

УДК 621.039.5

DOI: 10.24160/1993-6982-2018-1-67-71

Численное исследование температурного поля в активной зоне РУ БРЕСТ-ОД-300 при частичной блокировке проходного сечения на входе теплоносителя

А.Г. Чухлов, Е.О. Жеребцова

В техническом проекте реактора БРЕСТ-ОД-300 принята конструкция бесчехловой активной зоны. Выбор бесчехловой тепловыделяющей сборки (ТВС) обусловлен тем, что при таком варианте конструкции активной зоны отсутствуют отдельные изолированные каналы для охлаждения тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов), которыми являются чехлы тепловыделяющих сборок. Поэтому аварийные ситуации с частичным перекрытием проходного сечения активной зоны на входе, рассматриваемые для проектируемого свинцовоохлаждаемого реактора, имеют менее серьезные последствия для ТВЭЛов, чем с использованием чехловых тепловыделяющих сборок. Так, в случае полного перекрытия проходного сечения чехловой ТВС теплоотвод от ТВЭЛов может осуществляться только к теплоносителю, протекающему в межчехловом зазоре (путем естественной конвекции теплоносителя внутри ТВС и теплопроводностью через весь ТВЭЛный пучок аварийной ТВС преимущественно в радиальном направлении). Очевидно, что если мощность активной зоны при этом существенно не снижена, то перегрев ТВЭЛов аварийной ТВС и их разгерметизация в данном случае неизбежны.

Исследована гипотетическая ситуация частичной блокировки проходного сечения активной зоны реактора БРЕСТ-ОД-300 на базе трехмерного расчета с использованием модели пористого тела. Рассмотрен вариант блокировки проходного сечения на уровне первой снизу дистанционирующей решетки с полным перекрытием проходного сечения ТВС. На основании полученных в настоящей работе результатов можно сделать вывод, что при перекрытии даже семи центральных ТВС повышение температуры оболочек ТВЭЛов не вызовет немедленных ее повреждений (температура оболочек в этом случае составляет 790 °С), а, скорее всего, приведет только к уменьшению ресурса оболочек. Для повышения точности расчетов активной зоны по модели пористого тела необходимо более детальное моделирование активной зоны, включающее выделение отдельных ТВС и зазоров между ними. Однако, проведенные численные расчеты показывают существенное преимущество бесчехловой активной зоны перед чехловой.

Ключевые слова: активная зона, бесчехловая тепловыделяющая сборка, частичная блокировка, проходное сечение, численные расчеты, безопасность, реактор БРЕСТ-ОД-300.

Для цитирования: Чухлов А.Г., Жеребцова Е.О. Численное исследование температурного поля в активной зоне РУ БРЕСТ-ОД-300 при частичной блокировке проходного сечения на входе теплоносителя // Вестник МЭИ. 2018. № 1. С. 67—71. DOI: 10.24160/1993-6982-2018-1-67-71.

Numerical Study of the Temperature Field in the BREST-OD-300 Reactor Plant's Core with the Partially Blocked Flow Cross Section at the Coolant Inlet

Chukhlov A.G., Zhrebtsova Ye.O.

A reactor core design with shroudless fuel assemblies (FAs) has been adopted in the BREST-OD-300 reactor's basic design. The choice of shroudless FAs is dictated by the fact that with this reactor core design, there are no separate isolated fuel rod cooling channels shaped by FA shrouds. Therefore, emergencies involving partial blocking of the core flow cross section at the core inlet that are considered for the newly designed lead-cooled reactor, will have less severe consequences for the fuel rods than they may be in the case of using shrouded FAs. Thus, with the shrouded FA's flow cross section being fully blocked, the heat produced by the fuel rods can only be removed from them to the coolant flowing in the gap between the shrouds (both due to natural convection of coolant inside the FA and due to thermal conductivity throughout the fuel rod bundle in the affected FA, predominantly in the radial direction). Obviously, if the core power is not reduced to a significant extent, overheating of fuel rods and loss of their cladding tightness will be unavoidable.

A hypothetical situation involving partial blocking of the BREST-OD-300 reactor plant's core flow cross section was investigated by carrying out 3D calculations using a porous body model. The case of the FA flow cross section being fully blocked at the level corresponding to the first spacer grid from the bottom is considered. A conclusion can be drawn from the obtained study results that the growth of fuel rod cladding temperature that will take place when the flow cross section of even seven central FAs is blocked will not cause them to fail immediately (the cladding temperature will in this case make 790 °C), but in all likelihood, it will only result in their service life to become shorter. To obtain better accuracy of the reactor core analysis performed according to the porous body model, a more detailed reactor core model representing individual FAs and gaps between them should be used. Nonetheless, the results obtained from the performed numerical analysis show that the reactor core with shroudless fuel assemblies has a significant advantage over the design with shrouded fuel assemblies.

Key words: reactor core, shroudless fuel assembly, partial blocking, flow cross section, numerical calculations, safety, BREST-OD-300 reactor.

For citation: Chukhlov A.G., Zhrebtsova Ye.O. Numerical Study of the Temperature Field in the BREST-OD-300 Reactor Plant's Core with the Partially Blocked Flow Cross Section at the Coolant Inlet. MPEI Vestnik. 2018;1:67—71. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2018-1-67-71.

В техническом проекте реакторной установки (РУ) БРЕСТ-ОД-300 в качестве основного варианта принята конструкция активной зоны с бесчехловыми тепловыделяющими сборками (ТВС) [1 — 4]. Тепловыделяющие элементы (ТВЭЛы) в ТВС расположены в треугольной упаковке и удерживаются дистанционирующими решетками, закрепленными на опорных направляющих, являющихся частью каркаса ТВС. В активной зоне РУ БРЕСТ-ОД-300 отдельные шестигранные чехлы предусмотрены только для регулирующих органов системы управления и защиты (СУЗ), энерговыделение в которых много меньше, чем в ТВЭЛх при номинальном режиме работы реактора.

Выбор бесчехловой ТВС обусловлен, в том числе, и тем, что в таком варианте конструкции активной зоны отсутствуют отдельные изолированные каналы для охлаждения ТВЭЛ, которыми являются чехлы ТВС, поэтому аварийные ситуации с частичным перекрытием проходного сечения активной зоны на входе, рассматриваемые для проектируемого свинцовоохлаждаемого реактора, имеют менее серьезные последствия для ТВЭЛов, чем с использованием чехловых ТВС. В случае полного перекрытия проходного сечения чехловой ТВС теплоотвод от ТВЭЛов ведет только к теплоносителю, протекающему в межчехловом зазоре (путем естественной конвекции теплоносителя внутри ТВС и теплопроводностью через весь твэльный пучок аварийной ТВС преимущественно в радиальном направлении). Очевидно, что если мощность активной зоны при этом существенно не снижена, перегрев ТВЭЛов аварийной ТВС и их разгерметизация в данном случае неизбежны [5, 6].

Исследована гипотетическая ситуация частичной блокировки проходного сечения активной зоны БРЕСТ-ОД-300, она имеет номинальную тепловую мощность 700 МВт, в целях уменьшения радиального коэффициента неравномерности энерговыделения разделена на 2 подзоны — центральную (ЦЗ) и периферийную (ПЗ), отличающиеся диаметром ТВЭЛ. Центральная подзона содержит рабочие тепловыделяющие сборки и ТВС с органами СУЗ, содержащие шестигранный чехол для размещения поглощающих элементов.

Была рассмотрена 1/12 симметричная часть активной зоны. Использовалась модель пористого тела, предполагающая гомогенизацию реальной геометрии в пределах выбранных подобластей внутри активной зоны. В качестве подобластей выбраны области твэльных пучков (полная длина ТВЭЛа) центральной и периферийной подзон активной зоны и дистанционирующие решетки центральной и периферийной подзон (с соответствующими высоте дистанционирующих решеток участками ТВЭЛов). Боковой отражатель не рассматривался ввиду малого энерговыделения в нем. По той же причине не рассматривалось течение теплоносителя внутри шестигранных чехлов регулирующих органов СУЗ. Распределение энерговыделения по ра-

диусу активной зоны считалось постоянным в каждой подобласти.

Хотя активная зона РУ БРЕСТ ОД-300 содержит 9 дистанционирующих решеток по высоте ТВС, моделировались только 8 из них, а в качестве входа теплоносителя принималась плоскость, совпадающая с верхним краем первой по ходу теплоносителя дистанционирующей решетки (рис. 1).

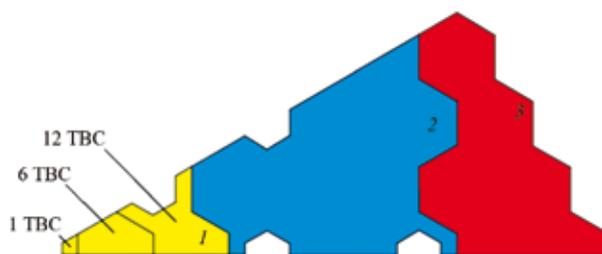


Рис. 1. Входное сечение элемента симметрии активной зоны для случая блокировки 19 центральных ТВС:

1 — заблокированный участок входного сечения; 2 — свободный участок входного сечения ЦЗ; 3 — входное сечение ПЗ

Проанализированы четыре варианта полного перекрытия проходного сечения одной, семи и девятнадцати тепловыделяющихборок. В первом расчетном варианте считалось заблокированным проходное сечение одной центральной ТВС, во втором — еще шести, а в третьем — еще двенадцати окружающих ее ТВС.

Для расчетов был взят трехмерный гидродинамический код FlowVision 2.5 [7].

Ввиду отсутствия надежных формул по теплоотдаче и гидравлическому сопротивлению в переходном режиме течения жидкого металла условно примем, что реализуются только 2 режима течения: при $Re < 2000$ — ламинарный, а при $Re > 2000$ — турбулентный. Ламинарный режим течения возможен в застойных областях с низкой скоростью теплоносителя за препятствием на входе теплоносителя в активную зону. Коэффициенты теплоотдачи и гидравлического сопротивления для соответствующего режима течения теплоносителя рассчитывались согласно [8, 9].

Было принято косинусоидальное распределение мощности тепловыделения по высоте топливного столба, на остальных участках ТВЭЛа по высоте мощность тепловыделения равна нулю.

На рис. 2 приведены результаты расчета поля скорости в активной зоне при заблокированном проходном сечении центральной ТВС на входе теплоносителя и шести прилегающих.

Из рис. 2 следует, что за препятствием на входе активной зоны образуется застойная область с низкими скоростями теплоносителя. В ней расположены концевые части ТВЭЛов с газовой полостью внутри, поэтому энерговыделение здесь отсутствует и опасности перегрева ТВЭЛов нет. Поскольку сниженная скорость теплоносителя за препятствием на входе сохраняется

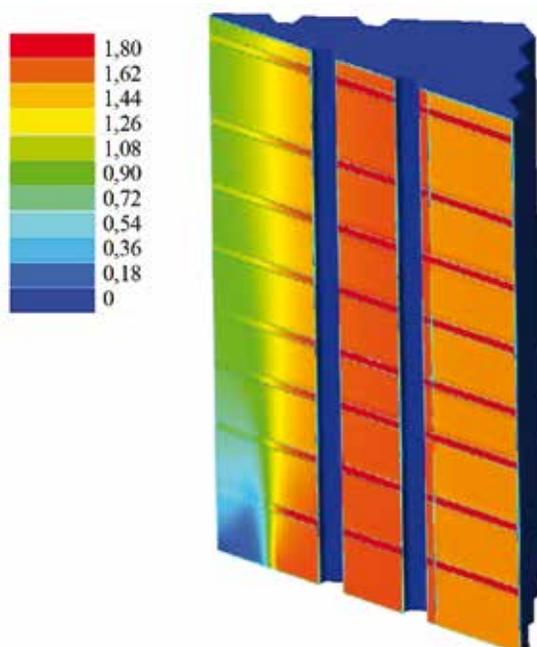


Рис. 2. Модуль скорости теплоносителя в продольном радиальном сечении активной зоны при семи заблокированных ТВС в центре активной зоны, м/с

на оси активной зоны вплоть до выхода из активной зоны, это приводит к соответствующему повышению температуры ТВЭЛов, как показано на рис. 3.

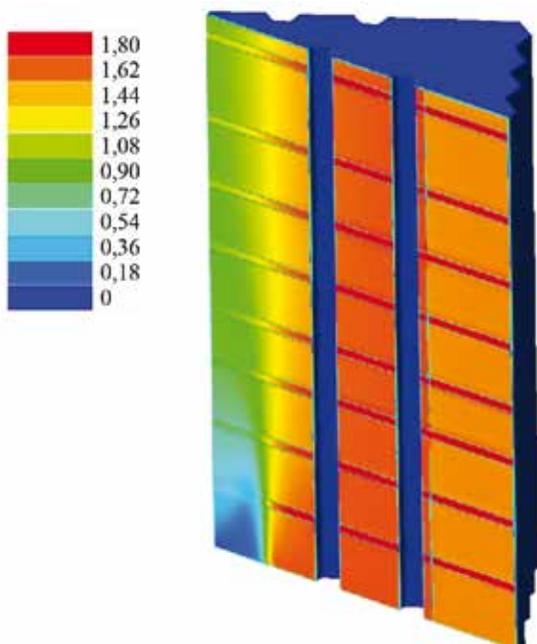


Рис. 3. Распределение температуры в продольном радиальном сечении активной зоны при семи заблокированных ТВС в центре активной зоны, °C

Согласно результатам расчетов трехмерных полей температуры при блокировке проходного сечения на входе одной ТВС повышение максимальной температуры ТВЭЛов составляет 77 °C по сравнению с но-

минальным режимом, который также рассчитывался на основе модели пористого тела. Согласно точным расчетам номинального режима с применением кода ПУЧОК-ЖМТ [10], использующего поячеистую модель активной зоны и ТВС, максимальная температура наружной поверхности оболочек ТВЭЛ без учета факторов перегрева в центральной подзоне составляет 620 °C, тогда величину максимальной температуры ТВЭЛ при перекрытии сечения одной ТВС можно оценить как $620 + 77 = 697$ °C. Воспользуемся именно таким способом оценки максимальных температур ТВЭЛов, а не непосредственно результатом расчета по модели пористого тела, поскольку последний занижает значения максимальных температур.

В случае блокировки на входе семи ТВС повышение максимальной температуры ТВЭЛов по сравнению с номинальным режимом составляет 170 °C. Таким образом, даже при перекрытии сечения семи центральных ТВС в районе первой дистанционирующей решетки максимальная температура ТВЭЛ не превышает 800 °C и составляет 790 °C.

В случае блокировки 19 центральных ТВС (центральной ТВС и двух прилегающих рядов) повышение максимальной температуры ТВЭЛов по сравнению с номинальным режимом составляет 355 °C, а оценка в центральной подзоне равна 975 °C.

Была проведена оценка влияния величины поперечного гидравлического сопротивления в активной зоне на расчетные температуры ТВЭЛ. С этой целью рассмотрен крайний случай — нулевое поперечное гидравлическое сопротивление для варианта с блокировкой 19 ТВС. Численный расчет указанного варианта показал величину повышения максимальной температуры ТВЭЛов по сравнению с номинальным режимом (всего лишь 60 °C вместо 355 °C). В связи с этим можно сделать следующие выводы: правильное определение значения поперечного гидравлического сопротивления твэльного пучка крайне важно для корректного расчета температур в активной зоне в условиях частичной блокировки проходного сечения с применением модели пористого тела; такие программы, как ПУЧОК-ЖМТ, использующие предположение о постоянстве давления в поперечном сечении активной зоны (т.е. предположение о нулевом поперечном гидравлическом сопротивлении твэльного пучка), непригодны для расчета активных зон с блокировкой расхода теплоносителя.

Полученную оценку повышения температур ТВЭЛов при частичной блокировке проходного сечения активной зоны можно считать консервативной, так как предполагалось, что при перекрытии проходного сечения активной зоны расход теплоносителя уменьшается пропорционально уменьшению площади проходного сечения, тогда как на самом деле, в соответствии с напорно-расходной характеристикой насоса, скорость теплоносителя на входе активной зоны должна несколько увеличиться.

Таким образом, даже при перекрытии семи центральных ТВС повышение температуры оболочек ТВЭЛов не вызовет немедленных повреждений (температура оболочек в этом случае составит 790 °С), а, скорее всего, приведет только к уменьшению ресурса оболочек. Следует учесть, что полное перекрытие проходного сечения будет обнаружено системой управления и защиты реакторной установки до наступления разгерметизации ТВЭЛов.

Проведенные численные расчеты показывают существенное преимущество бесчехловой активной зоны перед чехловой (т. е. состоящей из ТВС, имеющих наружный чехол), поскольку в последней полное перекрытие проходного сечения ТВС без уменьшения мощности реактора вызывает перегрев ТВЭЛов с их последующей разгерметизацией вследствие резкого уменьшения теплоотдачи, которая в этом случае осуществляется только в радиальном направлении к межкассетному теплоносителю путем теплопроводности и свободной термоконвекции.

Для повышения точности расчетов активной зоны по модели пористого тела необходимо более детальное ее моделирование, включающее выделение отдельных ТВС и зазоров между ними. Кроме того, следует уточнить экспериментально или путем трехмерного расчета в реальной геометрии значение поперечного сопротивления твэльного пучка в условиях частичной блокировки проходного сечения активной зоны на входе в сам пучок.

Литература

1. Драгунов Ю.Г. и др. Технический проект РУ БРЕСТ-ОД-300: этапы разработки и обоснования // Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики: Сборник докладов IV Междунар. науч.-техн. конф. М., 2016. С. 21—30.

2. Dragunov Yu.G., Lemekhov V.V., Moiseyev A.V., Smirnov V.S. Lead-Cooled Fast-Neutron Reactor (BREST) // INPRO Dialog-Forum. Vienna (Austria), 2015. P. 32.

3. Драгунов Ю.Г. и др. Технические решения и этапы разработки реакторной установки БРЕСТ-ОД-300 // Атомная энергия. 2012. Т. 113. Вып. 1. С. 58—64.

4. Драгунов Ю.Г. и др. Реактор на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем (БРЕСТ) // Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики: Материалы III Междунар. науч.-техн. конф. М.: ОАО «НИКИЭТ», 2014. С. 94—102.

5. Власичев Г.Н. Анализ проектной аварии с блокировкой отдельной ТВС реактора на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 6. [Электрон. ресурс] <https://science-education.ru/ru/article/view?id=16588> (дата обращения 25.12.2017)

6. Волков А.В. Обоснование безопасности быстрого реактора с натриевым теплоносителем при аварийных процессах, связанных с повреждением или разру-

шением активной зоны: автореф. дисс....канд. физ.-мат. наук. Обнинск, 2009.

7. Щеляев А. FlowVision — современный российский инструмент математического моделирования // САПР и графика. 2010. № 12. С. 43—48.

8. Жукова А.В., Сорокина А.П. Методические указания и рекомендации по теплогидравлическому расчету активных зон быстрых реакторов. РТМ 1604.008-88. М.: ФЭИ, 1988.

9. Уонг Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров. М.: Атомиздат, 1979.

10. Афонин С.Ю., Афремов Д.А., Захаров А.Г., Смирнов В.П. Комбинированная методика расчета тепловыделяющих сборок реакторов с жидкометаллическим теплоносителем и ее обоснование // Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики: Сборник докладов IV Междунар. науч.-техн. конф. М., 2016. С. 168—170.

References

1. Dragunov Yu.G. i dr. Tehnicheskiy Proekt RU BREST-OD-300: Etapy Razrabotki i Obosnovaniya. Innovatsionnye Proekty i Tekhnologii Yadernoy Energetiki: Sbornik Dokladov IV Mezhdunar. Nauch.-tekhn. Konf. M., 2016:21—30. (in Russian).

2. Dragunov Yu.G., Lemekhov V.V., Moiseyev A.V., Smirnov V.S. Lead-Cooled Fast-Neutron Reactor (BREST). INPRO Dialog-Forum. Vienna (Austria), 2015:32.

3. Dragunov Yu.G. i dr. Tehnicheskie Resheniya i Etapy Razrabotki Reaktornoy Ustanovki BREST-OD-300. Atomnaya energiya. 2012;113;1:58—64. (in Russian).

4. Dragunov Yu.G. i dr. Reaktor na Bystryh Neytronah so Svintsovym Teplonositelem (BREST). Innovatsionnye Proekty i Tekhnologii Yadernoy Energetiki: Materialy III Mezhdunar. Nauch.-tekhn. Konf. M.: ОАО «НИКИЭТ», 2014:94—102. (in Russian).

5. Vlasichev G.N. Analiz Proektnoy Avarii s Blokirovkoy Otdel'noy TVS Reaktora na Bystryh Neytronah s Natrievym Teplonositelem. Sovremennye Problemy Nauki i Obrazovaniya. 2014. № 6. [Elektron. Resurs] <https://science-education.ru/ru/article/view?id=16588> (Data Obrashcheniya 25.12.2017) (in Russian).

6. Volkov A.V. Obosnovanie Bezopasnosti Bystrogo Reaktora s Natrievym Teplonositelem pri Avariynyh Protssah, Svyazannyh s Povrezhdeniem ili Razrusheniem Aktivnoy Zony: Avtoref. Diss....Kand. Fiz.-mat. Nauk. Obninsk, 2009. (in Russian).

7. Shchelyaev A. FlowVision — Sovremennyy Rossiyskiy Instrument Matematicheskogo Modelirovaniya. SAPR i Grafika. 2010;12:43—48. (in Russian).

8. Zhukova A.V., Sorokina A.P. Metodicheskie Ukazaniya i Rekomendatsii po Teplogidravlicheskomu Raschetu Aktivnyh Zon Bystryh Reaktorov. RTM 1604.008-88. M.: FEI, 1988. (in Russian).

9. **Uong H.** Osnovnye Formuly i Dannye po Teploobmenu dlya Inzhenerov. M.: Atomizdat, 1979. (in Russian).

10. **Afonin S.Yu., Afremov D.A., Zaharov A.G., Smirnov V.P.** Kombinirovannaya Metodika Rascheta Teplovydelyayushchih Sborok Reaktorov s Zhidkometallicheskimi Teplonositelem i ee Obosnovanie. Innovatsionnye Proekty i Tekhnologii Yadernoy Energetiki: Sbornik Dokladov IV Mezhdunar. Nauch.-tekhn. Konf. M., 2016:168—170. (in Russian).

Сведения об авторах

Чухлов Алексей Гелиевич — главный специалист научно-исследовательского и конструкторского института энерготехники им. Н.А. Доллежала, e-mail: agc@nikiet.ru

Жеребцова Екатерина Олеговна — инженер 2 категории научно-исследовательского и конструкторского института энерготехники им. Н.А. Доллежала, e-mail: zherebtsova@nikiet.ru

Information about authors

Chukhlov Aleksey G. — Chief Specialist of N.A. Dollezhal Research and Development Institute of Power Engineering, e-mail: agc@nikiet.ru

Zherebtsova Ekaterina O. — Engineer 2 Category of N.A. Dollezhal Research and Development Institute of Power Engineering, e-mail: zherebtsova@nikiet.ru

Статья поступила в редакцию 28.12.2016