Baykov A.V., Stepanova A.O., Dubov A.A. et al.

Investigation of Coolant Mixing in the VVER-1200 Reactor Core at Energy Levels of Power

ТЕПЛОФИЗИКА И ТЕПЛОГИДРАВЛИКА / THERMAL PHYSICS AND THERMAL HYDRAULICS

УДК 621.039.51

DOI: https://doi.org/10.26583/npe.2025.1.02 Оригинальная статья / Original paper

## Исследование перемешивания теплоносителя в активной зоне реактора ВВЭР-1200 на энергетических уровнях мощности

А.В. Байков<sup>1</sup>, А.О. Степанова<sup>1</sup>, А.А. Дубов<sup>1</sup>, А.В. Коцарев<sup>1</sup>, С.С. Гусев<sup>1</sup>, А.А. Бедринов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> НИЦ «Курчатовский институт»,

123182, г. Москва, пл. Курчатова, 1

<sup>2</sup> Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция», 396072, Воронежская область, г. Нововоронеж, промышленная зона Южная, 1

Реферат. Исследуется перемешивание теплоносителя в активной зоне реактора ВВЭР-1200 на уровне мощности 90% номинальной. Для изучения процессов перемешивания проведено моделирование переходного процесса с использованием программного комплекса ATHLET/BIPR-VVER, который позволяет выполнять связанные нейтронно-физические и теплогидравлические расчеты. Испытание системы аварийного ввода бора предусматривало подачу холодного раствора борной кислоты высокой концентрации в одну из петель первого контура при работе всех четырех главных циркуляционных насосов. На основании данных моделирования выполнены расчеты локальных и интегральных межпетлевых коэффициентов перемешивания, которые характеризуют распределение теплоносителя в активной зоне реактора. Коэффициенты перемешивания рассчитывались по значениям температур на входе и выходе топливных сборок, а также по коэффициентам неравномерности энерговыделения. Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными, полученными на первом энергоблоке НВАЭС-2, показало, что моделируемая неравномерность распределения теплоносителя находится в хорошем согласии с измерениями. При этом отмечено, что расчетная модель недооценивает интенсивность перемешивания, что делает ее подходящей для консервативного анализа безопасности в аварийных режимах. Для повышения точности реалистичных (неконсервативных) расчетов рекомендуется дальнейшая валидация модели на основании расширенных экспериментальных данных.

Ключевые слова: перемешивание теплоносителя, ATHLET/BIPR-VVER, BB3P-1200, система аварийного ввода бора (JND), энергетический уровень мощности, HBA3C-2, термопара.

**Для цитирования:** Байков А.В., Степанова А.О., Дубов А.А., Коцарев А.В., Гусев С.С., Бедринов А.А. Исследование перемешивания теплоносителя в активной зоне реактора ВВЭР-1200 на энергетических уровнях мощности. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2025;1:24–36. DOI: https://doi.org/10.26583/npe.2025.1.02

<sup>©</sup> Байков А.В., Степанова А.О., Дубов А.А., Коцарев А.В., Гусев С.С., Бедринов А.А., 2025

Исследование перемешивания теплоносителя в активной зоне реактора ВВЭР-1200 на энергетических уровнях мощности

## Введение

Исследование перемешивания теплоносителя в активной зоне реактора является важным для безопасности. Расчетно-теоретические исследования с использованием современных кодов позволяют лучше понять неравномерное распределение потоков теплоносителя в переходных процессах. В то же время актуальна задача валидации используемых для анализа безопасности расчетных кодов по экспериментальным данным.

В работе используется методика исследования перемешивания, предложенная в [1], позволяющая оценить поведение теплоносителя на важных участках циркуляционного контура и, в первую очередь, в реакторе путем создания неравномерности распределения индикатора в объеме контура.

Под перемешиванием теплоносителя понимается явление массопереноса в циркуляционном контуре. При циркуляции по четырехпетлевому контуру каждый из петлевых потоков при прохождении через реактор обменивается определенной массой теплоносителя с соседними петлевыми потоками, главным образом, за счет углового смещения (закрутки) потоков на участке контура от патрубков холодных ниток до входа в активную зону, а также за счет перемешивания на границах потоков.

Перемешивание теплоносителя исследуется путем создания неравномерности распределения индикатора в объеме контура циркуляции. Роль индикатора выполняет холодный (~25°С) раствор борной кислоты (РБК) высокой концентрации (~40.0 г/кг). Исследуемый переходный процесс инициируется во время работы реактора на мощности 90% номинальной ( $N_{\text{ном}}$ ) с полным количеством работающих ГЦНА. В процессе испытания было выполнено включение системы аварийного ввода бора (JND), которая подает РБК в холодную нитку четвертой циркуляционной петли реактора с расходом 4,8 кг/с. Далее РБК в активной зоне играет роль нейтронопоглощающего индикатора, так как увеличение поглощения тепловых нейтронов в теплоносителе приводит к уменьшению энерговыделения в топливе. Таким образом, неравномерность в распределении нейтронопоглощающего индикатора вызывает неравномерность в распределении энерговыделения в активной зоне.

Количество теплоносителя из холодной нитки определенной петли, попадающее в каждую ТВС или в горячую нитку каждой петли, характеризуется коэффициентами перемешивания (локальными или интегральными межпетлевыми). Локальные коэффициенты перемешивания — это относительные доли расхода теплоносителя в холодной нитке петли, в которую вводится индикатор, попадающие в каждую ТВС активной зоны. Их количество равно количеству ТВС (или количеству секторов активной зоны при усреднении по секторам). Интегральные коэффициенты межпетлевого перемешивания — это относительные доли расхода теплоносителя в холодной нитке петли, в которую вводится индикатор, попадающие в горячую нитку каждой петли. Их количество равно количеству петель.

Под выравниванием индикатора в теплоносителе понимается процесс, в ходе которого исходное неравномерное распределение индикатора в объеме контура циркуляции переходит в равномерное за счет перемешивания потоков при продолжительной циркуляции в контуре.

Данный сценарий моделировался при помощи программного комплекса ATHLET/ BIPR-VVER [2] и валидировался на данных, полученных в ходе проведения испытаний по проверке эффективности системы JND с определением коэффициентов перемешивания на первом блоке HBAЭC-2. Моделирование несимметричных динамических процессов в РУ с BBЭP при помощи ATHLET/BIPR-VVER рассмотрено в работах [3, 4].

## Описание расчетной модели

Переходный процесс, вызванный включением JND на четвертой петле и подачей РБК в первый контур, моделировался с помощью аттестованного программного комплекса ATHLET/BIPR-VVER, предназначенного для связанного нейтронно-теплогидравлического расчета нестационарных процессов в ядерных энергетических установках с водо-водяными реакторами типа BBЭP. ATHLET/BIPR-VVER представляет собой комплекс из двух сопряженных программ: теплогидравлической ATHLET [5] и нейтронно-физической БИПР-8 [6].

Программа БИПР-8 основана на двухгрупповом диффузионном приближении. В нейтронно-физической модели используется трехмерная гексагональная нодализация для описания всех ТВС в активной зоне и отражателей с разбиением на 10 слоев по высоте для топливной части и по одному слою сверху и снизу для торцевых отражателей. Кинетический модуль программы БИПР-8 рассчитывает изменение во времени мощности реактора и трехмерную деформацию нейтронного потока вследствие перемещения ОР СУЗ, параметров теплоносителя и концентрации борной кислоты с учетом шести групп запаздывающих нейтронов и эффектов обратных связей.

Теплогидравлическая модель первого контура представлена реактором и четырьмя петлями циркуляции. В каждой петле выделены три макроучастка: горячая нитка, трубки парогенератора, холодная нитка с ГЦНА. Каждый макроучасток разделен на расчетные объемы. Также моделируется компенсатор давления, подключенный к горячей нитке четвертой петли. В составе реактора моделируются опускной участок, нижняя камера смешения, все ТВС, протечки теплоносителя мимо активной зоны, верхняя камера смешения, пространство под крышкой реактора с блоком защитных труб. Теплогидравлическая модель каждой ТВС представляет собой изолированный канал, соединенный с общим объемом реактора только на входе и выходе ТВС. В каждой ТВС выделено 10 участков по высоте активной зоны (первый слой – нижний, десятый слой – верхний), в которые итеративно передаются значения энерговыделения из нейтронно-физического расчета. Система JND моделируется, включая выходной трубопровод, подключенный к холодной нитке четвертой петли, и насос, обеспечивающий подачу РБК в соответствии с проектными характеристиками.

Модель второго контура состоит из следующих групп элементов: парогенераторы с коллектором пара и уровнемером, система паропроводов от парогенератора до турбины, предохранительные клапаны, быстродействующие редукционные установки сброса пара в атмосферу и конденсатор, быстродействующий запорный обратный клапан, системы аварийного расхолаживания парогенератора, пассивного теплоотвода, отбор пара на турбину, система трубопроводов, проходящих от насосов питательной воды до коллектора питательной воды парогенератора, включая регулирующую и запорную арматуру. Исследование перемешивания теплоносителя в активной зоне реактора ВВЭР-1200 на энергетических уровнях мощности

Расчетная модель валидировалась путем сравнения результатов расчета переходного процесса, вызванного включением JND на четвертой петле, с данными измерений. Получены следующие максимальные данные за время процесса отклонения основных параметров РУ от данных измерений:

- мощность реактора: не более 0,9% N<sub>ном</sub>;
- температура в холодных нитках: не более 1°С;
- температура в горячих нитках: не более 3°С.

В результате проведенного моделирования были получены температуры теплоносителя на входе и выходе для каждой ТВС. На рисунке 1 изображены характерные температуры на входе в ТВС, в том числе ТВС с максимальной и минимальной температурой теплоносителя. На рисунке 2 изображены характерные температуры на выходе из ТВС, в том числе ТВС с максимальной и минимальной температурой



Рис. 1. Характерные температуры теплоносителя на входе в ТВС: 1 – ТВС № 158; 2 – ТВС № 153; 3 – ТВС № 1; 4 – ТВС № 31; 5 – ТВС № 23



Рис. 2. Характерные температуры теплоносителя на выходе из ТВС; 1 – ТВС № 20; 2 – ТВС № 116; 3 – ТВС № 79; 4 – ТВС № 5; 5 – ТВС № 12

## Baykov A.V., Stepanova A.O., Dubov A.A. et al.

## Investigation of Coolant Mixing in the VVER-1200 Reactor Core at Energy Levels of Power

теплоносителя. На рисунке 3 изображены средние по секторам (60° симметрия) коэффициенты неравномерности энерговыделения *KV* в объеме активной зоны в первом слое, где первый сектор соответствует 0 – 60°. При этом за 0 секунд по оси времени принят момент начала подачи раствора борной кислоты; от –100 секунд до 0 секунд – стабилизация параметров, стационарное состояние; 220 секунд – момент окончания подачи РБК в контур.



Рис. 3. Коэффициенты неравномерности энерговыделения КV в объеме активной зоны в первом слое по секторам симметрии: 1 – верхний – правый; 2 – правый, 3 – нижний – правый; 4 – нижний – левый; 5 – левый; 6 – верхний – левый

## Методика расчета

Существует неравномерность в распределении по активной зоне расхода теплоносителя первого контура, поступающего из холодной нитки петли в реактор из-за неполного перемешивания теплоносителя всех четырех холодных ниток петель между собой до его поступления в активную зону. С целью количественного определения данного эффекта в одну из петель подается РБК высокой концентрации от системы аварийного ввода бора, в результате чего в данной петле увеличивается концентрация борной кислоты по сравнению с другими петлями, что приводит к снижению мощности ТВС. Снижение мощности ТВС не является равномерным по активной зоне. На основании этого можно оценить неравномерность перемешивания теплоносителя в реакторе. В данном случае контролируемыми параметрами, по которым можно оценить неравномерность перемешивания, являются энерговыделение, подогрев теплоносителя, температуры на входе и выходе из ТВС, температуры холодных и горячих ниток. По подогреву теплоносителя на ТВС, по температуре теплоносителя на выходе из ТВС и энерговыделению в ТВС можно судить о неполноте перемешивания теплоносителя в зазоре между корпусом и шахтой реактора. По температурам на входе в ТВС можно судить о неполноте перемешивания в активной зоне и в объеме реактора над активной зоной, так как неравномерность температуры на входе в ТВС определяется неравномерностью температур холодных ниток, которая, в свою очередь, определяется

неравномерностью температур горячих ниток, вызванной неполным перемешиванием теплоносителя до поступления в горячие нитки. По температурам в горячих и холодных нитках можно судить о неполноте перемешивания теплоносителя по реактору в целом. Для регистрации неравномерности распределений используются системы нейтронного и температурного мониторинга, которые регистрируют следующие параметры:

- коэффициенты объемной неравномерности энерговыделения;
- показания ионизационных камер аппаратуры контроля нейтронного потока;
- показания термодатчиков на входе и выходе из активной зоны;
- показания петлевых термодатчиков в горячих нитках петель.

Данные измерений этих величин используются для вычисления коэффициентов перемешивания. Для вычисления коэффициентов перемешивания на основании результатов моделирования вместо показаний датчиков используются значения температур на входе и выходе TBC, температур в горячих и холодных нитках петель, энерговыделения во всех TBC, рассчитанные по программе ATHLET/BIPR-VVER.

Предварительно рассчитывается относительное отклонение показаний датчиков от усредненного по всем датчикам значения по формуле (1). При этом датчики могут быть объединены в группы, и в таком случае рассчитывается отклонение показаний, усредненных по группам датчиков, от усредненного по всем датчикам значения. Реперные точки по времени: 1 – до включения насоса аварийного ввода бора (начало процесса); 2 – выравнивание индикатора после отключения насоса (конец процесса).

$$d_{ij} = \frac{b_{ij}N}{\sum_{i=1}^{N} b_{ij}} - 1,$$
 (1)

где *i* – номер датчика или группы датчиков; *j* – точка по времени, с; *b<sub>ij</sub>* – показание датчика или группы датчиков (или расчетное значение соответствующего параметра в модели), размерность зависит от типа датчика; *N* – количество датчиков или групп датчиков.

Нормализация сигнала и устранение уклона выполняется по формуле

$$D_{ij} = d_{ij} - \left[ d_{ij_1} + \left( d_{ij_2} - d_{ij_1} \right) \times \frac{j - j_1}{j_2 - j_1} \right],$$
(2)

где $j_1$  – время начала процесса, с;  $j_2$  – время окончания процесса, с;  $d_{ij_1}$  – относительное отклонение показаний датчика или группы датчиков в момент времени начала процесса;  $d_{ij_2}$  – относительное отклонение показаний датчика или группы датчиков в момент времени времени времени.

Коэффициент перемешивания К<sub>тіх</sub> вычисляется по формулам

$$a_{ij} = \max_{i=1,N} \left( D_{ij} \right) - D_{ij} + const, \tag{3}$$

$$K_{mixij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^{N} a_{ij}} \cdot 100, \qquad (4)$$

где const – константа для устранения нулевых значений а,..

Коэффициенты перемешивания *К<sub>тіх</sub>* используются для количественной оценки неравномерности распределения индикатора на момент максимального отклонения от среднего значения.

## Анализ результатов моделирования

По результатам моделирования исследуемого процесса проведена оценка локальных коэффициентов перемешивания. Неравномерность распределения индикатора оценивается путем вычисления коэффициентов перемешивания на момент максимального отклонения, т.е. на 220-й секунде после начала подачи РБК. Рассчитаны локальные коэффициенты перемешивания по температурам на входе в ТВС (рис. 4), температурам на выходе из ТВС (рис. 5) и по энерговыделению в нижней части ТВС (рис. 6). Сумма значений на каждой картограмме равна 100.



Рис. 4. Локальные коэффициенты перемешивания по температуре на входе в активную зону

По представленным результатам наблюдается неравномерность распределения значений  $K_{mix}$  по секторам активной зоны с заметным максимумом в области, наиболее близкой к патрубкам четвертой петли. Полученное распределение локальных коэффициентов перемешивания по температуре на входе в ТВС (см. рис. 4) свидетельствует о том, что при прохождении опускного участка и нижней камеры смешения массообмен между потоком теплоносителя из четвертой петли и потоками из других петель незначителен, поэтому поток из четвертой петли на данном участке контура сохраняет свою обособленность и оказывает влияние на определенную ограниченную область активной зоны. Локальные коэффициенты перемешивания равны 0,76 в секторе, ближайшем к четвертой петле; 0,51 – в противоположном секторе возле второй петли; 0,59 – возле первой и третьей петель.

Распределение локальных коэффициентов перемешивания по температуре на выходе из ТВС (см. рис. 5) имеет другой характер. По сравнению с результатами для

Байков А.В., Степанова А.О., Дубов А.А. и др.

Исследование перемешивания теплоносителя в активной зоне реактора ВВЭР-1200 на энергетических уровнях мощности



Рис. 5. Локальные коэффициенты перемешивания по температуре на выходе из активной зоны

входа в ТВС здесь увеличивается разница между максимумом (1,07) в секторе возле четвертой петли и минимумом (0,32) в противоположном секторе возле второй петли. Это связано с тем, что помимо снижения температуры за счет поступления в данную область холодного индикатора в данном секторе уменьшается подогрев теплоносителя из-за уменьшения энерговыделения. Последнее объясняется поглощением тепловых нейтронов при прохождении теплоносителя с повышенной концентрацией борной кислоты. Также заметна разница между минимумом возле второй петли и значениями возле первой и третьей петель. Это свидетельствует о наличии поперечного межкассетного массообмена, из-за которого происходит размывание «борного пятна» при прохождении активной зоны, что согласуется с результатами [1, 3]. Таким образом, при движении к выходу из активной зоны влияние потока из четвертой петли на соседние секторы увеличивается.



Рис. 6. Локальные коэффициенты перемешивания по неравномерности объемного энерговыделения в первом слое

Оценка локальных коэффициентов перемешивания по значениям коэффициентов неравномерности объемного энерговыделения *KV* проводилась для первого (нижнего) слоя активной зоны. При этом *KV* были усреднены по 60-градусным секторам, и локальные коэффициенты перемешивания рассчитывались для усредненных по секторам значений *KV*. Усреднение *KV* по секторам позволяет наглядно, но довольно грубо, оценить влияние потока теплоносителя из четвертой петли на секторы активной зоны. Результаты представлены на рис. 6. Максимум (1,38) наблюдается в левом-верхнем секторе картограммы (возле четвертой петли), а минимум (0,06) – в правом-нижнем секторе. Также наблюдается уменьшение значений *K<sub>mix</sub>* от максимального сектора к минимальному. Данный результат согласуется с результатом оценки *K<sub>mix</sub>* по температурам на входе и выходе TBC, и также свидетельствует о незначительном массообмене между потоками на участке от патрубков петель до входа в TBC.

## Сравнение результатов моделирования с данными измерений

Сравнение локальных коэффициентов перемешивания, рассчитанных по температуре теплоносителя на выходе из TBC на основании результатов моделирования по программе ATHLET/BIPR-VVER, и данных измерений, показано на рис. 7. Погрешность сравнения данных расчета и эксперимента при определении локальных коэффициентов перемешивания по температуре на выходе из TBC составляет 22%. Сравнение интегральных межпетлевых коэффициентов перемешивания, рассчитанных по температурам в горячих нитках петель, представлено на рис. 8. Погрешность сравнения данных расчета и эксперимента при определении интегральных коэффициентов перемешивания по температуре в горячих нитках составляет 8%. Между распределениями коэффициентов перемешивания, полученных по данным моделирования и по данным измерений, наблюдается отличие – моделирование показывает более сильную неравномерность распределения индикатора как в активной зоне, так и по

a) б) .94 0.95 0.88 0.71 0.64 0.58 0.73 0.74 0.73 0.72 0.70 0.69 1.02 1.02 0.97 0.83 0.69 0.62 0.57 0.53 0.72 0.74 0.75 0.75 0.73 0.71 0.69 0.66 0.64 .02 1.07 1.07 0.90 0.83 0.66 0.60 0.59 0.54 0.52 0.71 0.73 0.74 0.73 0.72 0.71 0.69 0.66 0.63 0.63 L.00 1.07 0.94 0.91 0.99 0.82 0.70 0.57 0.53 0.52 0.50 0.70 0.72 0.72 0.72 0.71 0.70 0.67 0.66 0.64 0.61 0.61 .97 1.04 0.92 1.06 1.00 0.83 0.65 0.63 0.57 0.51 0.49 0.47 0.68 0.70 0.71 0.71 0.70 0.69 0.67 0.62 0.60 0.62 0.59 0.58 0.94 1.01 0.89 1.00 0.88 0.94 0.80 0.64 0.55 0.52 0.48 0.46 0.45 0.66 0.68 0.69 0.69 0.69 0.67 0.65 0.62 0.61 0.57 0.60 0.55 0.56 0.87 0.95 0.86 0.98 0.85 0.93 0.76 0.60 0.57 0.50 0.47 0.46 0.43 0.44 0.65 0.66 0.68 0.66 0.67 0.65 0.65 0.63 0.57 0.58 0.54 0.58 0.54 0.55 0.82 0.86 0.76 0.84 0.81 0.69 0.64 0.50 0.48 0.45 0.43 0.40 0.39 0.65 0.66 0.66 0.63 0.62 0.63 0.59 0.60 0.54 0.53 0.57 0.53 0.54 0.68 0.73 0.66 0.73 0.65 0.67 0.57 0.47 0.45 0.42 0.39 0.39 0.36 0.37 0.64 0.64 0.65 0.62 0.63 0.58 0.60 0.59 0.53 0.56 0.51 0.57 0.53 0.56 0.67 0.67 0.61 0.64 0.58 0.58 0.50 0.43 0.41 0.38 0.38 0.35 0.36 0.63 0.62 0.64 0.60 0.60 0.56 0.53 0.52 0.55 0.51 0.56 0.52 0.54 0.61 0.61 0.57 0.58 0.56 0.50 0.42 0.40 0.37 0.37 0.34 0.35 0.62 0.61 0.62 0.57 0.55 0.57 0.56 0.51 0.50 0.56 0.52 0.53 0.57 0.57 0.53 0.51 0.51 0.45 0.39 0.38 0.36 0.33 0.34 0.60 0.59 0.61 0.59 0.54 0.53 0.51 0.56 0.56 0.52 0.53 0.54 0.53 0.52 0.49 0.46 0.40 0.38 0.34 0.34 0.34 0.60 0.58 0.56 0.59 0.58 0.57 0.57 0.53 0.53 0.53 0.52 0.50 0.48 0.46 0.42 0.37 0.35 0.34 0.35 0.59 0.57 0.56 0.55 0.54 0.53 0.53 0.53 0.56 0.58 0.57 0.55 0.55 0.55 0.56 0.48 0.47 0.45 0.38 0.36 0.36

Рис. 7. Локальные коэффициенты перемешивания по температуре на выходе из TBC: a) по результатам моделирования; б) по данным измерений

Исследование перемешивания теплоносителя в активной зоне реактора ВВЭР-1200 на энергетических уровнях мощности



Рис. 8. Интегральные межпетлевые коэффициенты перемешивания по температуре в горячих нитках (сумма по петлям равна 100)

петлям. В условиях эксперимента происходит более интенсивное перемешивание и, следовательно, выравнивание индикатора. Для примера – в случае интенсивного перемешивания, приводящего к полному выравниванию индикатора, значение коэффициента перемешивания для каждой петли было бы равно 25-ти.

Погрешности определяемых в эксперименте величин составляют:

- для температур в петле ±0,5°С;
- для температур на входе и выходе из TBC ±1°C;
- для неравномерности объемного энерговыделения 5%;
- для линейного энерговыделения 10%.

Из полученных результатов можно сделать вывод о недостаточно реалистичном моделировании перемешивания теплоносителя в расчетной модели ATHLET/BIPR-VVER. Это согласуется с результатами работы [3], где также отмечается недооценка интенсивности перемешивания теплоносителя в модели ATHLET/BIPR-VVER. Данная особенность модели является преимуществом при применении консервативного подхода в анализе безопасности, так как позволяет получать неблагоприятные результаты при моделировании таких процессов, как разрыв паропровода. Для повышения точности реалистичных расчетов модель перемешивания может быть дополнительно валидирована с использованием экспериментальных данных.

## Заключение

Выполнено моделирование с помощью кода ATHLET/BIPR-VVER испытания системы аварийного ввода бора на энергетических уровнях мощности на реакторе BBЭP-1200 и сравнение с экспериментальными данными.

Проведена количественная оценка коэффициентов перемешивания теплоносителя (локальных и интегральных межпетлевых) в активной зоне реактора на энергетическом уровне мощности.

Результаты показывают, что индикатор в виде холодного раствора борной кислоты вызывает существенную неравномерность в распределении параметров активной зоны. При этом по высоте ТВС неравномерность возрастает, так как на выходе из ТВС раствор борной кислоты выполняет роль как температурного, так и нейтронного индикатора.

Для повышения точности реалистичных расчетов модель перемешивания кода ATHLET/BIPR-VVER может быть дополнительно валидирована с использованием экспериментальных данных.

## Литература

1. Беркович В.Я., Пономаренко Г.Л., Никитенко М.П., Быков М.А., Манаков В.Н. Новый метод и результаты экспериментального исследования перемешивания теплоносителя на действующем энергоблоке ВВЭР-1000 АЭС «Бушер» с участием штатного комплекса систем мониторинга. *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Обеспечение безопасности АЭС.* 2012;31:91–102. EDN: PLHRDL. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary\_18338199\_10319650.pdf (дата обращения 12.01.2025).

2. Программа ATHLET/BIPR-VVER (версия 1.0). Аттестационный паспорт программного средства. Регистрационный номер паспорта аттестации № 455 от 24.10.2018.

3. Tsyganov S.V., Kotsarev A.V., Baykov A.V. Experimental study of asymmetric boron dilution at VVER-1000 of Kudankulam NPP and its simulation. *Kerntechnik*. 2017;82(4):372–380. DOI: https://doi.org/10.3139/124.110821

4. Байков А.В., Дубов А.А., Коцарев А.В., Шумский Б.Е. Моделирование переходного процесса в BBЭP-1200 с помощью сопряженного нейтронно-физического и теплогидравлического кода ATHLET/BIPR-VVER. *Атомная энергия*. 2019;127(4):183–186. URL: https://elib.biblioatom. ru/text/atomnaya-energiya\_t127-4\_2019/p183/ (дата обращения 12.01.2025).

5. Программа ATHLET (версия 21А\_А). Аттестационный паспорт программного средства. Регистрационный номер паспорта аттестации № 350 от 17.04.2014.

6. Программа БИПР-8 (версия 1.2). Аттестационный паспорт программного средства. Регистрационный номер паспорта аттестации № 85 от 18.12.1997.

> Поступила в редакцию 16.07.2024 После доработки 12.01.2025 Принята к опубликованию 31.01.2025

## Авторы

Байков Александр Викторович, научный сотрудник, E-mail: Baykov\_AV@nrcki.ru <u>Степанова</u> Алена Олеговна, инженер, E-mail: Vertikova\_AO@nrcki.ru <u>Дубов</u> Алексей Андреевич, начальник лаборатории, E-mail: Dubov\_AA@nrcki.ru <u>Коцарев</u> Александр Витальевич, начальник отдела, E-mail: Kotsarev\_AV@nrcki.ru <u>Гусев</u> Степан Сергеевич, научный сотрудник, E-mail: Gusev\_SS@nrcki.ru <u>Бедринов</u> Андрей Александрович, начальник отдела, E-mail: BedrinovAA@nvnpp1.rosenergoatom.ru UDC 621.039.51

# Investigation of Coolant Mixing in the VVER-1200 Reactor Core at Energy Levels of Power

### Baykov A.V.<sup>1</sup>, Stepanova A.O.<sup>1</sup>, Dubov A.A.<sup>1</sup>, Kotsarev A.V.<sup>1</sup>, Gusev S.S.<sup>1</sup>, Bedrinov A.A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Kurchatov Institute NRC,

1 Acad.Kurchatov Sq., 123182 Moscow, Russia,

<sup>2</sup> Novovoronezh Nuclear Power Plant, Branch of "Concern Rosenergoatom",

1 Yuzhnaya Industrial Zone, 396072 Novovoronezh, Voronezh reg., Russia

#### Abstract

This study focuses on the investigation of coolant mixing in the VVER-1200 reactor core at 90 % of nominal power. To investigate the mixing processes, a transient was simulated using the ATHLET/BIPR-VVER code, which allows undertaking coupled neutron kinetic and thermal-hydraulic calculations. In the process of testing the emergency boron injection system, a cold boric acid solution with a high concentration was injected into one of the primary circuit loops, while all four reactor coolant pumps were in operation. The coolant mixing process is analyzed by calculating local and integral inter-loop mixing coefficients based on the fuel assembly inlet and outlet temperature values, as well as based on the power peaking factors. These mixing coefficients are used to quantify the distribution non-uniformity of coolant flows within the reactor core. The simulation results are compared with the experimental data obtained in the process of tests at the Novovoronezh NPP-2's unit 1. The analysis of the calculation and measurements results has shown that the injection of a cold boric acid solution leads to major non-uniformities in power and coolant temperature distributions. Furthermore, the results has revealed that the coolant flow from the fourth loop has a localized effect on specific reactor core sectors, as evidenced by differences in the mixing coefficients. The comparison results have shown that the intensity of simulated coolant mixing is lower than obtained based on measurement data. It emphasizes good utility of the ATHLET/BIPR-VVER for conservative safety assessments in simulation of non-symmetrical thermal-hydraulic transients. Further validation of the computational model using comprehensive experimental data is recommended to improve the accuracy of realistic (non-conservative) simulations.

**Keywords:** coolant mixing, ATHLET/BIPR-VVER, VVER-1200, emergency boron input system (JND), energetic level of power, Novovoronezh NPP-2, thermocouple.

**For citation:** Baykov A.V., Stepanova A.O., Dubov A.A., Kotsarev A.V., Gusev S.S., Bedrinov A.A. Investigation of Coolant Mixing in the Core of the VVER-1200 Reactor at Power Levels. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2025;1:24–36. DOI: https://doi.org/10.26583/npe.2025.1.02 (in Russian).

### References

1. Berkovich V.J., Ponomarenko G.L., Nikitenko M.P., Bykov M.A., Manakov V.N. Innovate experimental study of coolant mixing and its results obtained using of standard monitoring system complex at operating WWER-1000 unit of Bushehr NPP. *Issues of atomic science and technology. Series: NPP safety* [*Voprosy atomnoy nauki i tehniki. Obespechenie bezopasnosti AES*]. 2012;31:91–102. EDN: PLHRDL. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary\_18338199\_10319650.pdf (accessed 12.01.2025) (in Russian).

2. The ATHLET/BIPR-VVER program (version 1.0). Certification passport of the software. The registration number of the certification passport No. 455 dated 24.10.2018 (in Russian).

3. Tsyganov S.V., Kotsarev A.V., Baykov A.V. Experimental study of asymmetric boron dilution at VVER-1000 of Kudankulam NPP and its simulation. *Kerntechnik*. 2017;82(4):372–380. DOI: https://doi.org/10.3139/124.110821

4. Baykov A.V., Dubov A.A., Kotsarev A.V., Shumskiy B.E. Simulation of a transient process in VVER-1200 by means of the Athlet/BIPR-VVER coupled neutronics and thermohydraulic code. *Atomic energy*. 2020;127(4):197–201. DOI: https://doi.org/10.1007/s10512-020-00610-w

5. The ATHLET program (version 21A\_A). Certification passport of the software. The registration number of the certification passport No. 350 dated 17.04.2014 (in Russian).

6. BIPR-8 program (version 1.2). Certification passport of the software. of the software. The registration number of the certification passport No. 85 dated 18.12.1997 (in Russian).

## Authors

Aleksandr V. <u>Baykov</u>, Researcher, E-mail: Baykov\_AV@nrcki.ru Alena O. <u>Stepanova</u>, Engineer, E-mail: Vertikova\_AO@nrcki.ru Aleksey A. <u>Dubov</u>, Head of thelaboratory, E-mail: Dubov\_AA@nrcki.ru Aleksandr V. <u>Kotsarev</u>, Head of Department, E-mail: Kotsarev\_AV@nrcki.ru Stepan S. <u>Gusev</u>, Researcher, E-mail: Gusev\_SS@nrcki.ru Andrey A. <u>Bedrinov</u>, Head of Department, E-mail: BedrinovAA@nvnpp1.rosenergoatom.ru