапе ограничимся исследованиями, проведенными с использованием двух моделей ТВС натурной длины в следующем диапазоне параметров: давление 10,0 ÷ 18,0 МПа; массовая скорость 1000 ÷ 5000 кг/(м²с); температура воды на входе в модель 70 ÷ (Ts - 20) °С.

Одна из моделей содержала девятнадцать имитаторов, а другая – восемнадцать имитаторов твэлов и имитатор направляющего канала (НК). В обеих моделях было реализовано равномерное распределение тепловыделения по длине и неравномерное распределение по поперечному сечению. Поперечное сечение модели с девятнадцатью имитаторами приведено на рисунке 10. Модель была оснащена достаточно большим количеством датчиков, предназначенных для измерений температур и скоростей теплоносителя в межимитаторном пространстве, а также температур имитаторов для фиксации кризиса теплообмена.

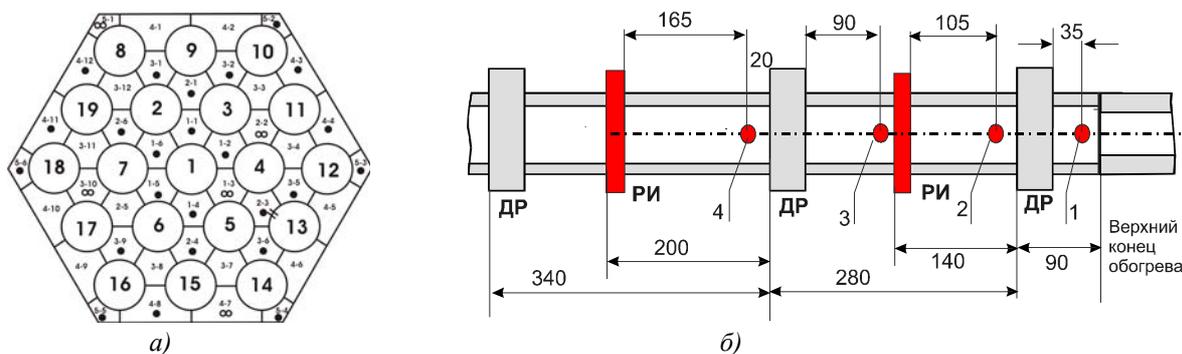


Рисунок 10 – Типичная схема расположения датчиков по сечению модели ТВС, а), и термопар (1,2,3,4) для фиксации кризиса теплообмена, б). Обозначения на схеме поперечного сечения модели ТВС: ● – термопара в потоке, 24 шт; ∞ – трубка Пито, 5 шт; = – верхний отбор статического давления

Обе модели (с НК и без НК) оснащались как решётками типа “вихрь”, так и решётками типа ”циклон”. На основании данных, полученных в опытах с моделью без НК, можно отметить следующее. Достаточно часто кризис теплообмена возникает как после ДР, так и после РИ. Следует отметить также, что примерно в 75 % случаев кризис возникал одновременно после ДР и РИ. Оценки показывают, что в связи с относительно небольшим расстоянием между термопарами 2 и 3 (140 мм) различия в критических паросодержаниях были невелики: около 0,01 – 0,02. С учетом небольших различий между расстояниями от

верхнего края решеток до термопар и одновременной фиксации кризиса этими термопарами можно предположить, что вклад решеток ДР и РИ в повышение критической мощности был практически одинаков. Объяснить это можно только тем, что воздействие РИ типа "вихрь" распространяется и на область, расположенную после ДР. Аналогичная ситуация наблюдалась и ранее с близкими по эффективности перемешивающими решетками типа "прогонка". В частности, с решетками типа "прогонка" было получено, что наличие в предшествующей области решеток-интенсификаторов существенно повышает КТП и после ДР. Поэтому для решеток типа "прогонка" были получены отдельные корреляции для КТП после РИ и после ДР. Причем, после РИ вклад решеток в системе локальных параметров составлял около 30 %, а после ДР – около 25 % (при наличии РИ на предшествующем участке). Механизм такого влияния остается открытым и предполагает проведение специальных исследований.

В опытах с решетками типа "вихрь" достаточно часто кризис теплообмена фиксировался одновременно и после перемешивающих решеток 2 и 4. Это обусловлено следующим: паросодержание в месте расположения термопары 2 выше, однако этот недостаток компенсируется меньшим расстоянием от РИ (105 мм вместо 165, рисунок 10б). Это выравнивает условия наступления кризиса. В таких случаях, когда в обоих сечениях одновременно достигаются кризисные состояния можно считать, что расположение в модели решеток-интенсификаторов является оптимальным.

Использование в опытах на стенде СВД-2 решеток типа "вихрь" позволило получить более высокие значения КТП по сравнению с решетками типа "циклон". Сравнение опытных данных для моделей с решетками типа "циклон" и "вихрь", полученных на стенде СВД-2, приведено в виде фрагмента в таблице 3.

Таблица 3

Относительная разница δ критических мощностей сборок в опытах с решётками "циклон" и "вихрь"

P , бар	T_{in} , °C	ρW_2 , кг/(м ² ·с)	N_{cr} , кВт циклон	N_{cr} , кВт вихрь	δ , %
160,7	289,5	2032	1604,1	1745,6	8,8
" - "	" - "	" - "	" - "	" - "	" - "
160,8	309,6	3040	1901,2	2064,9	8,6
161,5	330,9	3000	1489,1	1723,2	15,7
" - "	" - "	" - "	" - "	" - "	" - "
159,9	310,1	3975	2374,2	2507,7	5,6
160,2	329,7	3907	1874,5	2116,3	12,9
" - "	" - "	" - "	" - "	" - "	" - "
180,4	299,8	2967	2168,7	2273,4	4,8
179,8	331,6	4972	2413,4	2676,6	10,9
Среднее отклонение					9,5

Фрагмент данных относится к близким к проектным массовым скоростям и высоким давлениям. Из этих данных также следует, что с повышением температуры теплоносителя на входе (и повышением паросодержания на выходе) вклад РИ типа "вихрь" в критическую мощность сборки существенно повышается. Такая тенденция является весьма характерной для интенсификаторов теплообмена. Аналогичное повышение КТП и критической мощности с увеличением температуры на входе отмечается и зарубежными специалистами [1].

Следующим достаточно важным моментом при обосновании ТВС является исследование влияния НК на запасы до кризиса теплообмена. В таблице 4 приведено сравнение критических мощностей моделей с НК диаметром 13 мм и без НК. Для сравнения

данных при одинаковых режимных параметрах критические мощности в опытах с моделью без НК были описаны эмпирической зависимостью со среднеквадратической погрешностью ~ 2,5 % при практически нулевом смещении. Далее, экспериментальные данные для модели с НК сравнивались с расчетными при требуемых режимных параметрах.

Как видно из таблицы, критические мощности практически (в пределах точности измерений) совпадают. Тем самым какие-либо проблемы при обосновании запасов до кризиса при НК диаметром 13 мм отсутствуют.

Таблица 4

Сравнение критических мощностей моделей, оснащенных решетками типа "вихрь" при наличии и отсутствии НК.

P , МПа	T_{in} , °С	ρW , кг/(м ² с)	N_{cr} , кВт с НК	N_{cr} , кВт без НК	δ , %
10,04	251,1	2038	2109	2171	-2,81
10,02	251,4	2007	2255	2149	4,94
"-"	"-"	"-"	"-"	"-"	"-"
10,01	251,0	4039	3390	3251	4,27
12,00	151,2	2088	3059	2982	2,61
"-"	"-"	"-"	"-"	"-"	"-"
17,97	330,8	3009	1765	1810	-2.48
18,07	251,5	4982	4377	4472	-2.12
Среднее отклонение					- 0,35

Вопросы обоснования безопасности и запасов до кризиса в ядерно-энергетических установках требуют поиска наиболее напряженных областей активной зоны. Тем самым требуются методики для получения детальной локальной информации по областям зоны вплоть до отдельных твэлов. Такие программы необходимы и для анализа экспериментальных данных, полученных на моделях ТВС. В нашем случае для такого анализа использовались программы ВЯЗ.2М (ФЭИ) и ПУЧОК (ОКБ "Гидропресс").

При использовании как названных так и других аналогичных программ для определения локальных параметров теплоносителя необходима информация о гидравлических сопротивлениях, интенсивности поперечного перемешивания потока (в частности, о величине коэффициента перемешивания) и др. В данной работе коэффициент перемешивания определялся по результатам исследований на установке ТРАССЕР, рисунок 11. Установка ТРАССЕР представляет собой небольшой циркуляционный контур, в котором располагается модель ТВС с исследуемой решеткой-интенсификатором. В поток теплоносителя перед исследуемой решеткой подается краситель. По степени изменения концентрации красителя после исследуемой решетки определяется коэффициент перемешивания. Фактически, он определяется с использованием той же программы, по которой определялись и локальные параметры. Однако в данном случае аналогом температуры или паросодержания является концентрация красителя.

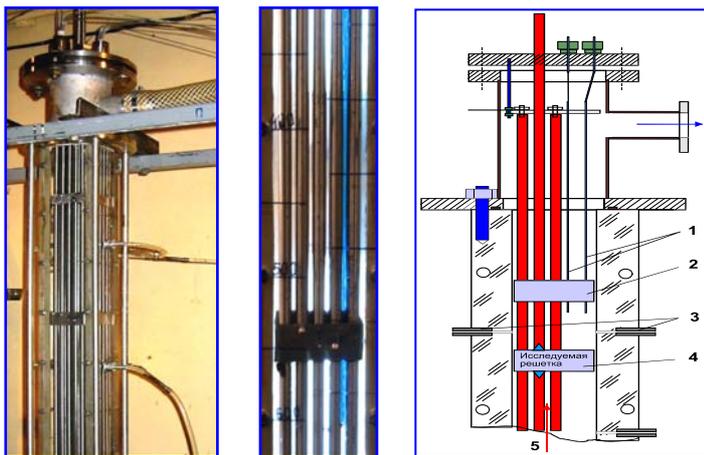


Рис. 11. Фрагменты установки ТРАССЕР.

- а) Вид модели ТВС, установленной в прозрачном корпусе;
- б) фото поперечного сечения модели ТВС при подаче трассера в одну из ячеек (затененный по высоте зазор между имитаторами);
- в) принципиальная схема модели ТВС: 1- пробоотборники; 2 - дистанционирующая решетка; 3 - отбор давления; 4 - исследуемая решетка; 5 - место подачи трассера (красителя).

а) б) в)

Выполненные расчеты показали, что удовлетворительное согласие расчетных и экспериментальных данных о концентрациях красителя на длинах до 200 ÷ 400 мм после перемешивающей решётки "вихрь" достигается при значениях коэффициента перемешивания $K_t = 0,02 \div 0,05$. С некоторым консерватизмом в дальнейших расчетах использовалась величина $K_t = 0,02$. Можно отметить, что такое значение коэффициента перемешивания нами рекомендовалось ранее и для областей после сотовых дистанционирующих решеток.

Расчеты показали, что различие локальных параметров, полученных с использованием программ ВЯЗ-2М и ПУЧОК, относительно невелико, таблица 5. Совпадение результатов по различным программам дает основание полагать, что найденные локальные параметры близки к реальным.

Таблица 5

Сравнение локальных параметров, полученных с использованием программ межъячейкового анализа ВЯЗ-2М и ПУЧОК

N опыта	$P_{вых}$, МПа	$q_{сред}$, кВт/м ²	T_{in} , °С	$\rho W_{сред}$, кг/(м ² с)	ρW , кг/(м ² с) ВЯЗ.2М	ρW , кг/(м ² с) ПУЧОК	$x_{лок}$ ВЯЗ.2М	$x_{лок}$ ПУЧОК
139	9,86	1051	250,9	2003	1835	1900	0,338	0,334
140	9,90	1058	248,8	2000	1830	1891	0,334	0,330
" - "	" - "	" - "	" - "	" - "	" - "	" - "	" - "	" - "
176	14,05	1719	249,4	4008	3411	3540	0,140	0,136
177	13,98	1698	250,9	4008	3402	3543	0,142	0,138
" - "	" - "	" - "	" - "	" - "	" - "	" - "	" - "	" - "
122	16,05	1415	310,5	4998	4770	4791	0,181	0,172

Согласно полученным данным различие в паросодержаниях составляет, в основном, 0,01 – 0,02, что может привести к погрешности определения КТП около 3 – 4 % (в системе локальных параметров) или 1,0 – 2,0 % при определении критической мощности. Эти различия находятся, фактически, на уровне погрешностей измерительной техники. Что касается различий в массовых скоростях, то они значительно выше и могут составлять около 5 – 8 %. Однако следует иметь в виду, что критические тепловые потоки относительно слабо зависят от массовых скоростей и такие различия в массовых скоростях приводят к различиям в КТП на уровне 2 – 3 %.

Представляет несомненный интерес сравнение полученных данных по КТП с использованием решеток типа "вихрь" с расчетными данными по используемой в настоящее время корреляции для ТВС, оснащенных дистанционирующими решетками. В таблице 6 приведено отношение критического теплового потока при использовании решеток "вихрь" (при найденных локальных параметрах) к расчетному значению КТП по корреляции ОКБ "Гидропресс" [2]. Как видно, повышение КТП составляет около 20 %.

Следует отметить, что это не означает возможность повышения мощности модели ТВС на 20 % и тем более возможности повышения тепловой мощности АЭС и выработки

электроэнергии на 20 %. Это связано с выбором методики обоснования запасов до кризиса.

Фактически, возможны два подхода, которые основываются на так называемых "входных" и "выходных" параметрах. Корректнее было бы заменить "выходные" параметры на локальные. Под "входными" параметрами понимается температура теплоносителя на входе, расход теплоносителя (или средняя массовая скорость) и давление. Выходные или локальные параметры связываются с паросодержанием в месте кризиса, с локальной массовой скоростью и давлением.

Таблица 6

Сравнение экспериментальных значений КТП для модели из 19 имитаторов ТВЭЛ, оснащенной тремя перемешивающими решетками типа "вихрь", с расчетными данными, полученными по зависимости ОКБ "Гидропресс"

№ опыта	$P_{\text{вых}}$, МПа	$\rho W_{\text{лок}}$, кг/(м ² с) ВЯЗ.2М	$x_{\text{лок}}$ ВЯЗ.2М	q_{cr} , эксп. кВт/м ²	q_{cr} , расчет кВт/м ²	q_{cr} , эксп. / q_{cr} , расч.
23	10,05	954,2	0,349	1004,9	855,8	1,17
138	9,98	1839,8	0,323	1246,4	981	1,27
139	9,86	1835,3	1233,3	942,9	0,338	1,31
140	9,9	1829,7	1241,1	952,1	0,334	1,30
" _ "	" _ "	" _ "	" _ "	" _ "	" _ "	" _ "
180	18,06	4606,2	2003,4	1751,9	0,087	1,14
186	17,96	3880,9	1307,6	1094	0,194	1,20
В среднем, по всему массиву						1,197

Получив данные по критической мощности (или критическому тепловому потоку, можно определить и запасы до кризиса теплообмена, т.е. насколько мы далеки от кризисной ситуации. Величина запасов до кризиса по входным и локальным параметрам иллюстрируется на рисунке 12. В мировой практике (и в России) при обосновании запасов до кризиса используется, как правило, "локальный" подход, при котором определяются локальные параметры для напряженных областей зоны и с использованием корреляции по локальным параметрам определяются запасы до кризиса в требуемом сечении (линия 2 на рисунке 12). В данном случае при некоторых текущих параметрах ($X_{\text{тек}}$, $q_{\text{тек}}$) запас до кризиса по тепловому потоку составляет ~ 20 %. Таким образом открывается возможность повышения критического теплового потока или тепловой мощности. С повышением тепловой мощности возрастает не только тепловой поток но и паросодержание в данном сечении. Применительно к рисунку 12 при повышении тепловой мощности на ~ 10 % возможно возникновение кризиса теплообмена. Оценки показывают, что в области режимных параметров, типичных для реакторов ВВЭР, запасы по критической мощности в 2-3 раза ниже запасов по локальным параметрам.

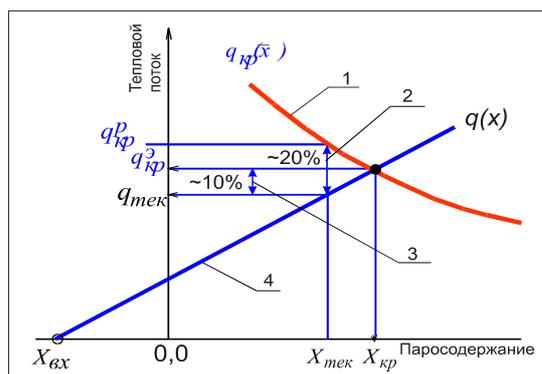


Рис. 12. Качественный характер сравнения запасов до кризиса с использованием входных и локальных параметров.
 1- зависимость КТП от паросодержания; 2- запас до кризиса при паросодержании $x_{\text{тек}}$; 3- запас до кризиса при повышении теплового потока до пересечения с линией 1; 4 - зависимость паросодержания от теплового потока (линия теплового

Таким образом, по результатам проведенных исследований можно сказать, что использование перемешивающих решеток типа "вихрь" с 19-ю фигурными сотовыми ячейками обеспечивает повышение критической мощности на 8 – 10 % или повышение запасов до кризиса примерно на 20 %.

Следует отметить, что в данном случае речь идет именно о возникновении кризиса теплообмена в области расположения решеток-интенсификаторов при равномерном тепловыделении по длине. Что касается неравномерного тепловыделения по длине с возможным смещением места кризиса в область отсутствия решеток-интенсификаторов, то, как было показано в опытах с фреоном, возможно существенное изменение критической мощности при изменении профиля распределения тепловыделения. В связи различием профилей тепловыделения при эксплуатации АЭС и относительно небольшим объемом полученных данных требуются дополнительные исследования на моделях ТВС с решетками типа "вихрь".

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 Сравнение опытных данных по кризису теплообмена, полученных с использованием фреонового стенда с моделями ТВС, оснащенными РИ типа "циклон" и "вихрь", показало, что использование РИ типа "вихрь" приводит к существенному повышению критических мощностей и КТП. В среднем, по всей исследованной области параметров теплоносителя критические мощности сборок при использовании решёток "вихрь" примерно на 12 % выше, чем критические мощности сборок с решетками типа "циклон" при одинаковом расположении решёток.

2 Максимальный прирост критической мощности относительно мощности модели, оснащенной только дистанционирующими решетками, при использовании РИ типа "вихрь" наблюдается при давлении 12,5 МПа. Прирост снижается с повышением давления и массовой скорости. При давлении 16,0 МПа прирост мощности составляет 8 ÷ 11 %. Такие закономерности подтверждаются также и другими исследованиями.

3 Исследования на установке ТРАССЕР показали, что отсутствие на периферии модели части фигурных сотовых элементов интенсифицирует перемешивание в окрестности такой области и способствует повышению КТП до прежнего уровня, соответствующего наличию всех фигурных элементов.

4 Проведено сравнение расчетных данных по локальным параметрам потока с использованием программ ВЯЗ.2М и ПУЧОК при наступлении кризиса теплообмена. Получено удовлетворительное согласие результатов расчета по этим двум программам.

5 Сравнение КТП, полученных в опытах с моделью ТВС с решетками типа "вихрь", и расчетных данных с использованием корреляции ОКБ "Гидропресс" показало, что с увеличением паросодержания вклад решеток типа "вихрь" в повышение КТП возрастает. Он составляет около 20 % при близких к проектным параметрах (массовой скорости около 3800 кг/(м²с), давлении около 16 МПа и критическом паросодержании около 0,2). Полученные данные качественно согласуются с результатами зарубежных исследований по вкладу турбулизации потока в повышение КТП [1].

ЛИТЕРАТУРА

1. Karoutas Z.E., Joffre P.F., Nordström L. Critical Heat Flux Testing for 6x6 Rod Bundle Geometry // Transaction of 6th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE-6049). May 10–14 of 1998. P. 13.
2. Безруков Ю.А., Астахов В.И., Брантов В.Г. Экспериментальные исследования и статистический анализ данных по кризису теплообмена в пучках стержней для реакторов ВВЭР// Теплоэнергетика. 1976. № 2. С. 80–82.