

ВЛИЯНИЕ ВИХРЕВЫХ РЕШЕТОК-ИНТЕНСИФИКАТОРОВ ТЕПЛООБМЕНА НА ПОВЕДЕНИЕ ПАРОВОЙ ФАЗЫ В МЕЖТВЭЛЬНОМ ПРОСТРАНСТВЕ ТВС

В.В. Сергеев, В.С. Федотовский, С.И. Щербаков

Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск, Россия

В проектах АЭС-2006 и ВВЭР-ТОИ предусматривается увеличение тепловой мощности реакторной установки до 3200-3300 МВт. Такое повышение мощности вместе с повышением параметров теплоносителя по второму контуру ведет к снижению среднего по выходному сечению ТВС запаса до кипения и минимального запаса до кризиса теплоотдачи, что может негативно сказаться на теплофизической надежности твэла и активной зоны в целом.

Для поддержания теплотехнических запасов на безопасном уровне, планируется установка в ТВС перемешивающих решеток (ПР). Оснащение ТВС перемешивающими решетками имеет конечной целью повышение энергонапряженности активной зоны, снятие некоторых эксплуатационных ограничений, расширение рабочих границ при безусловном соблюдении требований теплотехнической надежности, геометрической стабильности и целостности топливных сборок [1-2]. При этом желательно, чтобы используемые для таких целей конструкции ПР обеспечивали повышение тепловых характеристик ТВС без существенного увеличения её гидравлического сопротивления.

Для РУ ВВЭР-1000 в настоящее время предложены два варианта оснащения ТВС решетками-интенсификаторами. Это – сотовые решетки типа «Вихрь» для ТВС-2М конструкции ОКБ «Гидропресс» и пластинчатые ПР типа «Прогонка» для ТВСА-АЛЬФА конструкции ОКБМ. Первые создают вихревые течения в межТВЭльных ячейках, вторые - направленные течения в ТВС.

В настоящей работе исследовалось поведение газовой фазы двухфазного потока в межТВЭльном пространстве прозрачной модели ТВС ВВЭР в присутствии решеток-интенсификаторов вихревого типа.

Входная часть экспериментальной модели состояла из круглой трубы внутренним диаметром 50 мм, внутри которой были размещены три сегментных вытеснителя диаметром 45 мм. Выходная часть экспериментальной модели имела идентичный по форме поперечного сечения прозрачный участок для визуального наблюдения, видео- и фотосъемки движения газовых пузырьков в потоке. Таким образом, модель представляла собой одну, увеличенную в масштабе 5:1, ячейку реальной ТВС и обеспечивала возможность подачи газа через стенки вытеснителей для имитации пристенного кипения на поверхности твэлов.

На входе в прозрачный участок модели предусмотрена возможность установки стандартной (без закрутки потока) решетки и пяти вариантов решеток типа “Вихрь”, создающих вращение потока в межТВЭльном пространстве.

Модели решеток представляли собой конструкцию, образованную из трех изогнутых под углом 120 градусов пластин высотой 75 мм, шириной 50 мм и толщиной 0,5 мм. Сложенные вместе и сваренные по торцам пластины образовали трехлепестковую модель стандартной (не вихревой) решетки. Лепестки других аналогичных решеток были изогнуты так, чтобы образовались вихревые интенсификаторы с разной степенью закрученности. Всего было изготовлено четыре интенсификатора с разными углами наклона лопастей θ (по образующей на радиусе описанного цилиндра) $\text{tg}\theta=6/75; 10/75; 15/75; 20/75$. Кроме того, для усиления эффекта закрутки потока был изготовлен еще один вариант модели вихревого интенсификатора, представляющий собой комбинацию двух последовательно

расположенных вихревых решеток длиной по 37 мм каждая с углом наклона лопастей $\text{tg}\theta=20/37$ (двойная вихревая решетка типа $2\times 20/37$).

Фотографии моделей прямой стандартной решетки ($\text{tg}\theta=0/75$) и использовавшихся в опытах вихревых решеток-интенсификаторов теплообмена (типа 6/75, 10/75, 15/75, 20/75 и $2\times 20/37$) представлены на рис.1.

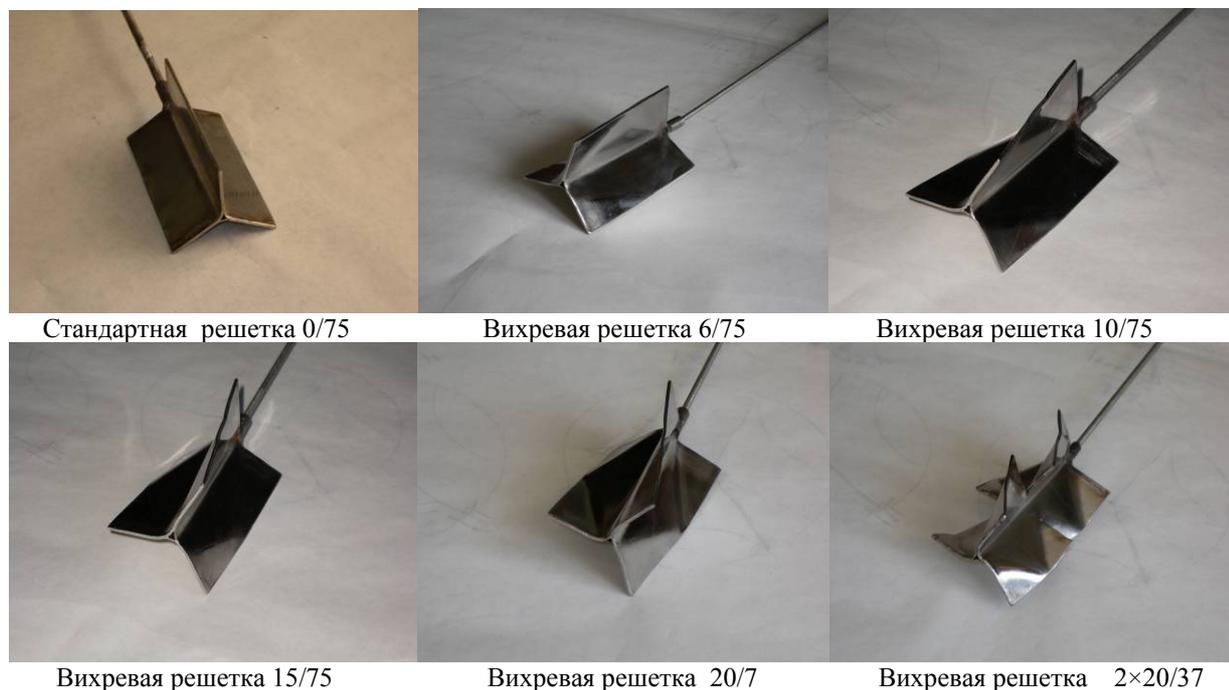


Рис.1. Модели решеток

Для измерения перепада давления и определения коэффициентов гидравлического сопротивления обеих типов решеток в прозрачном участке выполнены отборы статического давления. Кроме того, для ввода газовых пузырьков в поток в верхней части металлических вытеснителей (вблизи входа в прозрачный участок) выполнены отверстия диаметром 1мм с приваренными капиллярами.

В опытах с моделями стандартной и вихревых решеток-интенсификаторов, установленными в прозрачном участке ТВС, были определены гидравлические сопротивления моделей интенсификаторов, а также проведена фотосъемка траекторий газовых пузырьков, вводимых в поток через отверстие в имитаторе твэла при различной скорости потока воды в канале.

По измеренным в опытах перепадам давления на решетках были рассчитаны коэффициенты гидравлического сопротивления $\xi = 2\Delta P / \rho V^2$, представленные на рис. 2.

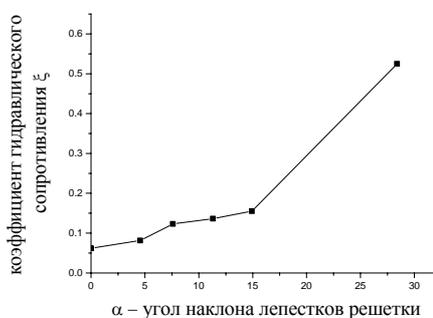
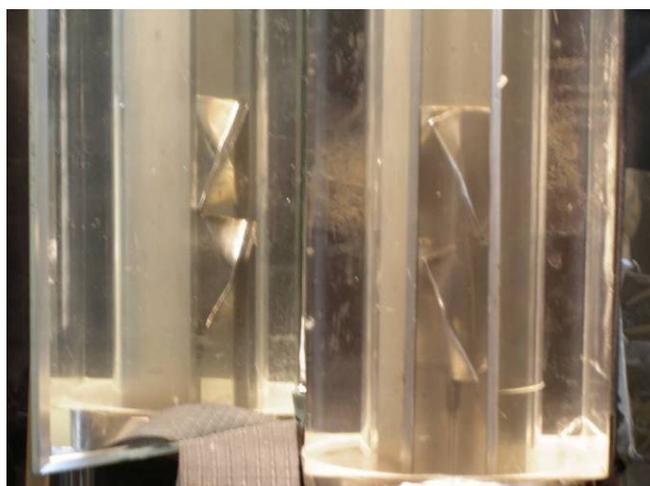
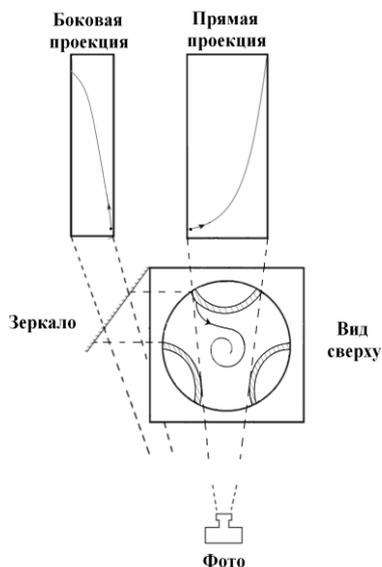


Рис.2. Гидравлическое сопротивление вихревых решеток

Основная задача экспериментов по визуализации заключалась в определении траекторий газовых пузырьков в закрученном вихревыми решетками потоке. Наиболее важной информацией, получаемой при обработке массива фотографий, является скорость удаления пузырьков от поверхности имитатора твэла за счет градиента давления, возникающего в закрученном вихревой решеткой потоке.

Для получения таких данных решетки-интенсификаторы устанавливались ниже отверстия ввода газа, а фотосъемка прозрачной части канала с выходящими из отверстия пузырьками производилась с использованием зеркала бокового вида, установленного под углом 45 градусов слева от участка.

Схематично прозрачная часть экспериментального участка с вытеснителями, зеркало бокового вида и фотоаппарат показаны на рис.3а. На рис. 3б показано расположение двойной вихревой решетки в прозрачном участке.



а)

б)

Рис.3. Схема прозрачного участка и проекции двойной вихревой решетки

Таким образом, были получены фотографии с двумя проекциями траектории пузырьков, движущихся в закрученном потоке по винтовой спиральной кривой (см. рис. 4).



Решетка 10/75,
угол наклона
лепестков 7°



Решетка 15/75,
угол наклона
лепестков 12°



Решетка 20/75,
угол наклона
лепестков 15°



Решетка 2X20/37,
угол наклона
лепестков 30°

Рис.4. Характерные траектории шлейфа пузырьков

Из фотографий видно, что по мере увеличения степени закрученности вихревой решетки-интенсификатора траектории приобретают вид все более закрученной спирали с увеличивающейся скоростью удаления пузырьков от стенки имитатора твэла.

В результате обработки фотографий были получены параметры спиральных траекторий пузырьков и определены касательная V_t и нормальная V_n составляющие скорости пузырьков вблизи поверхности имитатора твэла при различной продольной скорости потока V в канале (в диапазоне от 0 до 7 м/с). Отношение скоростей V_t/V , V_n/V представлены на рисунке 5.

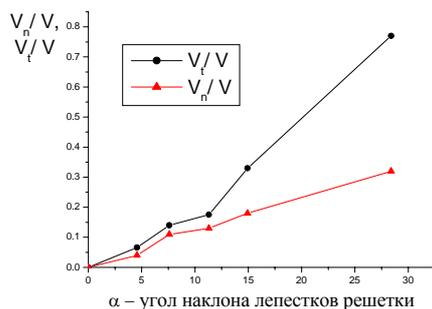


Рис.5. Касательная и нормальная составляющая скорости пузырьков вблизи поверхности твэла

Таким образом, опыты с моделями вихревых решеток-интенсификаторов показали, что скорость удаления пузырьков от поверхности имитатора твэла увеличивается по мере увеличения степени закрученности вихревой решетки.

С другой стороны, опыты показали, что коэффициент гидравлического сопротивления вихревых решеток также возрастает по мере увеличения степени закрученности вихревой решетки и, таким образом, позитивный эффект удаления газовой фазы и негативный эффект повышения гидравлического сопротивления вихревых решеток взаимосвязаны.

По результатам экспериментальных исследований был верифицирован разработанный в ГНЦ РФ-ФЭИ расчетный код TURBOFLOW, позволяющий рассчитывать как эффект удаления газа (пара) от поверхности твэлов, так и гидравлическое сопротивление вихревых решеток интенсификаторов для натуральных ТВС.

Вариантные расчеты по коду TURBOFLOW показали, что наиболее оптимальной для обеспечения достаточной скорости удаления газа (пара) от поверхности твэлов является модель вихревой решетки с углом наклона лопастей $\theta=11$ градусов, обеспечивающая достаточную скорость удаления газа (пара) от поверхности имитатора твэла и имеющая при этом относительно небольшое гидравлическое сопротивление.

Работы проводились по договору с ОАО «ТВЭЛ» в рамках реализации программы по интенсификации теплообмена в ТВС ВВЭР.

Литература

1. Crecy F., Juhel D. Methodology for the Study of the Boiling Crisis in a Nuclear Fuel Bundle // NURETH-7, pp. 2480 - 2488. Saratoga Springs, USA, Sept. 10-15, 1995.
2. О.Б.Самойлов, В.Б.Кайдалов, А.И.Романов и др. Развитие ТВСА ВВЭР-1000. Расчетно-экспериментальное обоснование перемешивающих решеток // Сб. трудов 6-й Международной научно-технической конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР», Подольск, 26-29 мая 2009.