

Обоснование теплотехнической надежности ВВЭР1200 с установленными в ТВС перемешивающими решетками

И. А. Лазарева¹, И. Л. Парамонова²

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Санкт-Петербург, Россия

¹l.irina.p@mail.ru, ²i-p-lev@mail.ru

Аннотация. На сегодняшний день, когда мы говорим об атомной энергетике, на первое место встает вопрос о необходимости обеспечения эксплуатации атомных электростанций. Поэтому необходимо правильно организовать и достаточно точно рассчитать условия теплообмена для того, чтобы создать работоспособный энергетический ядерный реактор. Работа направлена на обоснование теплотехнической надежности активной зоны ВВЭР-1200 с усовершенствованными тепловыделяющими сборками, в конструкцию которых включены перемешивающие решетки типа «вихрь» и «прогонка». Показано, что данное конструкторское решение позволяет повысить количество выработанной электроэнергии за счет увеличения критической мощности тепловыделяющих сборок для реактора ВВЭР. В качестве предметов исследования были выбраны: теплогидравлические процессы в активной зоне и явление кризиса теплообмена первого рода.

В соответствии с намеченной целью исследования была определена следующая методика, при которой были выделены два этапа расчетной части. Первый этап заключал в себя теплогидравлический расчет, в ходе которого были определены распределения температуры и тепловых потоков по высоте и сечению максимально нагруженного твэла с учетом зоны поверхностного кипения. В ходе второго этапа был найден коэффициент запаса до кризиса теплообмена. Такой подход позволил дать полную оценку теплотехнической надежности исследуемой реакторной установки, на основании найденных критериев. Были найдены: потери давления в ВВЭР-1200 в зоне пристенного кипения, неравномерности тепловых потоков, запас до кризиса теплообмена, параметры потока в двухфазном состоянии.

Доказано, что изменения в конструкции тепловыделяющей сборки, путем добавления четырех решеток типа «вихрь» и «прогонка», способствуют повышению теплотехнической надежности активной зоны ВВЭР-1200, что позволит эксплуатацию блока на повышенном уровне мощности и приведет к повышению энергоэффективности АЭС.

Практическая значимость работы заключается в определении показателей теплотехнической надежности активной зоны, отвечающих за безопасность реакторной установки.

Ключевые слова: теплотехническая надежность; тепловыделяющая сборка; критическая мощность; энергоэффективность; кризис теплообмена; запас до кризиса; перемешивающие решетки; водо-водяной энергетический реактор; дистанционирующая решетка; поверхностное кипение

I. ВЛИЯНИЕ ПЕРЕМЕШИВАЮЩИХ РЕШЕТОК ТИПА «ВИХРЬ» И «ПРОГОНКА» НА КРИТИЧЕСКУЮ МОЩНОСТЬ СБОРОК

В современной энергетике одной из важнейших задач является повышение энергоэффективности АЭС с ВВЭР. Поэтому необходимо постоянно проводить исследования и работы по многим направлениям, а именно: по увеличению установленной мощности действующих энергоблоков с помощью усовершенствования оборудования; повышение коэффициентов использования установленной мощности (КИУМ); по увеличению выгорания ядерного топлива и др. Например, сегодня все блоки Балаковской и Ростовской АЭС переведены на мощность 104 % от номинальной без изменения конструкции активной зоны.

Цель работы – обосновать теплотехническую надежность ВВЭР-1200 при использовании конструкции усовершенствованных ТВС с перемешивающими решетками, установленными с целью повышения критической мощности сборок и, как следствие, влияющими на увеличение выработки электроэнергии в реакторе ВВЭР1200.

Количественно безопасность работы АЭС определяется риском, равным произведению вероятности аварии на тяжесть ее последствий. Тут возникает почва для неопределенности оценки, поскольку аварии на очень надежном оборудовании АЭС редки, а тяжесть последствий может быть большой.

В активной зоне сосредоточена ядерная энергия эквивалентная нескольким ГВт·год, тепловая, механическая и химическая энергии, эквивалентные тоннам бензина, сотни молей радиоактивных и токсичных веществ (например, плутоний).

Именно поэтому в проекте реактора заранее предусмотрены меры по преодолению возможных аварий, определены противоаварийные средства [1].

ВВЭР-1200 – или же водо-водяной энергетический реактор третьего поколения, на сегодняшний день является новейшей разработкой в семействе реакторов этого типа. Летом 2016 года впервые был запущен реактор ВВЭР-1200 на шестом энергоблоке Нововоронежской атомной электростанции. В последствие его добавили в российскую систему энергетике.

Безопасность АЭС с реактором ВВЭР-1200 – проект, который направлен на соблюдение правил безопасности МАГАТЭ, общепринятых норм и стандартов, а также российских правил и требований.

Цель, которая стоит перед инженерами, заключается в том, чтобы повысить безопасность реакторной установки, и тем самым уменьшить вероятность выброса радиоактивных веществ при авариях любого типа.

Если сравнить ВВЭР-1200 и ВВЭР-1000, то можно отметить, что не только мощность возросла на 20 процентов, но и срок службы, который предполагает повысить время эксплуатации до 60 лет.

Эволюция технологии ВВЭР связана с модернизацией тепловыделяющих сборок (ТВС). В

новых моделях ТВС до минимума снижена возможность разгерметизации, их конструкции ремонтнопригодны, позволяют использовать новые виды топлива – MOX и REMIX, что позволит уменьшить долю радиоактивных отходов и замкнуть ядерный топливный цикл. Поэтому текущей задачей является обоснование безопасной эксплуатации блока в режиме на повышенном уровне мощности с использованием тепловыделяющих сборок нового поколения ТВС-2М.

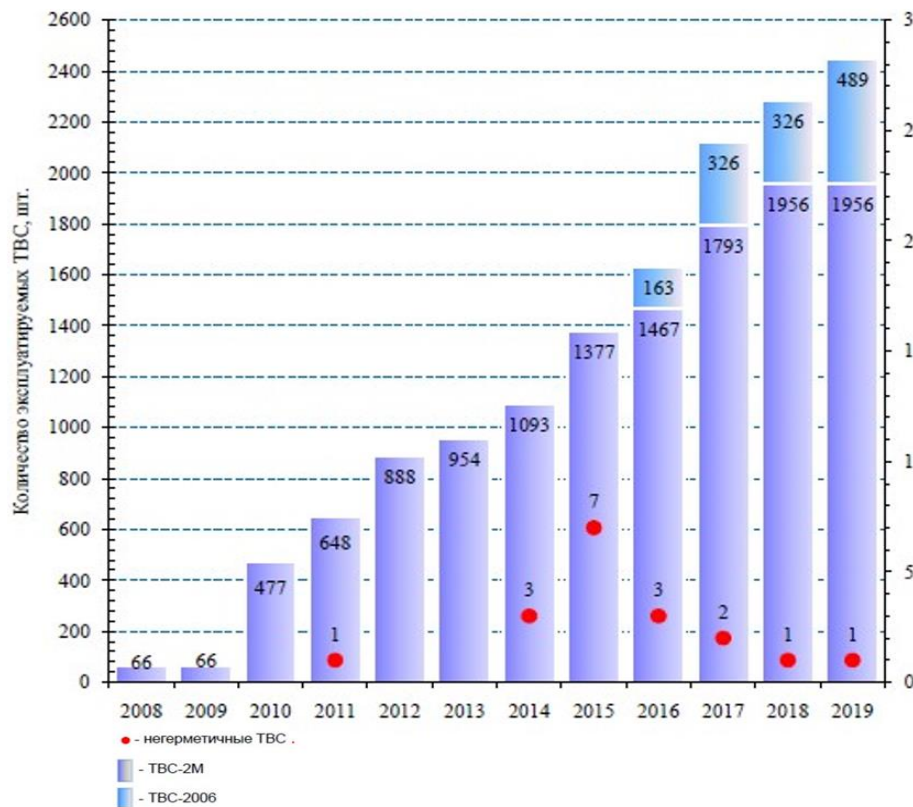


Рис. 1. Результаты эксплуатации ТВС-2М и ТВС-2006

Тепловыделяющая сборка ТВС-2М – это новое, третье поколение топливных сборок для ВВЭР. Кассета ТВС-2М отличается от предшествующих конструкций увеличенным топливным столбом. Это позволяет обеспечить более длительные топливные циклы (18 месяцев) и работу реактора на повышенной 104 % мощности. Особенностью конструкции ТВС-2М является сварка направляющих каналов и дистанционирующих решеток. За счёт этого образован жёсткий каркас, практически неподверженный воздействию неравномерности нейтронного и температурного полей. Расчёты и опыт эксплуатации на Балаковской АЭС показали, что ТВС-2М обладают высокой надёжностью, из 1956 загруженных в активную зону реактора 2019 году только одна сборка оказалась негерметичной (рис. 1).

Перемешивающие решетки (ПР) – сотового типа, образованы сваркой специально сформированных ячеек, так же, как и дистанционирующие решетки приварены только к направляющим каналам. ПР не контактируют с твэлами, поэтому фреттинг-износ оболочек твэлов исключён. Гидравлическое сопротивление ПР одинаково при прямом и обратном токе теплоносителя.

Основным показателем надёжной работы ТВС является запас до кризиса теплообмена (отношение плотности критического теплового потока $q_{кр}$ к значению максимального теплового потока по высоте активной зоны). Коэффициент запаса для ВВЭР-1200 $n_{зап} > 1,2 \div 1,3$.

ВВЭР – «некипящий» реактор, однако в наиболее теплонапряженных ТВС, расположенных в центре активной зоны, возможно возникновение поверхностного кипения в верхней части активной зоны. Кипение происходит в прогретом до температуры насыщения узком пристенном слое, в то время как основная масса теплоносителя не достигла температуры насыщения. Массовое (весовое) паросодержание x строго регламентировано и в реакторе ВВЭР1200 не должно превышать 11,4 % на выходе из ТВС с максимальным энерговыделением.

Для снижения паросодержания в потоке теплоносителя и улучшения теплообмена, увеличения запаса до кризиса в ТВС-2М, помимо дистанционирующих решеток (ДР), являющихся частью силового каркаса ТВС и предназначенных для фиксации твэлов, устанавливается 4 перемешивающих решетки (ПР) (рис. 2).

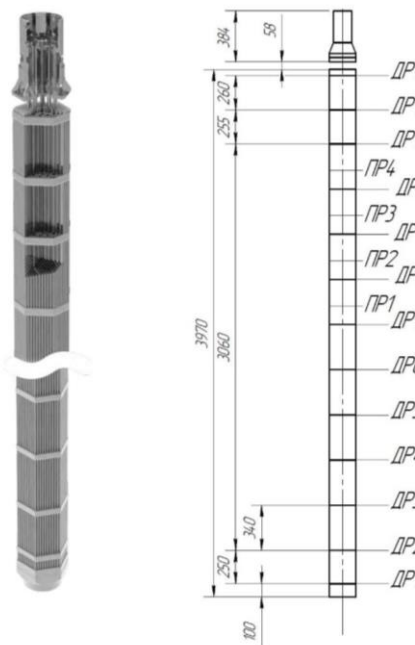


Рис. 2. Конструкция ТВС-2М и схема расположения решёток. ПР1 и ПР2-перемешивающие решетки типа «прогонка». ПР3 и ПР4 – типа «вихрь»

На рис. 2 показана схема расположения 13 дистанционирующих решеток ТВС-2М. Первая дистанционирующая решетка ДР1 находится выше нижней опорной решетки на 100 мм. Между ДР1 и ДР2 расстояние составило 250 мм. Шаг между ДР2 – ДР11 340 мм. Расстояние между ДР11 и ДР12 – 255 мм, а между ДР12 и ДР13 составлял 260 мм.

Перемешивающие решетки располагают по высоте ТВС между дистанционирующими решетками, они могут иметь различную форму ячеек. ПР «прогонка» нацелены на поперечный перенос массы к основному потоку (рис. 2, 3). ПР «вихрь» предназначены для образования локального вихревого течения в потоке, они располагаются в первых двух пролетах, до зоны поверхностного кипения. Теплоноситель, проходя через ячейки решетки, перемешивается и, таким образом, достигается выравнивание температуры. Чтобы удалить пузырьки пара с поверхности тепловыделяющих элементов, используют перемешивающую решетку типа «вихрь». Поток, проходя через них, закручивается и вращается, возникающая центробежная сила направляет воду на периферию вихря, а в центре ячейки собирается пар. Часть пара конденсируется в недогретом до температуры насыщения теплоносителе. Таким образом, снижается паросодержание потока и отодвигается наступление кризиса теплообмена.

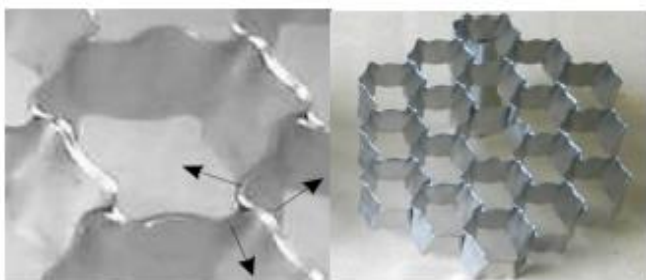


Рис. 3. Перемешивающая решетка типа «вихрь»

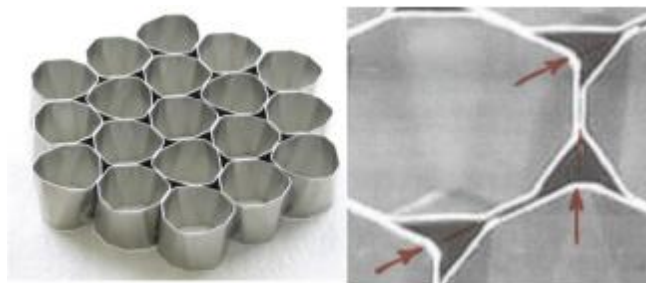


Рис. 4. Перемешивающая решетка типа «прогонка»

Таким образом, с одной стороны, ПР способствуют перемешиванию, турбулизации потока теплоносителя, улучшению отвода тепла от поверхности твэлов, увеличению плотности критического теплового потока $q_{кр}$ и коэффициента запаса соответственно. С другой стороны, установка дополнительных четырех ПР в верхней части сборки увеличивает гидравлическое сопротивление, приводит к снижению давления и, соответственно, температуры насыщения. При этом протяженность зоны поверхностного кипения увеличивается, следовательно, возрастает массовое паросодержание потока, при этом снижается теплотехническая надежность реактора.

Таким образом, необходимо решить оптимизационную задачу – какое количество ПР, в каких сечениях, какого типа («вихрь» или «прогонка»), с каким гидравлическим сопротивлением решеток разместить в ТВС, чтобы обеспечить критерии безопасности по коэффициенту запаса до кризиса и паросодержанию.

Для обоснования надежности ТВС-2М с ПР использована следующая методика:

- точка начала поверхностного кипения определялась графическим путем (рис. 5);
- параметры пароводяного потока в зоне поверхностного кипения найдены по методикам З.Л. Миропольского и В.С. Осмачкина [2];
- расчет потерь давления проведен без кипения и с учетом поверхностного кипения. Гидравлические потери пароводяного потока в зоне поверхностного кипения определялись по методике Локкарта-Мартинелли [3] (рис. 6). В работе были учтены реальные сопротивления перемешивающих решеток;
- по найденным значениям давления по методике Ю.А. Безрукова [4] рассчитаны плотность критического теплового потока и коэффициент запаса до кризиса теплообмена.

Отсутствие кризиса теплоотдачи на поверхности твэла проверялось по величине отношения критического теплового потока, определяемого по локальным параметрам теплоносителя в пучке твэлов, к действительному локальному тепловому потоку с поверхности твэла. Надежное охлаждение твэла считается обеспеченным с вероятностью не менее 95 %, если выполняется условие:

$$n_{зап} = \min \left[\frac{q_{кр} \cdot (1 - \delta)}{q_s} \right],$$

где δ – относительная погрешность соотношения ОКБ «Гидропресс», равная 15 % при доверительной вероятности не менее 95 %.

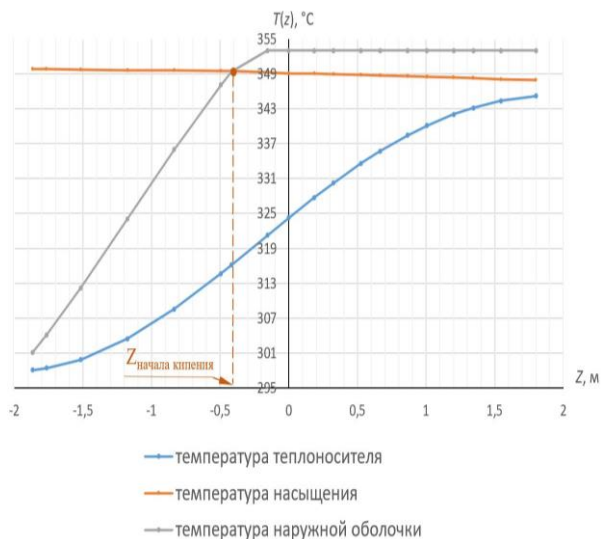


Рис. 5. Распределение температуры по высоте активной зоны ВВЭР1200 при линейном тепловом потоке с поверхности твэла 420 Вт/см

При работе реактора ВВЭР-1200 на повышенной мощности должна быть исключена возможность возникновения кризиса теплообмена первого рода. Кризис первого рода связан с переходом пузырькового кипения теплоносителя в пленочное. При пленочном кипении паровые пузыри на оболочке твэла сливаются, образуя сплошную пленку пара. Термическое сопротивление паровой пленки велико и, следовательно, интенсивность теплоотдачи от оболочек твэлов мала. Температура твэлов при этом резко возрастает, что может привести к расплавлению оболочек и топлива.

Явление кризиса теплообмена в ТВС, изучение которого началось еще в прошлом веке, продолжают исследовать. Существующие методики расчета условий его возникновения являются обобщением большого числа экспериментов, устанавливающих связь критического теплового потока от давления, скорости теплоносителя и массового паросодержания.

Существует несколько способов определения значения критического теплового потока в тепловыделяющих сборках ВВЭР: методика Смолина (НИКИЭТ), методика Безрукова Ю. А. и др. (ГИДРОПРЕСС) [4], таблицы ФЭИ [5]. Подробнейший анализ указанных методик проведен в статьях [6, 7].

Для диапазона рассматриваемых параметров (номинальные условия эксплуатации) выбрана лицензированная методика Ю.А. Безрукова [4]:

$$q_{кр}(z) = 0,795 \cdot (1 - x(z))^n \cdot (\bar{\rho}w)^m \cdot (1 - 0,0185 \cdot P),$$

где $m = 0,184 - 0,311 \cdot x(z)$; $n = 0,105 \cdot P - 0,5$; $q_{кр}(z)$ – плотность критического теплового потока, кВт/м²; $x(z)$ – относительная энтальпия потока теплоносителя; $\bar{\rho}w$ – массовая скорость теплоносителя, кг/(м² · с); P – давление в первом контуре, МПа.

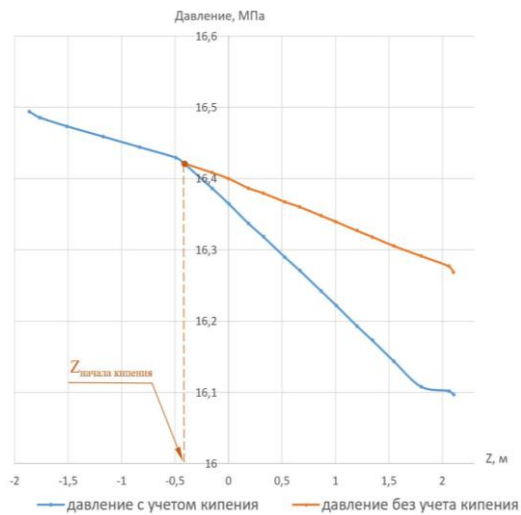


Рис. 6. Изменение давления по высоте активной зоны ВВЭР1200

Диапазон применимости методики [5]:

$$P = 7,5 \div 16,7 \text{ МПа};$$

$$(\rho W) = 700 \div 3500 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с});$$

$$x = -0,07 \div 0,4;$$

$$s/d = 1,34 \div 1,385, \text{ где}$$

s – шаг установки твэлов в ТВС;

d – наружный диаметр твэла.

Методика позволяет достаточно точно определять критический тепловой поток как при недогретом до температуры насыщения теплоносителя, так и в области положительных паросодержаний.

II. РЕЗУЛЬТАТЫ

В ходе работы была обоснована теплотехническая надежность активной зоны реактора ВВЭР1200 с ТВС–2М с установленными четырьмя перемешивающими решетками типа «вихрь» и «прогонка». С этой целью:

- определена координата начала поверхностного кипения $Z = -0,417$ м;
- найдены основные параметры пароводяного потока: истинное объемное и массовое паросодержание, потери давления с учетом зоны поверхностного кипения;
- массовое паросодержание на выходе ТВС составило 7,4 % что меньше 11,4 % (регламентируемый критерий безопасности);
- определены запасы до кризиса теплообмена.

Коэффициент запаса до кризиса в ВВЭР-1200 с ТВС-2М благодаря установке дополнительных перемешивающих решеток увеличился на 5 %.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для того чтобы реактор работал в безопасном режиме, необходимо обеспечить надежную работу систем теплоотвода и тем самым добиться теплотехнической надежности его активной зоны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Поэтому еще на стадии проектирования перед конструкторами встает задача, цель которой – обосновать теплотехническую надежность активной зоны реактора.

Анализ полученных результатов, показал, что добавление четырех решеток в ТВС повышает теплотехническую надежность активной зоны ВВЭР1200, что позволяет эксплуатацию блока в режиме промышленной эксплуатации на повышенном уровне мощности и ведет к повышению энергоэффективности АЭС.

Если говорить о дальнейших перспективах исследования в этом направлении, то хочется отметить необходимость продолжать исследовать методы определения потерь давления на участке поверхностного кипения в сборке стержней (пока только для труб есть методики), использовать численное моделирование (ANSYS).

- [1] Логвинов С.А., Безруков Ю.А., Драгунов Ю.Г. Экспериментальное обоснование теплогидравлической надежности реакторов ВВЭР. М.: Академкнига, 2003. 157 с.
- [2] Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П. Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы) М., Энергоатомиздат, 1990, 360 с.
- [3] Шайрз Г. и др. Теплопередача в двухфазном потоке / под ред. Д.Баттерворса и Г. Хьюитта; пер. с англ. В.В. Ягова, А.К. Городова и А.П. Крюкова; под ред. Д.А. Лабунцова М.: Энергия, 1980. 325 с.
- [4] 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.
- [5] Бобков В.П., Виноградов В.Н., Кириллов П.Л., Смогалева И.П. Критические тепловые потоки в треугольных пучках стержней (Скелетная таблица, версия 1997 г.) // Теплоэнергетика, 1999, N11, с. 54-63.
- [6] Хабенский В.Б., Зейгарник Ю.А., Малкин С.Д. Расчетные формулы для кризиса теплоотдачи при кипении в пучках стержней для контурных теплогидравлических кодов // Теплоэнергетика, 2003, N 11, с. 73-77.
- [7] <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2019/documents/mntk2019-170.pdf>