

Визуализация течения потока теплоносителя в модели опускной камеры ядерного реактора

А.А. Добров¹, Д.В. Доронков², А.В. Рязанов³, А.Е. Хробостов⁴

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

¹ ORCID: 0000-0001-7363-8791, dobrov@nntu.ru

² ORCID: 0000-0003-0668-4215, nevidooo@mail.ru

³ ORCID: 0000-0002-4951-8930, a_v_ryazanov@rambler.ru

⁴ ORCID: 0000-0002-6349-2861, khrobostov@nntu.ru

Аннотация

Статья посвящена визуализации результатов экспериментальных работ, направленных на изучение турбулентного течения теплоносителя в модели опускной камеры ядерного реактора. Используя метод инъекции пассивной контрастной примеси в одну из четырех петель циркуляции теплоносителя, изучался процесс течения теплоносителя в опускной камере реактора. На основе эксперимента получены значения объемной концентрации трассера в отдельных точках модели характеризующие особенности и закономерности течения потока теплоносителя. Для визуализации результатов был использован программный комплекс Matlab. Полученные в ходе обработки экспериментальных данных поля концентрации трассера в характерных областях модели напорной камеры позволили провести анализ особенностей движения и перемешивания петлевых потоков теплоносителя. Экспериментально получен и визуализирован эффект закрутки потока теплоносителя в опускном канале и в нижней напорной камере модели.

Ключевые слова: перемешивание, метод трассера, ядерный реактор.

1. Введение

Создание новых водо-водяных ядерных энергетических станций (ЯЭУ) требует проведения комплекса научно-исследовательских работ по обоснованию безопасности как новых конструкторских решений, так и режимов работы ЯЭУ. Обоснование теплотехнической надежности во многом базируется на теплогидравлическом расчете, что требует информативности и достоверности параметров теплоносителя с учетом их локального распределения внутри реактора.

Одним из вопросов определения теплогидравлической эффективности работы ЯЭУ является исследование процессов перемешивания потоков теплоносителя, поступающего по нескольким петлям циркуляции в опускную камеру реактора. Такие исследования позволяют уточнить распределение температуры на входе в активную зону и в петлях теплообмена, что особенно важно в режимах работы реакторной установки с несимметричной нагрузкой [1-4]. Также результаты таких исследований необходимы для расчета распределения концентрации борной кислоты в активной зоне при инъекции ее в теплоноситель первого контура [5-8].

2. Экспериментальный стенд

Экспериментальный стенд ФТ-50 НГТУ им. Р.Е. Алексеева (рис. 1) представляет собой аэродинамический разомкнутый контур. Стенд предназначен для проведения исследований локальных значений скорости и давления потока, а также перемешивания теплоносителя в моделях основного оборудования ядерных реакторов [10-13]. В состав

стенда входят: вентилятор высокого давления, ресиверная ёмкость, подводной гидравлический коллектор, экспериментальная модель, измерительный комплекс.

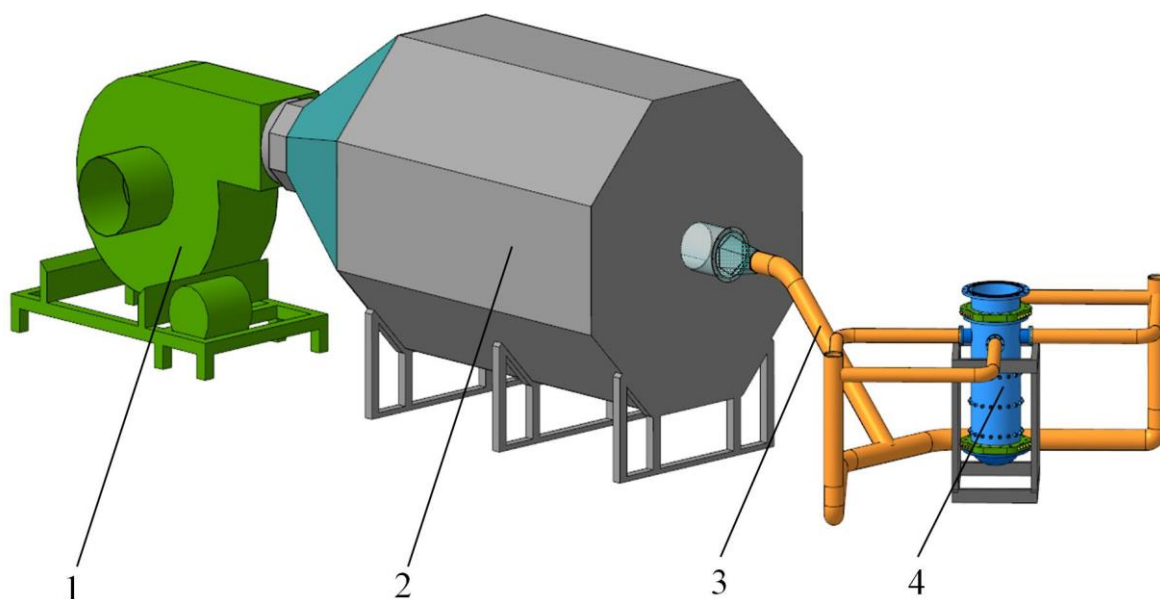


Рис. 1. Общий вид экспериментального стенда: 1 – вентилятор; 2 – ресивер; 3 – подводной коллектор; 4 – экспериментальная модель опускной камеры реактора.

3. Экспериментальная модель

Экспериментальная модель (рис. 2) – это упрощенная масштабная модель напорной камеры водо-водяного ядерного реактора с четырьмя петлями циркуляции теплоносителя [14].

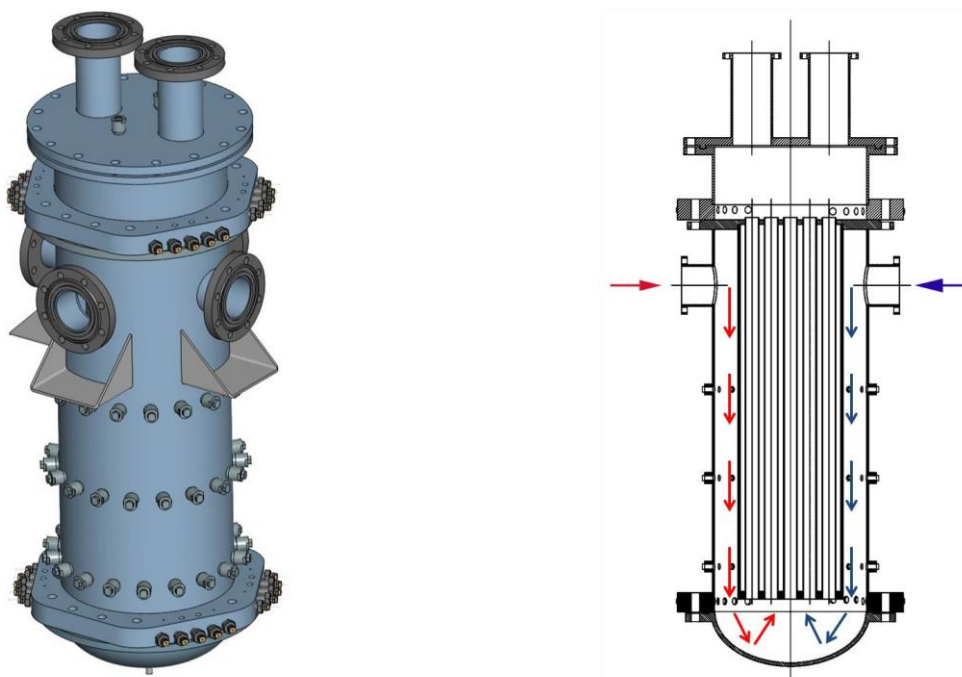


Рис. 2. Экспериментальная модель напорной камеры ядерного реактора.

Движение рабочей среды организуется следующим образом: радиальный подвод по четырем патрубкам, прохождение опускного кольцевого канала до нижней напорной камеры, сформированной эллиптическим днищем и нижней частью имитатора активной зоны, подъём через имитаторы активной зоны с последующим осевым выходом из верхней сливной камеры. Конструктивно экспериментальная модель обладает четырьмя вводными патрубками, отстоящими друг от друга на 90 градусов. Имитатор активной зоны представляет собой набор из девятнадцати дросселированных вертикальных каналов, которые моделируют перепад давления в активной зоне.

4. Методика экспериментального исследования

Экспериментальная модель оснащена четырьмя патрубками ввода теплоносителя, по одному из которых подавался воздух с контрастной примесью, по трем другим - воздух. Организуемый «несимметричный» режим схематично представлен на рис. 3.

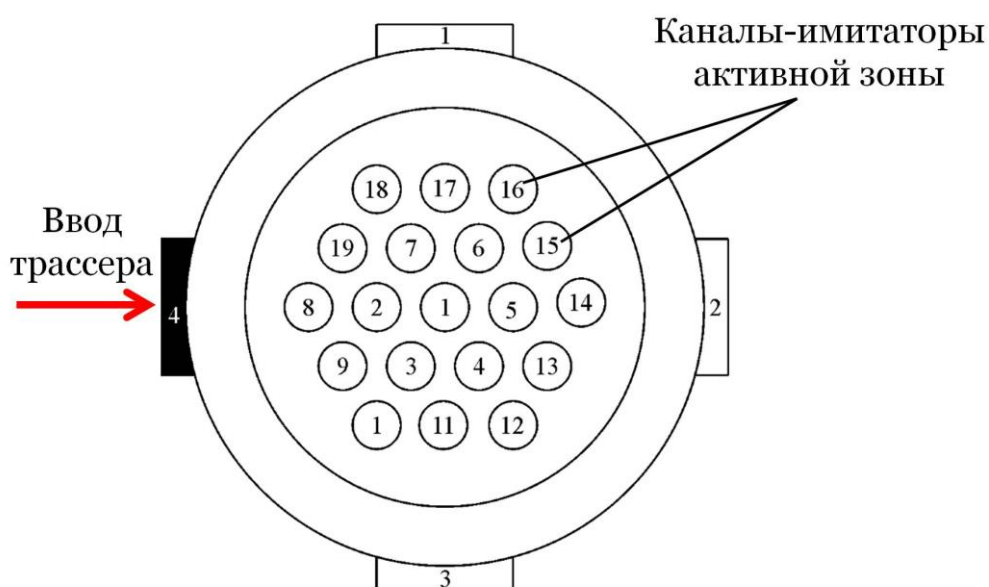


Рис. 3. Моделируемый «несимметричный» режим работы ядерного реактора.

Расходы рабочей среды в каждой петле устанавливались и поддерживались одинаковыми. В данной работе приведены результаты для одного из экспериментальных режимов, которому соответствует значение критерия Рейнольдса Re , определенное по сечению опускного кольцевого канала, равное 20000. В целом комплекс экспериментальных исследований, проводимых в НГТУ им. Р.Е. Алексеева, предусматривает варьирование критерия Рейнольдса за счет изменения отдельных входящих в него параметров: скорости потока и кинематической вязкости (используя разные рабочие среды - воздух/вода, а также нагрев среды), в диапазоне $Re=10000 \div 50000$.

Изучение особенностей течения теплоносителя внутри модели реактора проводилось с использованием метода ввода трассера (контрастной пассивной примеси), в качестве которого был выбран пропан. Присутствие этого газа в малых количествах в воздушной среде в условиях конвективного высокотурбулентного потока не оказывает влияния на течение.

Введение контрастной примеси в экспериментальную модель позволяет наглядно изучить гидродинамические характеристики теплоносителя в процессе межпетлевого перемешивания [15-17]. Значения объемной концентрации пропана в воздушном потоке не превышали 1200 млн^{-1} (патрубок инъекции трассера), что значительно меньше концентрации образования взрывоопасной смеси (минимум 17000 млн^{-1}). При этом такие значения могут быть измерены с удовлетворительной точностью ($\pm 15 \text{ млн}^{-1}$) с ис-

пользованием газоанализатора углеводородов, принцип действия которого основан на измерении величины поглощения инфракрасного излучения в измерительной кювете, через которую прокачивается измеряемая газоздушная смесь.

Для изучения процесса перемешивания петлевых потоков теплоносителя в модели ядерного реактора характерными областями были выбраны два участка модели: опускная кольцевая и нижняя напорная камеры (рис. 4).

Области изучения процессов:
1 – опускной кольцевой канал;
2 – нижняя напорная камера

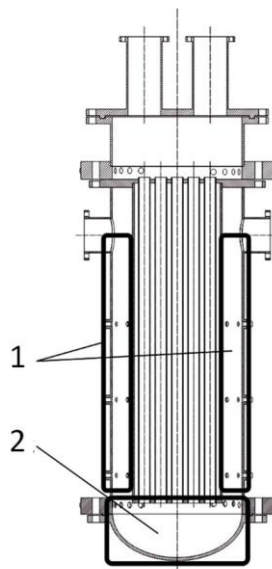


Рис. 4. Характерные области модели напорной камеры ядерного реактора.

Отбор проб газа в опускном кольцевом канале производился с помощью Г-образной трубки $\text{Ø}4 \times 0,5$ мм, вводимой в модель через штуцеры, расположенные на корпусе опускной части на трех высотных уровнях (шаг по высоте 220 мм). На каждом уровне по периметру измерения проводились в 20 точках, отстоящих друг от друга на 20° . Отборный зонд позиционировался на среднем диаметре опускного канала.

Отбор проб газа в нижней напорной камере осуществлялся с использованием прямых зондов из трубок $\text{Ø}4 \times 0,5$ мм, установленных на входах в каналы-имитаторы активной зоны.

5. Визуализация течения потока теплоносителя в опускном канале экспериментальной модели

Обработка результатов проводилась в программном комплексе Matlab, который имеет обширную библиотеку функций математической и графической обработки данных, а также позволяет создавать свои скрипты и компилировать на их основе приложения для Windows.

Задачей визуализации распределения трассера в опускном канале экспериментальной модели являлось графическое построение цилиндрической поверхности с размерами, соответствующими геометрии модели, и последующей интерполяцией на нее измеренных в отдельных точках численных значений концентрации трассера, а также закраска в виде контурного графика.

Реализация такой процедуры в программе Matlab может быть осуществлена следующим образом:

```
a = meshgrid(linspace(0, 2*pi, astep), ...  
            linspace(0, 2*pi, astep));  
X = R.*cos(a);  
Y = R.*sin(a);
```

```

Z = meshgrid(linspace(Zmin, Zmax, Zstep), ...
            linspace(Zmin, Zmax, Zstep))';
C = griddata(dat(:,1), dat(:,2), dat(:,3), ...
            (180/pi).*a, Z, 'cubic');
surf(X, Y, Z, C, 'EdgeColor', 'none');
colormap('jet')

```

a – переменная с координатами узлов сетки по угловой координате;
 $astep$ – шаг расположения узлов сетки по угловой координате;
 X, Y, Z - координаты узлов сетки в декартовой системе;
 R – радиус цилиндрической поверхности;
 $Zmin, Zmax, Zstep$ – минимальное, максимальное значение координаты Z и шаг построения сетки по высоте;
 C – интерполированное поле значений концентрации трассера;
 dat – матрица, содержащая экспериментальные данные (1 столбец – угловые координаты точек измерения, 2 столбец – координаты точек по высоте, 3 столбец – измеренные значения концентрации трассера).

Результат выполнения данной операции представлен на рис. 5.

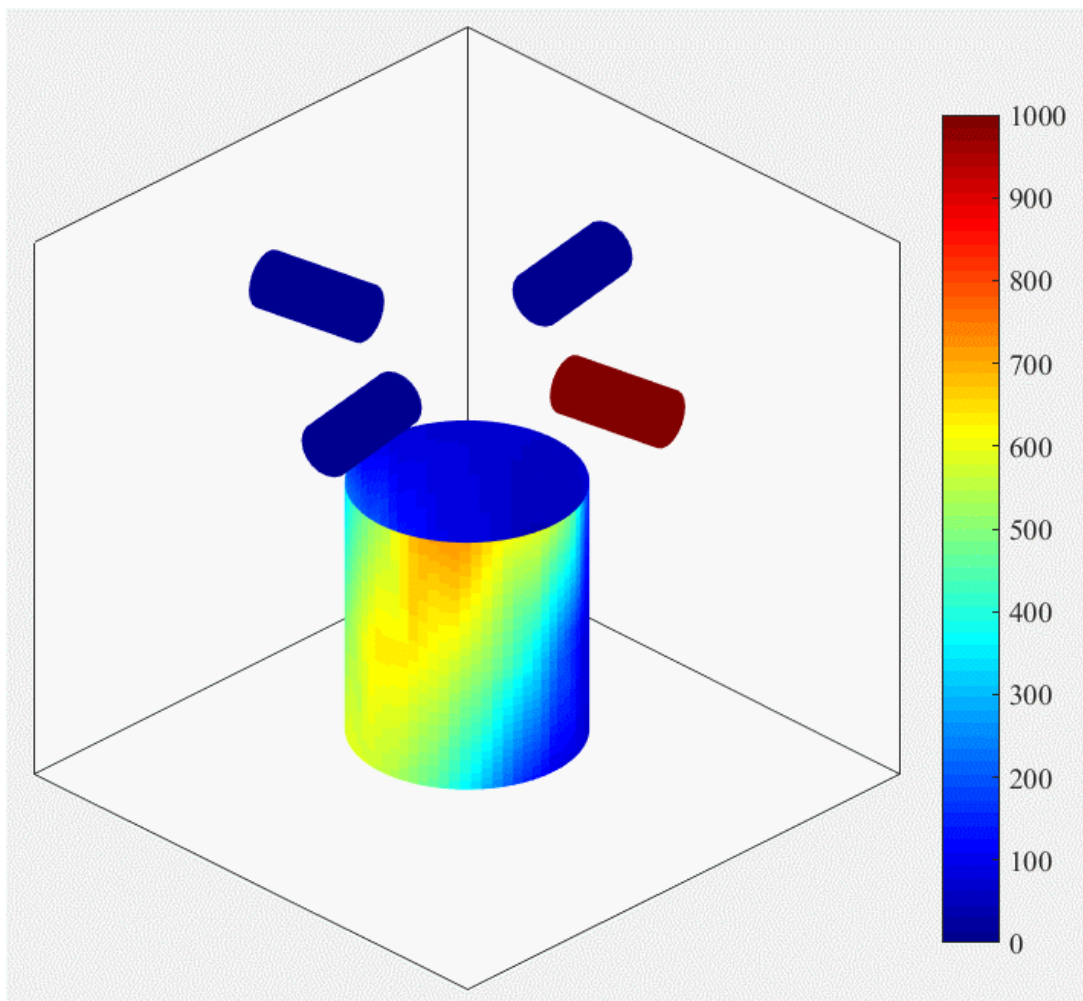


Рис. 5. Визуализация экспериментального распределения трассера в опускном кольцевом канале модели ($Re=20000$; закраска по значениям объемной концентрации в $млн^{-1}$).

Из рис. 5 можно видеть, что поток теплоносителя из патрубка подачи трассера движется в опускном канале по спирали. Для количественной оценки угла закрутки потока была проведена развёртка данной поверхности на плоскость. Результат такой операции представлен на рис. 6.

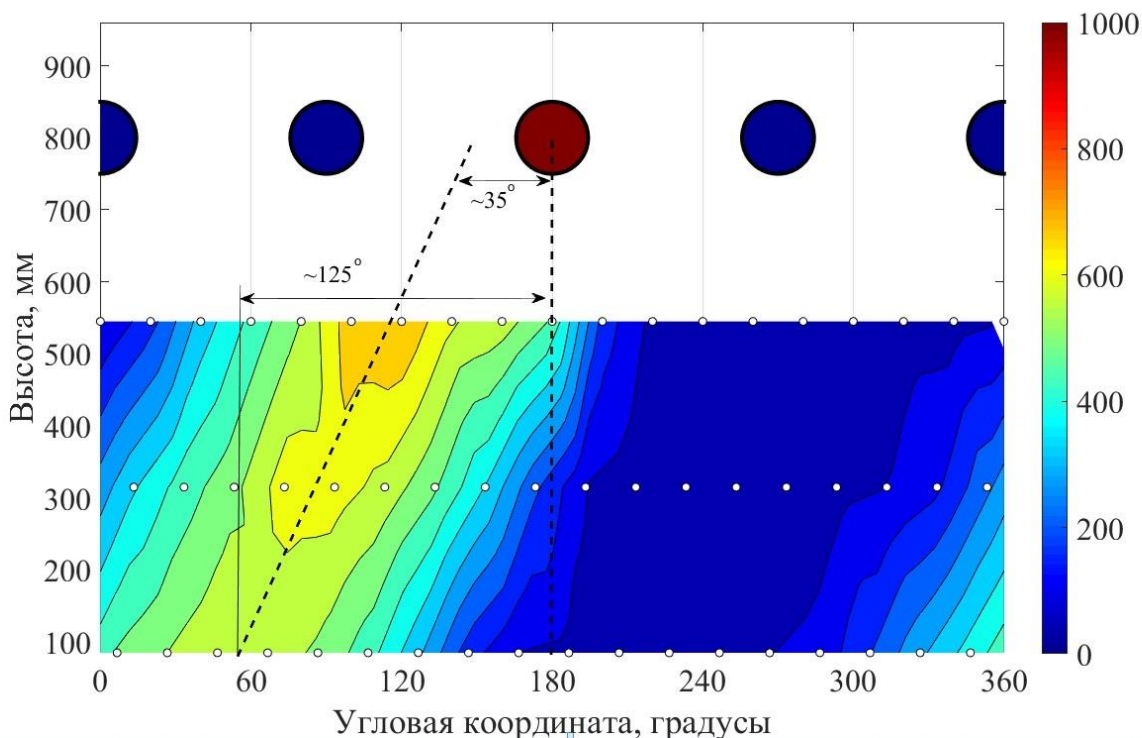


Рис. 6. Визуализация поля концентрации трассера в опускном кольцевом канале модели (развёртка на плоскость).

Приведенные результаты визуализации позволили определить, что поток теплоносителя из циркуляционной петли с трассером сразу на входе в опускной кольцевой канал оказывается смещенным на угол $\sim 30-35^\circ$, что вероятно обусловлено ударом о внутреннюю стенку кольцевой камеры. Далее движение вниз происходит по спирали, при этом интенсивность закрутки остается постоянной во всей опускной части модели. Об этом свидетельствует возможность провести прямую линию через максимум струи трассера на развертке поля концентрации (рис. 6). Перед входом в нижнюю напорную камеру максимум концентрации трассера сместился на угол $\sim 125-130^\circ$ градусов от оси патрубка подачи. При этом из рисунка также можно заметить, что интенсивного размытия пятна трассера поперек потока в кольцевой камере не происходит, что говорит о небольшом влиянии турбулентной диффузии по сравнению с конвективным переносом, а также об отсутствии крупных поперечных вихрей.

6. Визуализация перемешивания потока теплоносителя в нижней напорной камере экспериментальной модели

Задачей графической визуализации течения в нижней напорной камере экспериментальной модели являлось построение картограммы распределения концентрации трассера на входе в каналы-имитаторы активной зоны. Для этого производилось последовательное наложение слоев, содержащих графические объекты, описывающие конструкцию модели, и их закраска. Цвет закраски каналов-имитаторов определялся в зависимости от заданных минимального и максимального значений концентрации

трассера в соответствии со стандартной шкалой `colormap('jet')` в Matlab. Результат выполнения такой процедуры приведен на рис. 7.

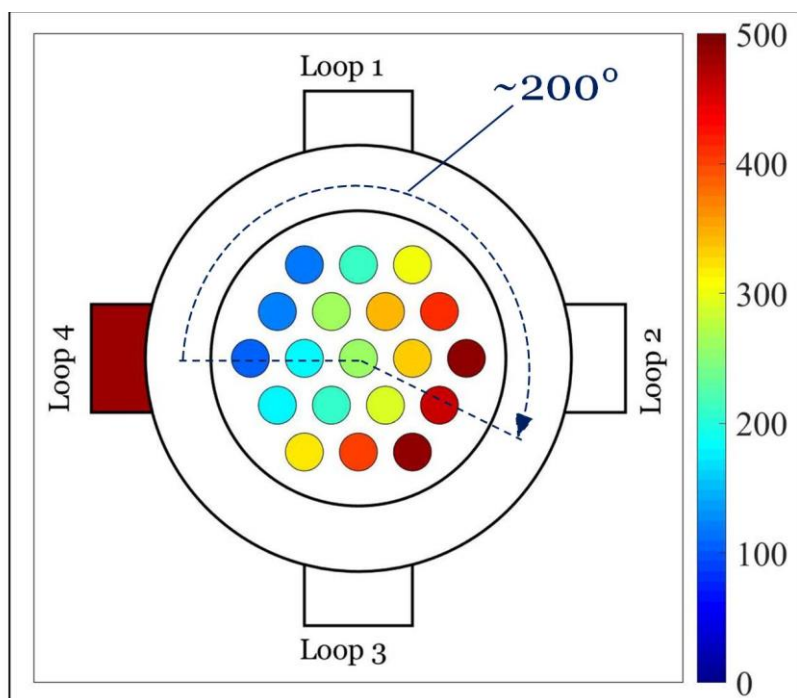


Рис. 7. Визуализация поля концентрации трассера на входе в каналы-имитаторы активной зоны.

Анализ рис. 7 позволил определить, что максимум концентрации трассера на входе в каналы-имитаторы повернут на угол $\sim 190-200^\circ$ от патрубка подачи. По сравнению с распределением трассера в опускном канале, в нижней напорной камере поток совершил дополнительную закрутку на угол $\sim 60-70^\circ$. При этом максимум концентрации остается в периферийных каналах, что говорит об относительно слабом перемешивании в нижней камере. Поворот пятна трассера может свидетельствовать о наличии крупного осевого вихря.

7. Заключение

Используя метод инъекции пассивной контрастной примеси в одну из четырех петель циркуляции теплоносителя, были получены значения объемной концентрации трассера в отдельных точках модели напорной камеры водо-водяного реактора.

Полученные в ходе обработки данных и визуализации поля концентрации трассера в характерных областях экспериментальной модели позволили провести анализ особенностей движения и перемешивания петлевых потоков теплоносителя. Количественные значения концентрации могут быть использованы при валидации расчетов в программах вычислительной гидродинамики и калибровки их математических моделей.

Разработанная методика визуализации экспериментальных результатов, полученных на стенде, была реализована в программном комплексе Matlab и скомпилирована в отдельное графическое приложение «ИЯЭиТФ-ФТ45» для Windows [18].

В дальнейшем, после модернизации экспериментальной модели и включения ее в состав масштабного теплофизического стенда «Стенд исследования смешения неизотермических потоков» НГТУ им. Р.Е. Алексеева, разработанное приложение будет использовано для визуализации и анализа температурного поля теплоносителя. Это позволит в значительной степени сократить время обработки и анализа получаемой информации за счет ее наглядного представления в автоматизированном режиме.

Благодарность

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-19-00473)

Список литературы

1. Farkas I., Hutly E., Farkas T., Takacs A., Guba A., Toth I. Validation of computational fluid dynamics calculation using Rossendorf coolant mixing model flow measurements in primary loop of coolant in a pressurized water reactor model // Nuclear engineering and technology, №48, 2016, P. 941–951. doi: 10.1016/j.net.2016.02.017.
2. Bucalossi, A., Moretti, F., Melideo, D., Del Nevo, A., D'Auria, F., Hohn, T., Lisenkov, E. and Gallori, D. (2011) Experimental Investigation of In-Vessel Mixing Phenomena in a VVER-1000 Scaled Test Facility during Unsteady Asymmetric Transients. Nuclear Engineering and Design, 241, 3068-3075. doi: 10.1016/j.nucengdes.2011.05.005
3. Qingqing Feng, Ulrich Bieder, Thomas Höhne, Analysis of Buoyancy-Driven Flow in the Rocom Test Facility, Energy Procedia, Volume 127, 2017, Pages 44-53, doi: 10.1016/j.egypro.2017.08.062.
4. M. Boumaza, F. Moretti, R. Dizene, Numerical simulation of flow and mixing in ROCOM facility using uniform and non-uniform inlet flow velocity profiles, Nuclear Engineering and Design, Volume 280, 2014, Pages 362-371, doi: 10.1016/j.nucengdes.2014.10.018.
5. Xing Li, Peiyao Qi, Tingjie Zhao, Shouxu Qiao, Sichao Tan, LIF study of temporal and spatial fluid mixing in an annular downcomer, Annals of Nuclear Energy, Volume 126, 2019, Pages 220-232, doi: 10.1016/j.anucene.2018.11.006.
6. Rohde U., Kliem S., Hohn T., Karlsson R., Hemstrom B., Lillington J., Topipila T., Elter J., Bezrukov Y. Fluid mixing and flow distribution in the reactor circuit, measurement data base // Nuclear Engineering and Design, №235, 2005, P.421-443. doi: 10.1016/j.nucengdes.2004.08.045.
7. S. Kliem, A. Grahn, Y. Bilodid, T. Höhne, A realistic approach for the assessment of the consequences of heterogeneous boron dilution events in pressurized water reactors, Nuclear Engineering and Design, Volume 349, 2019, Pages 150-161, doi: 10.1016/j.nucengdes.2019.04.038.
8. Yu Weng, Haitao Wang, Benan Cai, Hongfang Gu, Haijun Wang, Flow mixing and heat transfer in nuclear reactor vessel with direct vessel injection, Applied Thermal Engineering, Volume 125, 2017, Pages 617-632, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2017.07.040.
9. Dmitriev S.M., Dobrov A.A., Doronkov D.V., Pronin A.N., Solntsev D.N., Sorokin V.D., Khrobostov, A.E. The study of hydrodynamic processes of a coolant flow in FA-KVADRAT PWR with various mixing spacer grids // Thermophysics and Aeromechanics, Volume 25, Issue 5, 2018, P. 695-703. DOI: 10.1134/S0869864318050062.
10. Dmitriev S.M., Varentsov A.V., Dobrov A.A., Doronkov D.V., Pronin A.N., Sorokin V.D., Khrobostov A.E. Computational and Experimental Investigations of the Coolant Flow in the Cassette Fissile Core of a KLT-40S Reactor // Journal of Engineering Physics and Thermophysics Volume 90, Issue 4, 2017, P. 941-950. DOI: 10.1007/s10891-017-1641-7.
11. Dmitriev S.M., Dobrov A.A., Pronin A.N., Ryazanov A.V., Solntsev D.N. Calculation and experimental studies of coolant hydrodynamics in the inlet region of fuel assembly // Journal of Physics: Conference Series, Volume 1128, Issue 1, 2018, paper № 012125. DOI: 10.1088/1742-6596/1128/1/012125.
12. Dmitriev S.M., Khrobostov A.E., Legchanov M.A., Dobrov A.A. Experimental studies and numerical simulation of coolant hydrodynamics in the inlet area of nuclear reactor fuel assembly // MATEC Web of Conferences, Volume 245, 2018, paper № 09017. DOI: 10.1051/mateconf/201824509017.
13. Barinov A.A., Dmitriev S.M., Dobrov A.A., Doronkov D.V., Khrobostov A.E., Pronin A.N., Ryazanov A.V., Solntsev D.N., Zorina O.S. Description of the experimental studies of

- coolant mixing flows in the reactor pressure vessel // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – №1128 012028, doi :10.1088/1742-6596/1128/1/012028.
14. Дмитриев С.М., Варенцов А.В., Добров А.А., Доронков Д.В., Легчанов М.А., Хробостов А.Е. Исследование массообмена теплоносителя за перемешивающими решетками ТВС реакторов ВБЭР-300 с целью обоснования их эффективности // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева, №5 (102), 2013, С. 197-205.
 15. Дмитриев С.М., Легчанов М.А., Хробостов А.Е., Варенцов А.В., Доронков Д.В., Добров А.А. Исследования локальной гидродинамики и межъячеечного массообмена потока теплоносителя в районе направляющих каналов тепловыделяющих сборок реакторов PWR // Промышленная энергетика, №12, 2013, С.45-50.
 16. Дмитриев С.М., Баринов А.А., Добров А.А., Доронков Д.В., Пронин А.Н., Рязанов А.В., Солнцев Д.Н., Сорокин В.Д., Хробостов А.Е. Экспериментальные исследования процессов турбулентного смешения в основном оборудовании ЯЭУ // Вопросы атомной науки и техники. Серия: ядерно-реакторные константы, №3, 2018, С.120-126.
 17. Дельнов В.Н., Левченко Ю.И., Шепелев С.Ф. Метод суперпозиции при моделировании температурного поля в теплообменных устройствах полем концентрации трасера // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика, №3, 2009, С. 152-160.
 18. Добров А.А., Хробостов А.Е., Солнцев Д.Н., Пронин А.Н., Рязанов А.В., Ершова М.И. ИЯЭиТФ-ФТ45 // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU2018617341, дата публикации 22.06.2018.

Visualization of coolant flow in the model of a nuclear reactor pressure vessel

A.A. Dobrov¹, D.V. Doronkov², A.V. Ryazanov³, A.E. Khrobostov⁴

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

¹ ORCID: 0000-0001-7363-8791, dobrov@nntu.ru

² ORCID: 0000-0003-0668-4215, nevidooo@mail.ru

³ ORCID: 0000-0002-4951-8930, a_v_ryazanov@rambler.ru

⁴ ORCID: 0000-0002-6349-2861, khrobostov@nntu.ru

Abstract

The article is devoted to visualization of the results of experimental work aimed at studying the turbulent flow of the coolant in the model of the lower chamber of a nuclear reactor. Using the method of tracer injection into one of the four loops of coolant circulation, we studied the mixing process of coolant flow in the lower chamber of the reactor. Based on the experiment, the values of the tracer volume fraction at individual points of the model are obtained. To visualize the results, the Matlab software package was used. Obtained during the processing of the experimental data, the tracer volume fraction fields in the characteristic areas of the lower chamber model made it possible to analyze the features of the motion and mixing of the loop coolant flows. The effect of swirling the coolant flow in the lower channel and in the lower pressure chamber of the model was experimentally obtained and visualized.

Keywords: mixing, tracer method, nuclear reactor.

References

1. Farkas I., Hutly E., Farkas T., Takaxs A., Guba A., Toth I. Validation of computational fluid dynamics calculation using Rossendorf coolant mixing model flow measurements in primary loop of coolant in a pressurized water reactor model // Nuclear engineering and technology, №48, 2016, P. 941–951. doi: 10.1016/j.net.2016.02.017.
2. Bucalossi, A., Moretti, F., Melideo, D., Del Nevo, A., D'Auria, F., Hohnr, T., Lisenkov, E. and Gallori, D. (2011) Experimental Investigation of In-Vessel Mixing Phenomena in a VVER-1000 Scaled Test Facility during Unsteady Asymmetric Transients. Nuclear Engineering and Design, 241, 3068-3075. doi: 10.1016/j.nucengdes.2011.05.005
3. Qingqing Feng, Ulrich Bieder, Thomas Höhne, Analysis of Buoyancy-Driven Flow in the Rocom Test Facility, Energy Procedia, Volume 127, 2017, Pages 44-53, doi: 10.1016/j.egypro.2017.08.062.
4. M. Boumaza, F. Moretti, R. Dizene, Numerical simulation of flow and mixing in ROCOM facility using uniform and non-uniform inlet flow velocity profiles, Nuclear Engineering and Design, Volume 280, 2014, Pages 362-371, doi: 10.1016/j.nucengdes.2014.10.018.
5. Xing Li, Peiyao Qi, Tingjie Zhao, Shouxu Qiao, Sichao Tan, LIF study of temporal and spatial fluid mixing in an annular downcomer, Annals of Nuclear Energy, Volume 126, 2019, Pages 220-232, doi: 10.1016/j.anucene.2018.11.006.
6. Rohde U., Kliem S., Hohne T., Karlsson R., Hemstrom B., Lillington J., Topipila T., Elter J., Bezrukov Y. Fluid mixing and flow distribution in the reactor circuit, measurement data base // Nuclear Engineering and Design, №235, 2005, P.421-443. doi: 10.1016/j.nucengdes.2004.08.045.
7. S. Kliem, A. Grahn, Y. Bilodid, T. Höhne, A realistic approach for the assessment of the consequences of heterogeneous boron dilution events in pressurized water reactors, Nu-

- clear Engineering and Design, Volume 349, 2019, Pages 150-161, doi: 10.1016/j.nucengdes.2019.04.038.
8. Yu Weng, Haitao Wang, Benan Cai, Hongfang Gu, Haijun Wang, Flow mixing and heat transfer in nuclear reactor vessel with direct vessel injection, Applied Thermal Engineering, Volume 125, 2017, Pages 617-632, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2017.07.040.
 9. Dmitriev S.M., Dobrov A.A., Doronkov D.V., Pronin A.N., Solntsev D.N., Sorokin V.D., Khrobostov, A.E. The study of hydrodynamic processes of a coolant flow in FA-KVADRAT PWR with various mixing spacer grids // Thermophysics and Aeromechanics, Volume 25, Issue 5, 2018, P. 695-703. DOI: 10.1134/S0869864318050062.
 10. Dmitriev S.M., Varentsov A.V., Dobrov A.A., Doronkov D.V., Pronin A.N., Sorokin V.D., Khrobostov A.E. Computational and Experimental Investigations of the Coolant Flow in the Cassette Fissile Core of a KLT-40S Reactor // Journal of Engineering Physics and Thermophysics Volume 90, Issue 4, 2017, P. 941-950. DOI: 10.1007/s10891-017-1641-7.
 11. Dmitriev S.M., Dobrov A.A., Pronin A.N., Ryazanov A.V., Solntsev D.N. Calculation and experimental studies of coolant hydrodynamics in the inlet region of fuel assembly // Journal of Physics: Conference Series, Volume 1128, Issue 1, 2018, paper № 012125. DOI: 10.1088/1742-6596/1128/1/012125.
 12. Dmitriev S.M., Khrobostov A.E., Legchanov M.A., Dobrov A.A. Experimental studies and numerical simulation of coolant hydrodynamics in the inlet area of nuclear reactor fuel assembly // MATEC Web of Conferences, Volume 245, 2018, paper № 09017. DOI: 10.1051/mateconf/201824509017.
 13. Barinov A.A., Dmitriev S.M., Dobrov A.A., Doronkov D.V., Khrobostov A.E., Pronin A.N., Ryazanov A.V., Solntsev D.N., Zorina O.S. Description of the experimental studies of coolant mixing flows in the reactor pressure vessel // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – №1128 012028, doi :10.1088/1742-6596/1128/1/012028.
 14. Dmitriev S.M., Varentsov A.V., Dobrov A.A., Doronkov D.V., Legchanov M.A., Khrobostov A.E. Study of coolant mass transfer behind the VBER-300 FA mixing grids in order to substantiate their effectiveness [in Russian]// Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev, №5(102), 2013, P.197-205.
 15. Dmitriev S.M., Legchanov M.A., Khrobostov A.E., Varentsov A.V., Dobrov A.A. Studies of local hydrodynamics and intercell mass transfer of the coolant flow in the area of guide channels of fuel assemblies of PWR reactors [in Russian] // Promyshlennaya Energetika, №12, 2013, P.45-50.
 16. Dmitriev S.M., Barinov A.A., Dobrov A.A., Doronkov D.V., Pronin A.N., Ryazanov A.V., Solntsev D.N., Sorokin V.D. Experimental studies of turbulent mixing processes in the main equipment of the nuclear power plant [in Russian] // Problems of atomic science and technology. Series: Nuclear and Reactor Constants, №3, 2018, P.120-126.
 17. Delnov V.N., Levchenko Yu.I., Shepelev S.F. Superposition method for modeling the temperature field in heat exchange devices by the tracer concentration field [in Russian] // Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika, №3, 2009, P. 152-160.
 18. Dobrov A.A., Khrobostov A.E., Solntsev D.N., Pronin A.N., Ryazanov A.V., Ershova M.I. IYaEiTF-FT45 // The Certificate on State Registration of the Computer Program, RU2018617341, 22.06.2018.