

Обоснование теплотехнической надежности ВВЭР-1200 с установленными в ТВС перемешивающими решетками

И. А. Лазарева, И. Л. Парамонова✉

Санкт-Петербургский политехнический университет

Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

✉l.irina.p@mail.ru

Аннотация. При рассмотрении безопасности работы атомной станции одним из важнейших вопросов становится необходимость ее обеспечения не только в процессе эксплуатации, но и еще на стадии проекта. Для осуществления данной задачи важно правильно организовать теплообмен и точно поставить его условия. Это нужно для устойчивой работоспособности энергетической ядерной установки. Исследование было ориентировано на обоснование теплотехнической надежности активной зоны (АЗ) ВВЭР-1200 с усовершенствованными тепловыделяющими сборками (ТВС). В данной сборке конструктивным решением стало включение перемешивающих решеток (ПР) типа «вихрь» и «прогонка». Из результатов следует, что данная конструктивная особенность дает возможность повысить выработку электроэнергии, увеличив критическую мощность тепловыделяющих сборок для реактора ВВЭР (водо-водяной энергетический реактор). Предметом исследования стали явление кризиса теплообмена первого рода, а также теплогидравлические процессы в активной зоне. В соответствии с намеченной целью исследования была определена методика решения, для чего вся работа была разделена на два этапа. В ходе первого этапа был проведен теплогидравлический расчет, получены распределения температур и тепловых потоков в сечении и по высоте твэла, в котором он максимально нагружен, с учетом зоны поверхностного кипения. В результате второго этапа был найден коэффициент запаса до кризиса теплообмена. Таким образом, данная методика позволила получить результат по оценке теплотехнической надежности реакторной установки (РУ) на основании найденных критериев. В конечном результате определены: запас до кризиса теплообмена, потери давления в реакторной установке в зоне пристенного кипения, параметры потока в двухфазном состоянии, неравномерности тепловых потоков. На основании результатов было доказано и показано, что усовершенствование конструкции ТВС за счет добавления четырех решеток типа «вихрь» и «прогонка» дали возможность повысить теплотехническую надежность активной зоны РУ. Это, в свою очередь, позволяет эксплуатировать энергетический блок на повышенном уровне мощности, что приведет к повышению энергоэффективности АЭС.

Значимость данной работы состоит в определении показателей теплотехнической надежности АЗ, отвечающих за безопасность РУ.

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

Для цитирования: Лазарева И. А., Парамонова И. Л. Обоснование теплотехнической надежности ВВЭР-1200 с установленными в ТВС перемешивающими решетками // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2022. Т. 15, № 5/6. С. 15–21. doi: 10.32603/2071-8985-2022-15-5/6-15-21.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Substantiation of thermal engineering reliability of VVER-1200 with mixing grids installed in fuel assemblies

I. A. Lazareva, I. L. Paramonova✉

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St Petersburg, Russia

✉l.irina.p@mail.ru

Abstract. One of the most important issues when it comes to the safety of a nuclear power plant is the need to ensure it not only during operation, but also at the design stage. To accomplish this task, it is important to cor-

rectly organize and accurately establish the conditions of heat transfer. This is necessary for the performance of a nuclear power plant. The work was focused on substantiating the thermal reliability of the VVER-1200 core with improved fuel assemblies. In this assembly, the design solution was the inclusion of mixing grates (MR) of the «vortex» and «running» types. As a result, it was found that this design feature makes it possible to increase the amount of electricity generation by increasing the critical power of fuel assemblies for the VVER reactor. The subject of the study were: the phenomenon of the crisis of heat transfer of the first kind, as well as thermal-hydraulic processes in the core. In accordance with the intended purpose of the study, a solution technique was determined, for which the whole work was divided into two stages. During the first stage, a thermal-hydraulic calculation was carried out, the temperature and heat flux distributions were obtained in the cross section and along the height of the fuel element, in which it is maximally loaded, taking into account the surface boiling zone. As a result of the second stage, it was found: the safety factor before the heat transfer crisis. Thus, this technique made it possible to obtain a result on the assessment of the heat engineering reliability of the reactor plant, based on the criteria found. As a final result, the following factors were determined: the reserve before the heat transfer crisis, pressure losses in the reactor plant in the near-wall boiling zone, flow parameters in a two-phase state, and uneven heat flows. Based on the results, it was proved and shown that the improvement of the FA design by adding four «vortex» and «running» gratings made it possible to increase the thermal reliability of the reactor core. This, in turn, makes it possible to operate the power unit at an increased power level, which will lead to an increase in the energy efficiency of the NPP. The significance of this work is: determination of indicators of thermal reliability of the AZ, responsible for the safety of the reactor plant.

Keywords: thermal reliability, fuel assembly, critical power, energy efficiency, heat transfer crisis, reserve before the crisis, mixing grids, pressurized water reactor, spacer grid, surface boiling

For citation: Lazareva I. A., Paramonova I. L. Substantiation of thermal engineering reliability of VVER-1200 with mixing grids installed in fuel assemblies // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2022. Vol. 15, no. 5/6. P. 15–21. doi: 10.32603/2071-8985-2022-15-5/6-15-21.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

В современном мире перед энергетикой на первое место все чаще встает вопрос о необходимости повышения энергетической эффективности атомных электрических станций, работающих с реакторами типа ВВЭР. Это способствовало тому, что для решения данной задачи регулярно ведутся исследовательские работы, цель которых состоит в повышении установленной мощности работающих энергоблоков посредством модернизации оборудования; в росте коэффициента использования установленной мощности (КИУМ); в увеличении выгорания отработавшего ядерного топлива и др. К примеру, на сегодняшний день на Балаковской и Ростовской АЭС все энергоблоки переведены на повышенный уровень мощности (104 % от номинальной) без каких-либо изменений конструкций активной зоны.

Целью исследований стало доказать теплотехническую надежность работы ВВЭР-1200 при применении системы улучшенных ТВС с перемешивающими решетками, которые были установлены в целях увеличения критической мощности сборок и, следовательно, оказывающими влияние на повышение выработки электроэнергии АЭС с реактором ВВЭР1200.

Численно надежность работающей АЭС можно определить как риск, соответствующий произведению вероятности аварии на тяжесть возможных последствий от случившегося. Тут появляется неясность оценки, так как на АЭС, работающих на высоконадежном оборудовании, аварии единичны, хотя их последствия могут иметь высокую степень тяжести.

Необходимо отметить, что в самой активной зоне ядерного реактора сконцентрирована энергия, соответствующая нескольким гигаваттам в год, а также огромное количество веществ с высокой степенью радиации (к примеру, плутоний). Непосредственно по этой причине при проектировании энергоустановок предварительно учтены все возможные аварии, а также принятие мер для их устранения введением противоаварийных средств [1].

ВВЭР-1200 (водо-водяной энергетический реактор), относящийся к поколению «3+» в настоящий период, представляет собой новейшую разработку реакторов такого типа. Нововоронежская атомная станция стала первой, где был запущен такой реактор. Уже в августе 2016 г. он был введен в энергетическую систему РФ.

Весь проект АЭС с реактором ВВЭР-1200 ориентирован на строгое выполнение норм и требований по ядерной и радиационной безопасности МАГАТЭ (Международное агентство по атомной энергии), а также на соблюдение правил и стандартов РФ. Инженеры, работающие над проектом реакторной установки, на первый план ставят перед собой задачу повышения защищенности ее работы при любом типе аварий, что в свою очередь снизит возможность выброса радиоактивных веществ. В результате, сравнив реактора нового поколения ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200, хочется выделить то, что у последнего не только возросла мощность на 20 %, но и повысился срок службы до 60 лет, появилась возможность маневренности по мощности.

Хочется отметить, что с ростом мощности на выходе из тепловыделяющей сборки, а также в ее наиболее теплонапряженных элементах идет увеличение температуры теплоносителя, его паросодержания. Все это может повлиять на критический тепловой поток и сказаться на возможности окисления наружной оболочки тепловыделяющего элемента (ТВЭЛ). Чтобы улучшить характеристики используемого топлива в наиболее сложных режимах работы, было принято решение об усовершенствовании конструкции ТВС посредством применения сотовых перемешивающих решеток.

В новейших модификациях ТВС вероятность нарушения целостности оболочки снижена до минимума, благодаря своей конструкции она стала более ремонтпригодной, появилась возможность использовать новейшие виды топлива – MOX и REMIX и т. п. Все это позволит снизить

долю радиоактивных отходов, сделать ядерный топливный цикл замкнутым. По этой причине при повышении мощности необходимо обосновать безопасность работы РУ, использующей ТВС-2М нового поколения.

Для конструкции кассеты данного типа характерно увеличение топливного столба, а следовательно, появляется возможность повысить длительность топливного цикла до 18 месяцев при работе на повышенной мощности (104 %).

Характерной новизной данной конструкции считается сваривание направляющих каналов (НК) и дистанционирующих решеток (ДР). Это обеспечивает жесткость каркаса, исключая воздействие на него неравномерности температурного и нейтронного полей. На рис. 1 представлена диаграмма, по которой можно точно сказать, что ТВС-2М имеет достаточно высокую надежность.

Перемешивающие решетки (ПР) относятся к сотовому типу. Они образованы сваркой специально сгруппированных ячеек таким образом, что они приварены только к НК, такую же конструкцию имеют и ДР. Это позволило исключить контакт ПР с ТВЭлами, а следовательно, и фреттинг-износ наружных оболочек ТВЭЛ. Гидравлическое сопротивление у перемешивающих решеток не зависит от направления движения теплоносителя.

Запас до кризиса – это основной и главный показатель надежной и безопасной работы ТВС с точки зрения теплообмена. Физический смысл понятия запаса до кризиса есть отношение значения плотности критического теплового потока к максимальному по высоте АЗ тепловому потоку. Данный коэффициент запаса варьируется в диапазоне от 1.2 до 1.3 для ВВЭР-1200.

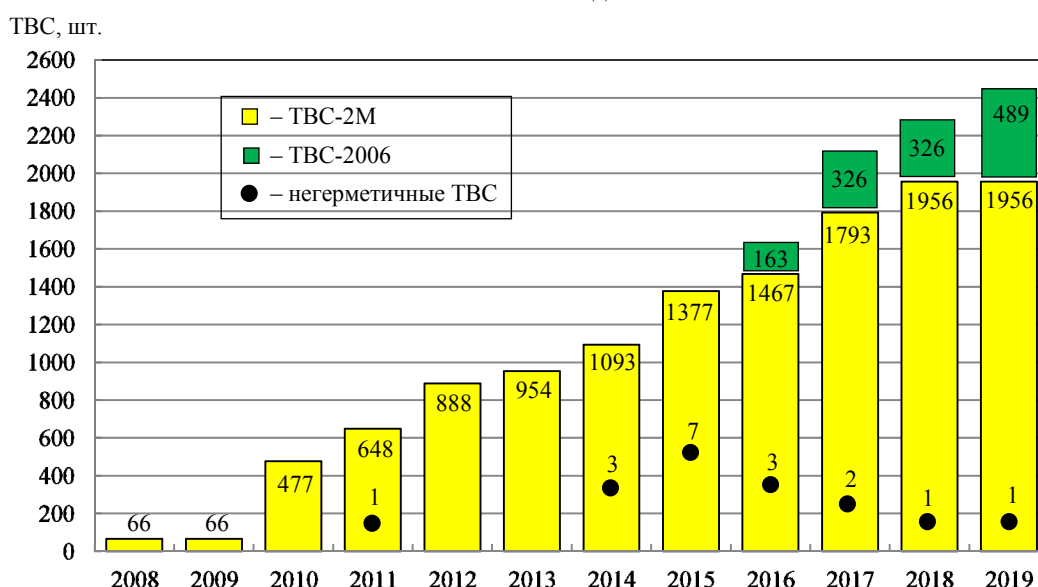


Рис. 1. Результаты эксплуатации ТВС-2М и ТВС-2006
 Fig.1. Results of operation of TVS-2M and TVS-2006

Несмотря на то что ВВЭР считается «некипящим» реактором, в ТВС, расположенных в центре АЗ и наиболее теплонпряженных, не исключено появление поверхностного кипения в верхней части АЗ.

Процесс кипения возникает при достижении температуры насыщения T_s в пристенном слое, когда температура основной массы теплоносителя еще не достигла T_s . На выходе из максимально нагруженной ТВС весовое (массовое) паросодержание (x) в потоке теплоносителя для реакторов ВВЭР-1200 не допускается выше 11.4 %. Для того чтобы снизить x , улучшить теплообмен и повысить запас до кризиса, в конструкцию ТВС внесли ряд изменений, а именно: к существующим 13 дистанционирующим решеткам, служащим для закрепления твэлов, дополнительно были установлены 4 перемешивающие решетки, схема расположения которых изображена на рис. 2.

Первая дистанционирующая решетка ДР1 расположена на 100 мм выше нижней опорной решетки (ОР). Расстояние между ДР2 и ДР1 составляет 250 мм, между ДР11 и ДР2 – 340 мм, между ДР12 и ДР11 – 255 мм, а между ДР13 и ДР12 – 260 мм.

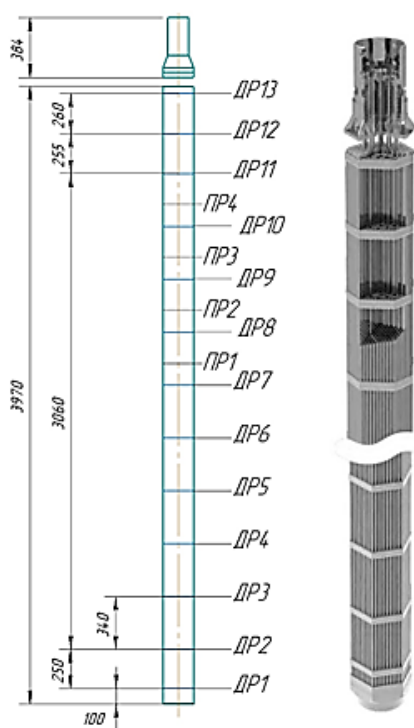


Рис. 2. Конструкция ТВС-2М и схема расположения перемешивающих решеток:

ДР1 и ДР2 – типа «прогонка»; ДР3 и ДР4 – типа «вихрь»
Fig. 2. Design of TVS-2M and layout of mixing gratings:
ДР1 and ДР2 – of the «running» type;
ДР3 and ДР4 – type «vortex»

Решетки перемешивающего типа установлены по высоте ТВС между ДР, причем форма их ячеек может быть различна. ДР типа «прогонка» выполняют функцию поперечного переноса массы к основному потоку (рис. 3).

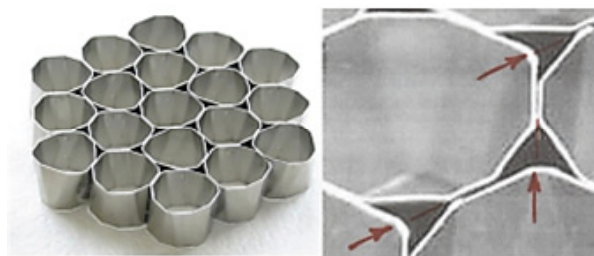


Рис. 3. Перемешивающая решетка типа «прогонка»
Fig. 3. Stirring grate of the «running» type

ДР типа «вихрь» (рис. 4) служат для закручивания течения в потоке в локальном месте. Это способствует тому, что теплоноситель при проходе через ячейки решеток, перемешиваясь, обеспечивает выравнивание температурных полей. Для удаления паровых пузырей с поверхности твэла применяют ДР типа «вихрь».

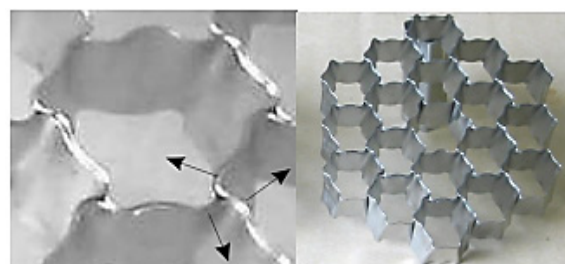


Рис. 4. Перемешивающая решетка типа «вихрь»
Fig. 4. Mixing grate type «vortex»

Конструкция решеток данного типа позволяет закрутить поток в вихрь; вследствие этого центробежная сила направит воду к периферии, а пар сконцентрируется в центре ячейки. Пар, находящийся в теплоносителе, недогретом до температуры T_s , начнет конденсироваться, это приведет к снижению паросодержания в потоке, а значит, наступление кризиса отодвинется. К плюсам ДР можно отнести то, что они обеспечивают хорошее перемешивание и турбулизацию потока теплоносителя, улучшают теплоотвод от поверхности твэлов, увеличивают плотность критического теплового потока $q_{кр}$, причем коэффициент запаса до кризиса повышается. Однако присутствие в верхней части ТВС четырех дополнительных перемешивающих решеток приводит к повышению гидравлических сопротивлений и падению давления, а значит, и температуры насыщения. Все это

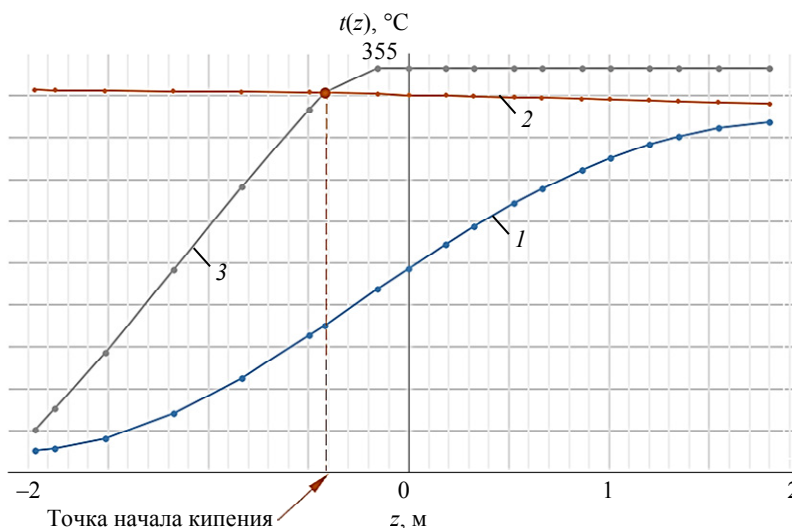


Рис. 5. Распределение температуры по высоте активной зоны ВВЭР1200 при линейном тепловом потоке с поверхности твэла 420 Вт/см
 Fig. 5. Temperature distribution along the height of the VVER-1200 core with a linear heat flux from the fuel rod surface of 420 W/cm

отразится на протяженности зоны поверхностного кипения, которая увеличится, что приведет к росту массового паросодержания потока, причем теплотехническая надежность реакторной установки снизится.

Поэтому важно найти решение оптимизационной задачи – определить необходимое количество и местоположение ПР, их тип («прогонка» или «вихрь»), оценить гидравлическое сопротивление, позволяющее гарантировать критерии безопасной работы РУ (коэффициент запаса до кризиса и паросодержание).

Для решения этой задачи в исследованиях была применена следующая методика:

- координата начала поверхностного кипения (ПК) найдена из графиков на рис. 5 (1 – температура теплоносителя; 2 – температура насыщения; 3 – температура наружной оболочки);

- параметры, характеризующие пароводяную смесь потока в зоне ПК, найдены по формулам В. С. Осмачкина и З. Л. Миропольского [2];

- потери давления вычислялись без учета и с учетом поверхностного кипения. Для нахождения гидравлических потерь в зоне ПК использовалась методика Локкарта–Мартинелли [3] (рис. 6: 1 – давление с учетом кипения; 2 – давление без учета кипения). Для расчетов были взяты реальные сопротивления ПР;

- плотности критических тепловых потоков и коэффициент запаса до кризиса были найдены по формуле Ю. А. Безрукова.

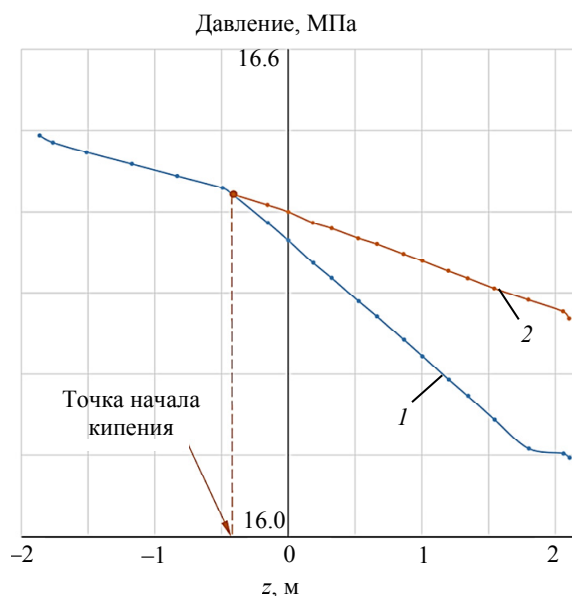


Рис. 6. Изменение давления по высоте активной зоны ВВЭР1200

Fig. 6. Change in pressure along the height of the VVER-1200 core

Гарантией отсутствия кризиса теплоотдачи с вероятностью не ниже 95 % при надежном охлаждении твэла считается выполнение следующего условия:

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

где δ – относительная погрешность соотношения ОКБ «Гидропресс», равная 15 % при доверительной вероятности не менее 95 %; $q_{\text{кр}}(z)$ – плотность критического теплового потока, кВт/м²;

q_s – удельный тепловой поток на единицу площади, кВт/м²; $n_{\text{зап}}$ – коэффициент запаса до кризиса теплоотдачи первого рода

При переходе РУ на повышенную мощность необходимо исключить возникновение кризиса теплообмена первого рода, при котором пузырьковое кипение переходит в пленочное, в результате чего пузырьки на оболочке ТВЭЛ сливаются в сплошную паровую пленку. Интенсивность теплоотдачи при этом уменьшается, что приведет к резкому росту температуры наружной оболочки ТВЭЛ, а следовательно, к возможному их пережогу.

Все существующие на сегодняшний день методики определения запаса до кризиса теплообмена основаны на результатах большого числа экспериментов. Они устанавливают связь КТП от давления, массового паросодержания и скорости теплоносителя. Вот некоторые из них: методики Ю. А. Безрукова и др. (ГИДРОПРЕСС) [4], В. Н. Смолина (НИКИЭТ), таблицы ФЭИ [5]. Детальное изучение приведенных методик представлено в [6], [7]. Для создания номинальных условий эксплуатации для нахождения критического теплового потока была выбрана лицензированная методика Ю. А. Безрукова [4]:

$$q_{\text{кр}}(z) = 0.795(1 - x(z))^n (\bar{p}w)^m \cdot 1.0185p,$$

где $x(z)$ – относительная энтальпия потока теплоносителя; $\bar{p}w$ – массовая скорость теплоносителя, кВт/м²; $m = 0.184 - 0.311x(z)$; $n = 0.105p - 0.5$; p – давление в первом контуре, МПа.

Диапазон применения формулы расчета [5]:

$$\begin{aligned} x &= (-0.07 \dots 0.4); \\ \bar{p}w &= (700 \dots 3500) \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}; \\ p &= (7.5 \dots 16.7) \text{ МПа}; \\ s/d &= (1.34 \dots 1.385), \end{aligned}$$

где s – шаг установки ТВЭЛ в ТВС; d – наружный диаметр ТВЭЛ.

Отличительная особенность этой методики заключается в том, что она позволяет найти значение критического теплового потока как в области положительных паросодержаний, так и в зоне недогретого до температуры насыщения.

Обсуждение результатов. Итогом исследований стало доказательство теплотехнической надежности АЗ ВВЭР-1200 с усовершенствованными ТВС нового поколения, конструкция которых была изменена добавлением четырех ПР типа «вихрь» и «прогонка». Для этого были найдены:

– точка начала кипения на поверхности ($z = -0.417$);

– основные параметры пароводяной смеси потока (истинное объемное и массовое паросодержание, потери давления с учетом зоны поверхностного кипения). На выходе из ТВС значение массового паросодержания составило 7.4 %, что значительно меньше регламентируемого критерия безопасности (11.4 %);

– коэффициент запаса до кризиса теплообмена вырос на 5 % благодаря установке дополнительных перемешивающих решеток.

Выводы и заключение. По анализу полученных результатов можно сделать вывод о том, что конструкторское решение о добавлении дополнительных четырех перемешивающих решеток в ТВС привело к повышению теплотехнической надежности АЗ ВВЭР-1200. Это, в свою очередь, позволит эксплуатировать энергоблок в режиме с повышенным уровнем мощности, а значит, повысится энергоэффективность АЭС.

Говоря о дальнейших исследовательских работах по этому направлению, необходимо отметить важность изучения вопроса о нахождении потерь давления на участке поверхностного кипения для сборки стержней (на данный момент существуют методики лишь для труб), возможность использовать численное моделирование (ANSYS).

Список литературы

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. Баттерворс Д., Хьюитта Г. Теплопередача в двухфазном потоке. М.: Энергия, 1980. 325 с., ил.

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. Критические тепловые потоки в треугольных пучках стержней (скелетная таблица, версия 1997 г.) / В. П. Бобков, В. Н. Виноградов, П. Л. Кириллов, И. П. Смогалева // Теплоэнергетика. 1999. № 11. 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. № 11. С. 73–77.

7. Лазарева И. А., Парамонов И. Л. Обоснование теплотехнической надежности ВВЭР1200 с установленными в ТВС перемешивающими решетками. URL: <https://eaf.etu.ru/assets/files/eaf21/index.html> (дата обращения 06.04.2022).

Информация об авторах

Лазарева Ирина Алексеевна – студентка 1-го курса магистратуры Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Политехническая ул., д. 29, Санкт-Петербург, 194021, Россия.
E-mail: L.Irina.p@mail.ru

Парамонова Ирина Львовна – канд. техн. наук, доцент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Политехническая ул., д. 29, Санкт-Петербург, 194021, Россия.
E-mail: I.irina.p@mail.ru
<http://orcid.org/0000-0002-5237-9118>

References

1. Logvinov S. A., Bezrukov YU. A., Dragunov YU. G. Eksperimental'noe obosnovanie teplogidravlicheskoj nadezhnosti reaktorov VVER. M.: Akademkniga, 2003. 157 s. (In Russ.).
2. Kirillov P. L., YUr'ev YU. S., Bobkov V. P. Spravochnik po teplogidravlicheskim raschetam (yadernye reaktory, teploobmenniki, parogeneratory). M.: Energoatomizdat, 1990, 360 s. (In Russ.).
3. Battervors D. i H'yuita G. Teploperedacha v dvuhfaznom potoke. M.: Energiya, 1980. 325 s., il. (In Russ.).
4. Bezrukov YU. A., Astahov V. I., Brantov V. G. Eksperimental'nye issledovaniya i statisticheskij analiz dannyh po krizisu teploobmena v puchkah sterzhnej dlya reaktorov VVER // Teploenergetika. 1976. № 2. S. 80–82. (In Russ.).

5. Bobkov V. P., Vinogradov V. N., Kirillov P. L., Smogalev I. P. Kriticheskie teplovyte potoki v treugol'nyh puchkah sterzhnej (skeletnaya tablica, versiya 1997 g.) // Teploenergetika. 1999. № 11. S. 54–63. (In Russ.).
6. Habenskij V. B., Zejgarnik YU. A., Malkin S. D. Raschetnye formuly dlya krizisa teplootdachi pri kipenii v puchkah sterzhnej dlya konturnykh teplogidravlicheskih kodov // Teploenergetika. 2003. № 11. S. 73–77. (In Russ.).
7. Lazareva I. A., Paramonov I. L. Obosnovanie teploekhnicheskoy nadezhnosti VVER1200 s ustanovlen-nymi v TVS peremeshivayushchimi reshetkami. URL: <https://eaf.etu.ru/assets/files/eaf21/index.html> (data obrashchenia 06.04.2022) (In Russ.).

Information about the authors

Irina A. Lazareva, 1st year master's student of Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Politekhnikeskaya st., 29, Saint Petersburg, 194021, Russia.
E-mail: L.Irina.p@mail.ru

Irina L. Paramonova, Cand. Sci. (Eng), Associate Professor of Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic, Professor Popov str., 5, Saint Petersburg, 197376, Russia.
E-mail: I.irina.p@mail.ru
<http://orcid.org/0000-0002-5237-9118>

Статья поступила в редакцию 03.05.2022; принята к публикации после рецензирования 10.05.2022; опубликована онлайн 30.06.2022.

Submitted 03.05.2022; accepted 10.05.2022; published online 30.06.2022.