

УДК: 621.039

# Разработка и адаптация вихреразрешающей измерительной системы для проведения верификационных экспериментов на крупномасштабной модели ядерного реактора

Дмитриев С.М.<sup>1</sup>, Хробостов А.Е.<sup>1</sup>, Баринов А.А.<sup>1</sup>, Главный В.Г.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева,  
ул. Минина, 24, г. Нижний Новгород 603950, Россия

<sup>2</sup>Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук,  
пр. Академика Лаврентьева, 1, г. Новосибирск 630090, Россия

Поступила 26.07.2017

Принята к печати 27.08.2017

Последние десятилетия развитие методов прикладных расчетов теплогидравлических процессов, происходящих в ядерном реакторе, ознаменовано бурным ростом вычислительных мощностей суперкомпьютеров (*High Performance Computing, HPC*), способствующих активному внедрению методов вычислительной гидродинамики (английская аббревиатура *CFD*). Использование таких программ для обоснования технико-экономических показателей, в особенности безопасности ядерных реакторов, требует проведения всесторонней верификации математических моделей и самих *CFD*-программ. Целью работы являлась разработка и адаптация измерительной системы, обладающей характеристиками, необходимыми для ее применения в составе верификационного экспериментального стенда. Стенд предназначен для исследования процессов смешения потоков теплоносителя с различными физическими свойствами (например, концентрацией растворенных примесей) внутри крупномасштабной модели реактора. Основным методом, применяемый для регистрации пространственного поля концентрации в области смешения, – метод пространственной кондуктометрии.

В ходе работы создан измерительный комплекс, включающий пространственные кондуктометрические датчики, систему вторичных преобразователей и программное обеспечение. Разработаны методики калибровки и нормировки результатов измерений. В ходе первой серии экспериментов получены осредненные поля концентрации примеси в потоке теплоносителя, нестационарные реализации измеряемой локальной проводимости, проводился их спектральный и статистический анализ.

Проведено сравнение полученных данных с претестовыми *CFD*-расчетами, выполненными в программе *ANSYS CFX*. Совместный анализ полученных результатов позволил выявить основные закономерности исследуемого процесса, продемонстрировать возможности созданной измерительной системы в части получения экспериментальных данных требуемого для верификации «*CFD*-качества».

Проведенная адаптация пространственных датчиков позволяет провести более обширную программу экспериментальных исследований, на основе которой будет создан банк данных и необходимых обобщений. Полученная информация дает возможность ответить на ряд вопросов, связанных с масштабированием результатов *CFD*-расчетов на натурные параметры работы водо-водяных ядерных реакторов.

**Ключевые слова:** измерительная система, пространственная кондуктометрия, ядерный реактор, вычислительная гидродинамика, турбулентные потоки.

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2017-8-3-203-213

**Адрес для переписки:**

Баринов А.А.

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева,

ул. Минина, 24, г. Нижний Новгород 603950, Россия

e-mail: lxbarinov92@mail.ru

**Address for correspondence:**

Barinov A.A.

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev,  
Minin str., 24, Nizhny Novgorod 603950, Russia

e-mail: lxbarinov92@mail.ru

**Для цитирования:**

Дмитриев С.М., Хробостов А.Е., Баринов А.А., Главный В.Г.

Разработка и адаптация вихреразрешающей измерительной системы для проведения верификационных экспериментов на крупномасштабной модели ядерного реактора.

Приборы и методы измерений.

2017. – Т. 8, № 3. С. 203–213.

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2017-8-3-203-213

**For citation:**

Dmitriev S.M., Khrobostov A.E., Barinov A.A., Glavny V.G.

[Development and Adaptation of Vortex Realizable Measurement System for Benchmark Test with Large Scale Model of Nuclear Reactor].

*Devices and Methods of Measurements.*

2017, vol. 8, no. 3, pp. 203–213 (in Russian).

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2017-8-3-203-213

# Development and Adaptation of Vortex Realizable Measurement System for Benchmark Test with Large Scale Model of Nuclear Reactor

Dmitriev S.M.<sup>1</sup>, Khrobostov A.E.<sup>1</sup>, Barinov A.A.<sup>1</sup>, Glavny V.G.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev,  
Minin str., 24, Nizhny Novgorod 603950, Russia

<sup>2</sup>S.S. Kutateladze Institute of Thermophysics, Siberian Division of the Russian Academy of Sciences,  
Akademichan Lavrentiev Ave., 1, Novosibirsk 630090, Russia

Received 26.07.2017

Accepted for publication 27.08.2017

## Abstract

The last decades development of applied calculation methods of nuclear reactor thermal and hydraulic processes are marked by the rapid growth of the High Performance Computing (HPC), which contribute to the active introduction of Computational Fluid Dynamics (CFD). The use of such programs to justify technical and economic parameters and especially the safety of nuclear reactors requires comprehensive verification of mathematical models and CFD programs. The aim of the work was the development and adaptation of a measuring system having the characteristics necessary for its application in the verification test (experimental) facility. It's main objective is to study the processes of coolant flow mixing with different physical properties (for example, the concentration of dissolved impurities) inside a large-scale reactor model. The basic method used for registration of the spatial concentration field in the mixing area is the method of spatial conductometry.

In the course of the work, a measurement complex, including spatial conductometric sensors, a system of secondary converters and software, was created. Methods of calibration and normalization of measurement results are developed. Averaged concentration fields, nonstationary realizations of the measured local conductivity were obtained during the first experimental series, spectral and statistical analysis of the realizations were carried out.

The acquired data are compared with pretest CFD-calculations performed in the ANSYS CFX program. A joint analysis of the obtained results made it possible to identify the main regularities of the process under study, and to demonstrate the capabilities of the designed measuring system to receive the experimental data of the «CFD-quality» required for verification.

The carried out adaptation of spatial sensors allows to conduct a more extensive program of experimental tests, on the basis of which a databank and necessary generalizations will be created. The received information allows to answer a number of questions related to scaling up the results of CFD calculations at the full-scale parameters of pressurized nuclear reactors.

**Keywords:** measuring system, spatial conductometry, nuclear reactor, computational fluid dynamics, turbulent flows.

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2017-8-3-203-213

---

### Адрес для переписки:

Баринов А.А.  
Нижегородский государственный технический  
университет им. Р.Е. Алексеева,  
ул. Минина, 24, г. Нижний Новгород 603950, Россия  
e-mail: lxbarinov92@mail.ru

### Address for correspondence:

Barinov A.A.  
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev,  
Minin str., 24, Nizhny Novgorod 603950, Russia  
e-mail: lxbarinov92@mail.ru

---

### Для цитирования:

Дмитриев С.М., Хробостов А.Е., Баринов А.А., Главный В.Г.  
Разработка и адаптация вихреразрешающей измерительной системы для проведения верификационных экспериментов на крупномасштабной модели ядерного реактора.

Приборы и методы измерений.  
2017. – Т. 8, № 3. С. 203–213.

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2017-8-3-203-213

### For citation:

Dmitriev S.M., Khrobostov A.E., Barinov A.A., Glavny V.G.  
[Development and Adaptation of Vortex Realizable Measurement System for Benchmark Test with Large Scale Model of Nuclear Reactor].

Devices and Methods of Measurements.  
2017, vol. 8, no. 3, pp. 203–213 (in Russian).

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2017-8-3-203-213

## Введение

Последние десятилетия развитие методов прикладных расчетов теплогидравлических процессов, происходящих в ядерном реакторе, ознаменовано бурным ростом вычислительных мощностей суперкомпьютеров (*High Performance Computing, HPC*), способствующих активному внедрению методов вычислительной гидродинамики (английская аббревиатура *CFD*). Использование таких программ для обоснования технико-экономических показателей, а в особенности безопасности ядерных реакторов, требует проведения всесторонней верификации математических моделей и самих *CFD*-программ. Верификационная база для *CFD*-программ основывается на эталонных экспериментах (бенчмарках), дающих возможность получить высококачественные эмпирические данные о протекании моделируемых теплогидравлических процессов [1]. Пригодные для верификации данные должны обладать специфическим «*CFD*-качеством»: высоким пространственно-временным разрешением реализаций измеряемых величин, повышенной точностью измерений, а также учитывать характерные особенности исследуемого класса течений. Такие особенности проведения бенчмарков требуют развития методического обеспечения эксперимента, средств измерений, а также обработки и обобщения экспериментальных данных.

Актуальным вопросом применения *CFD*-программ для обоснования режимов работы ЯЭУ является вопрос масштабирования результатов верификации, выполненной на эталонных экспериментах. Под масштабированием в широком смысле понимается демонстрация методов и границ переносимости результатов *CFD*-расчетов модельных процессов (отличающихся геометрическим масштабом и/или значениями параметров) на натурные условия работы ЯЭУ [1]. Международную практику проведения крупномасштабных верификационных экспериментов составляет ряд исследований прикладного характера (экспериментальные установки *ROCOM*, *Fortum PTS*, *Vattenfall*, *KAERI*, ОКБ ГП и *IRIS*, выполненные в масштабе от 1:5 и до 1:2,56 соответственно [2–7]). Следует отметить, что несмотря на разнообразие целей, методов и

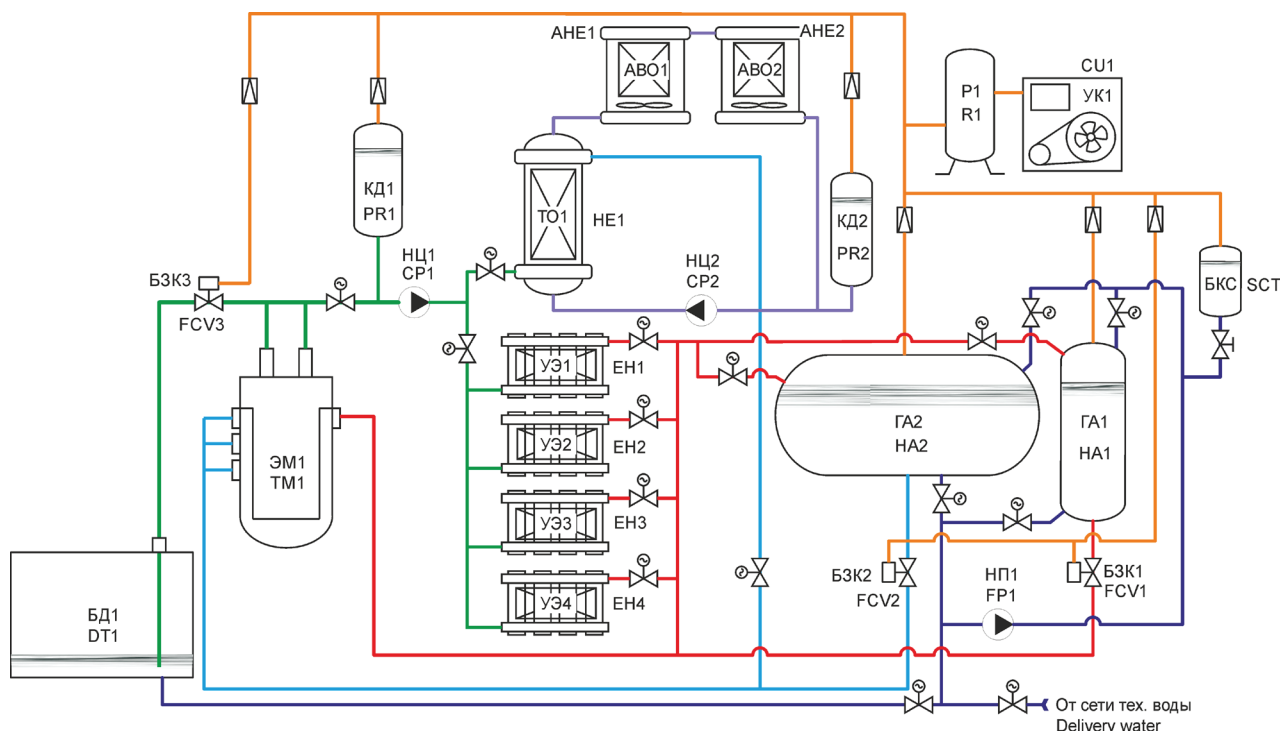
особенностей проведенных экспериментов, планомерное решение задачи масштабирования *CFD*-расчетов не являлось прямой целью ни одной из указанных работ. В ходе перечисленных исследований оказалась не в полной мере раскрыта степень отдельного влияния основных параметров, определяющих процесс течения (вязкости, скорости и гидравлического диаметра потока), на процессы смешения, недостаточно внимания уделено исследованию статистических и спектральных характеристик потока в крупномасштабной области смешения. Задачи верификации расчетов процессов смешения требуют получения динамических полей в широком диапазоне степени смешения исследуемых потоков – от полностью несмешанных до практически гомогенного распределения измеряемых характеристик. Данные аспекты в значительной части также остались за рамками проведенных работ.

Одним из методов измерения локальных характеристик потока, который может применяться для исследований с учетом вышеуказанных особенностей задачи, является метод пространственной кондуктометрии, применявшийся в т.ч. в некоторых из вышеприведенных исследований.

Задачами настоящего этапа исследований являлись разработка и адаптация кондуктометрической измерительной системы, а также апробация ее применения в составе крупномасштабного верификационного стенда с учетом актуальных вопросов моделирования, не раскрытых в ходе предыдущих работ другими коллективами.

## Описание экспериментальной установки

Экспериментальный стенд выполнен по схеме (рисунок 1), позволяющей организовать замкнутые и разомкнутые режимы пролива экспериментальных моделей (ЭМ) ядерных реакторов различной конструкции и размеров. Оборудование стенда позволяет создать различные режимы смешения теплоносителя внутри модели реактора в широком диапазоне температур, расходов и концентраций примеси в потоке теплоносителя. Основные параметры стенда следующие: давление до 2 МПа, температура – до 180 °С, расходы через ЭМ – до 200 м<sup>3</sup>/час, суммарная мощность потребителей стенда – 1 МВт эл., внешний диаметр ЭМ – до 1,5 м.



**Рисунок 1** – Упрощенная схема экспериментального стенда: ЭМ1 – экспериментальная модель; УЭ1-4 – электронагревательные установки; ТО1 – теплообменник 1–2 контуров; АВО1-2 – аппараты воздушного охлаждения; КД1-2 – компенсаторы давления контуров; НЦ1-2 – циркуляционные насосы контуров; НП1 – подпиточный насос 1-го контура; ГА1-2 – гидроаккумуляторы теплоносителя (3 и 10 м<sup>3</sup>); БКС – бак запаса концентрата соли; БД1 – дренажный бак (15 м<sup>3</sup>); БЗК1-3 – быстрозапорные пневмоклапаны; УК1 – компрессорная установка; P1 – ресивер

**Figure 1** – Simplified circuit of the test facility: TM1 – reactor test model; EH1-4 – electrical heating units; HE1 – heat exchanger of primary and secondary circuits; AHE1-2 – air cooled heat exchangers; PR1-2 – pressurizers of the circuits; CP1-2 – circulation pumps of the circuits; FP1 – feed pump of the primary circuit; HA1-2 – hydraulic accumulators; SCT – salt concentrate tank; DT1 – drainage tank (15 m<sup>3</sup>); FCV1-3 – fast check valves; CU1 – compressor unit; R1 – air receiver

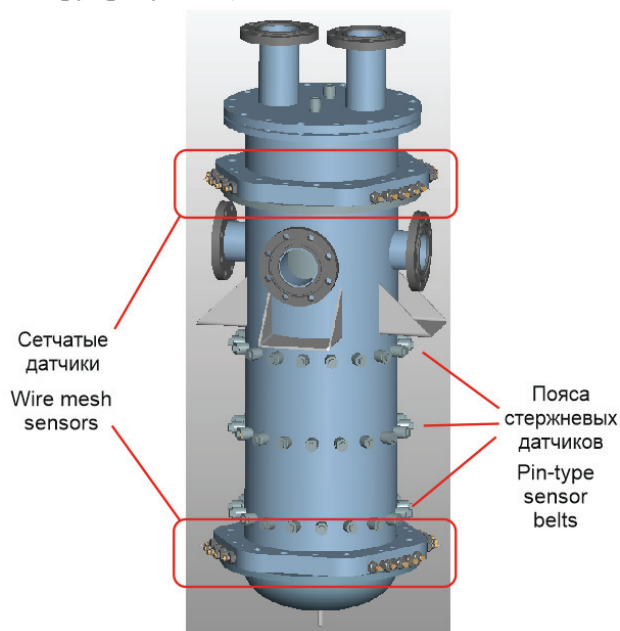
Для проведения исследования смешения потоков в изотермической постановке стенд работает по следующему алгоритму. При подготовке режима теплоноситель разогревается до необходимой температуры эксперимента. Для этого с напора насоса НЦ1 теплоноситель поступает на раздающий коллектор нагревателей УЭ1-4, проходя которые он нагревается и раздается на гидроаккумуляторы ГА1-2. Из них по линиям подачи потоки теплоносителя подаются в модель ЭМ1, где смешиваются и вновь поступают на насос НЦ1. Циркуляция указанным способом происходит до полного прогрева теплоносителя, трубопроводов и оборудования стенда до заданной температуры. В первом контуре стенда создается необходимое избыточное давление, поддерживаемое работой компрессора УК1 в составе системы воздуха высокого давления. При достижении изотермических условий в первом контуре емкость ГА1 отключается от циркуляции на НЦ1, включается подпиточный насос НП1,

запускающий циркуляцию через ГА1 по замкнутому контуру водоподготовки. При помощи ручного клапана на трубопроводе подачи концентрата соли из бака запаса БКС производится дозирование концентрата в контур водоподготовки. Спустя некоторое время емкость ГА1 полностью заполняется равновесной избыточной концентрацией соли, после чего НП1 и НЦ1 выключаются и клапаны трубопроводов переключаются для выхода на старт экспериментального режима. Перед началом пролива БЗК1-2 открыты, БЗК3 закрыт, в ГА1-2 создано избыточное давление воздуха. Теплоноситель в ГА1 и ГА2 находится при одинаковой температуре (равной температуре в первом контуре и ЭМ1) и с различным содержанием соли. Для начала пролива БЗК3 открывается и теплоноситель под действием газовых подушек в ГА1-2 направляется в ЭМ1, где происходит исследуемое смешение, а затем сливается в дренажный бак БД1. Постоянство избыточного давления в ГА1,2 поддерживается работой реду-



торов, установленных на соответствующих пневмолиниях. По окончании пролива (после опорожнения до допустимого уровня ГА1-2) БКЗ1-3 закрываются, а теплоноситель, слитый в БД1, может быть снова направлен на заполнение ГА1-2 при помощи НП1 или сдrenирован. Для достижения необходимой температуры в дальнейшем теплоноситель может как подогреваться в УЭ1-4, так и охлаждаться в ТО1 за счет теплообмена с теплоносителем второго контура. Конечным приемником тепла при этом является атмосферный воздух, охлаждающий трубочки АВО1-2.

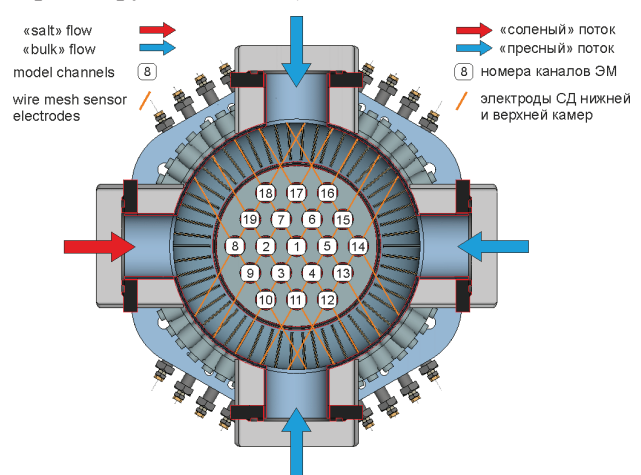
Объектом исследований является экспериментальная модель, обобщенно имитирующая характерные для водо-водяных установок элементы геометрии реактора: коллекторную впускную камеру с радиальным подводом теплоносителя, опускную кольцевую камеру, нижнюю камеру эллиптического днища, подъемные каналы-имитаторы активной зоны, верхнюю сливную камеру (рисунок 2).



**Рисунок 2** – Внешний вид экспериментальной модели с установленными датчиками проводимости  
**Figure 2** – Test model with installed spatial conductometers general view

ЭМ оснащена четырьмя патрубками ввода теплоносителя, по одному из которых подается вода с избыточным содержанием соли («соленый» поток из ГА1), по трем другим – вода с пониженным содержанием соли («пресные» потоки из ГА2). Организуемый «несимметричный» режим схематично представлен на рисунке 3. Эксперименты проводились в предположении гидродинамической «пассивности» регистри-

руемой примеси – т.е. при отсутствии влияния растворенной примеси на плотность и вязкость среды в потоке. Это достигалось за счет применения истинно растворимой (диссоциирующей) соли  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , а также выбором малой разности концентрации примеси в смешиваемых потоках. Таким образом, в изотермической постановке эксперимента исключались силы плавучести, т.к. их влияние на смешение не является предметом исследований в рамках данной работы. Теплоноситель проходит от входных патрубков ЭМ вниз по опускной кольцевой камере, попадает в нижнюю напорную камеру, откуда распределяется по каналам-имитаторам активной зоны с установленными входными дросселями. По окончании подъема в каналах имитаторов теплоноситель выходит в верхнюю сливную камеру и удаляется из модели через два выходных патрубка в ее крышке. Масштаб модели по наружному диаметру опускной кольцевой камеры (по отношению к реактору ВВЭР-1000) составляет 10,8.



**Рисунок 3** – Моделируемый «несимметричный» режим работы реактора

**Figure 3** – «Non-symmetrical» mode of the reactor to be modelled

### Описание разработанной измерительной системы

Адаптация метода пространственной кондуктометрии для проведения теплогидравлических исследований [8] дает возможность получения высококачественных данных о распределении концентрации соли по объему ЭМ. Для этого в ЭМ установлены специальные датчики-кондуктометры стержневого (в опускной кольцевой камере) и сетчатого (в нижней и верхней камерах) типа (рисунок 2–4).



**Рисунок 4** – Сетчатый и стержневой типы пространственных кондуктометрических датчиков

**Figure 4** – Wire-mesh and pin-type conductometric sensors

Для организации высокоскоростной регистрации нестационарного поля проводимости, которое может быть пересчитано в концентрацию соли, использовалась система ЛАД-36 разработки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук. Характеристики разработанной системы приведены в таблице 1. Нормировка полученных значений концентрации (для исключения влияния общих систематических погрешностей и обеспечения сравнимости результатов проливов) производилась в виде:

$$\varphi = \frac{c_{meas} - \overline{c_{min}}}{c_{max} - \overline{c_{min}}},$$

где  $\varphi$  – безразмерный скаляр, характеризующий измеренную концентрацию;  $\overline{c_{min}}$  – концентрация пресного потока (концентрация соли в ГА2);  $c_{max}$  – концентрация соленого потока (концентрация соли в ГА1),  $c_{meas}$  – концентрация соли, измеряемая технологическим кондуктометром или ячейкой пространственного датчика в данный момент времени (мгновенная локальная концентрация).

В отличие от зарубежных аналогов [9], в разработанной системе применен принцип частотного разделения, позволяющий получать физически одновременные данные со всех точек сетчатого датчика, т.е. получать строго «моментальный» снимок мгновенного распределения проводимости в измерительной области датчика.

Таблица 1 / Table 1

**Характеристики измерительной системы**  
**Measurement system capabilities**

| Характеристика системы<br>System Parameter  | Значение<br>Value   |
|---|---|
| Скорость опроса, измерений/ с<br>Acquisition frequency, measurements/ s   | 10 000  |
| Количество одновременно задействованных входов/выходов измерительного сигнала<br>Number of inputs/outputs of the signal under simultaneous operation  | 36 (в любой конфигурации / in any configuration)  |
| Предел верхнего измеряемого значения проводимости (мкСм/см) на датчике с геометрической константой 0,6 см <sup>-1</sup><br>Maximum value of measured conductivity (µS/cm) of the sensor with geometry constant 0,6 cm <sup>-1</sup> | 10 000  |
| Длина соединительных проводов от датчика до системы, м<br>Length of signal wires from the system to the test model, m   | до 12<br>up to 12   |
| Длительность непрерывной регистрации процесса на максимальной частоте при опросе всех каналов<br>Unbreakable duration of the measurement with maximal frequency   | Ограничивается емкостью накопителя информации, на который производится запись (60 с – 9 Гб)<br>Limited by free memory of the hard disk only (60 s – 9 Gb) |

**Результаты экспериментальных и расчетных исследований**

В ходе первой серии экспериментов проведено пять проливов экспериментальной модели для трех режимов, параметры которых сведены в таблицу 2.

Таблица 2 / Table 2

**Проведенные экспериментальные режимы**  
**Tests carried out**

| № п/п  | 1              | 2              | 3              |
|--|----------------|----------------|----------------|
| Наименование режима*<br>Mode designation   | 10/20          | 20/20          | 20/56          |
| Общая подача в модель**, м <sup>3</sup> /ч<br>Common supply through the<br>model, m <sup>3</sup> /hr | 18,9<br>(19,0) | 37,8<br>(37,7) | 18,9<br>(19,1) |
| Температура теплоносителя в<br>ГА1,2, °С<br>Coolant temperature in HA1, 2, °C                        | 20<br>(22)     | 20<br>(20)     | 56<br>(61)     |
| Давление в ГА1, 2, МПа (изб.)<br>Manometer pressure in HA1, 2,<br>MPa                                | 2,5<br>(2,3)   | 2,5<br>(2,2)   | 2,5<br>(2,1)   |
| Солесодержание в ГА1<br>(ГА2), мг/л<br>Salinity in HA1, mg/l   | 444<br>(798)   | 599<br>(1286)  | 433<br>(752)   |
| Количество вводов стенда<br>в работу<br>Number of tests of the same mode                             | 3***           | 1              | 1              |

**Примечания / Comments**

\*для всех режимов число до дроби – значение  $Re$  в опускной камере в тысячах единиц, число после дроби – температура эксперимента, °С

for all modes the number before the fraction is the value of  $Re$  in the downcomer in thousands of units, the number after the fraction is the experiment temperature, °C

\*\*указаны номинальные и фактические (в скобках) значения параметров  
shows the nominal and actual values (in parentheses) of the parameters

\*\*\*включая режимы с изменением ориентации подачи потоков  
including modes with a change in flow orientation supply

Для регистрации реализации поля концентрации примеси в потоке в ходе каждого пролива выбирались отрезки времени со стабильными значениями параметров режима.

Дополнительные проливы для экспериментального режима 10/20 проводились при смене патрубков подачи соленого и пресных потоков с целью выяснения влияния ориентации подачи на динамику поля концентрации. В первом дополнительном эксперименте соленый поток подавался на канал 17 (верхний патрубок на рисунке 3), во втором – на канал 14 (правый патрубок на том же рисунке).

Постановка эксперимента повторялась в *CFD*-расчетах с использованием программы *ANSYS CFX*. В качестве контрастной примеси в расчете использовалась температура потока, при этом для исключения влияния плавучести свойства среды задавались независимыми от температуры.

В качестве характеристик исследуемого процесса смешения при сравнительном анализе принимались:

- средние значения концентрации в измерительных ячейках датчиков,
- максимальное и минимальное значения среди них,
- разность максимального и минимального значений (характеризующая интегральную неравномерность поля),
- максимальное мгновенное зарегистрированное значение солёности,
- дисперсии реализаций измерительных сигналов.

Точечная картина, получаемая при помощи сетчатого датчика на входе в имитатор активной зоны, интерполировалась по измерительной области (рисунок 5), создавалась анимация для наглядного отображения динамики поведения нестационарного поля. Дополнительно с целью демонстрации возможностей применяемого метода измерений строились кросс-корреляционные зависимости между сигналами соответствующих ячеек верхнего и нижнего датчиков (рисунок 6), а также спектральные плотности энергии реализаций сигнала для нижнего сетчатого датчика (рисунок 7). По данным, полученным со стержневых датчиков, строились азимутальные графики распределения концентрации в опускной кольцевой камере (рисунок 8).

Вышеуказанные численные характеристики процесса смешения для исследуемых режимов сведены в таблицу 3. Результаты выполненных на данном этапе экспериментальных и расчетных исследований дают возможность сделать следующие обобщающие выводы:

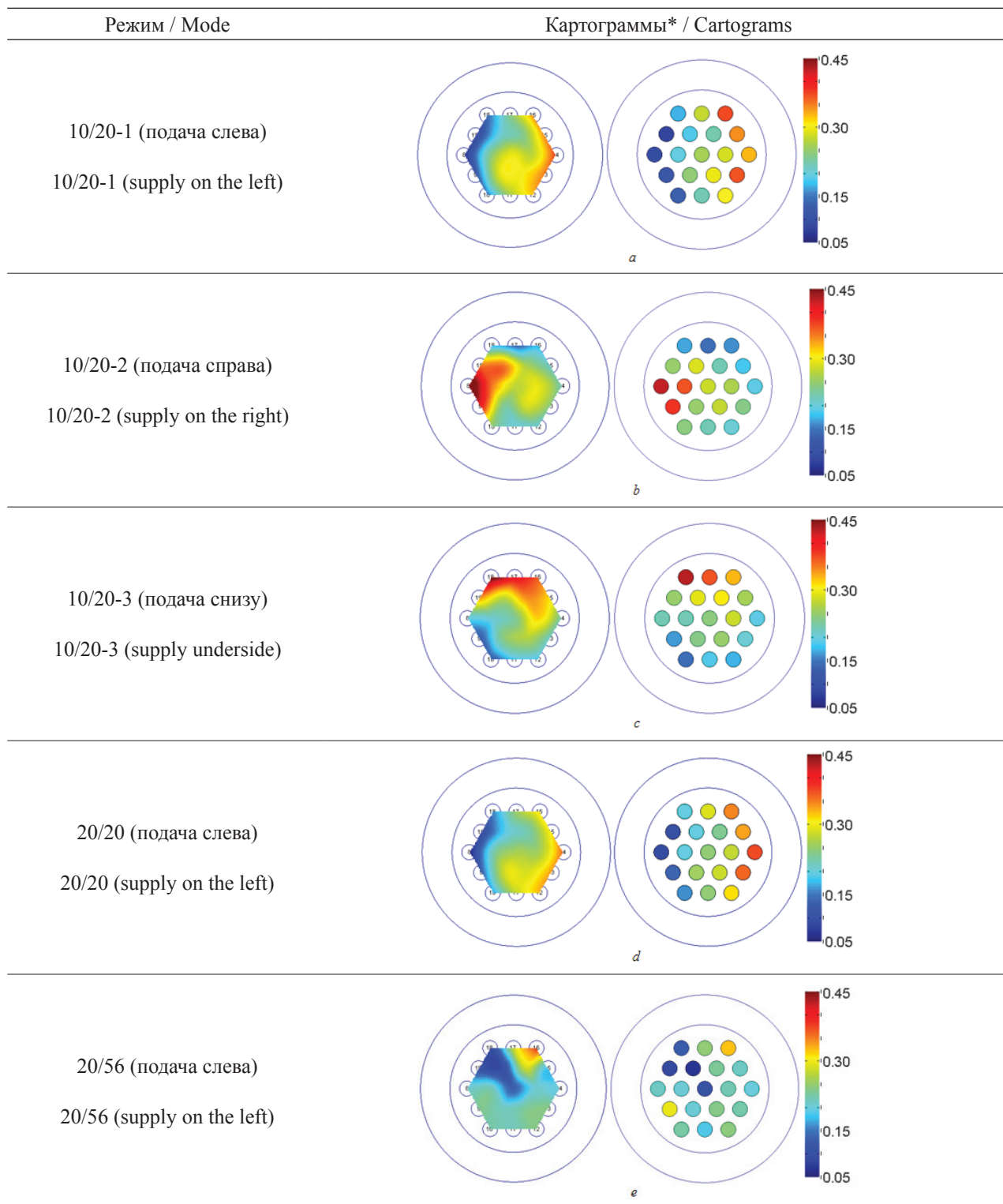
1) Адаптированный метод пространственной кондуктометрии позволяет провести измерения нестационарного пространственного поля концентрации соли при различных температурах среды и режимах течения теплоносителя в экспериментальной модели. Значение восстанавливаемых частот измерительного сигнала (до 4 кГц) перекрывает диапазон частот исследуемых процессов смешения и позволяет построить спектральные характеристики реализаций. Пространственное разрешение получаемых данных достаточно для построения интерполяционных картограмм распределения концентрации.

2) Продолжительная непрерывная регистрация процесса позволяет построить анимационные и осредненные поля концентрации в области смешения. Анализ полученных распределений говорит о наличии закрутки потока внутри ЭМ на угол около 180°. Расчетное значение угла за-



крутки – более  $180^\circ$ , причем направление закрутки потока, полученное в расчете (против часовой стрелки при взгляде сверху), противоположно установленному экспериментально. Результаты

дополнительных проливов для режима 10/10 (с различной ориентацией подачи соленого потока) говорят о качественно одинаковом характере процесса смешения (см. картограммы рисунка 5).



**Рисунок 5** – Картограммы экспериментальных распределений концентрации примеси

\* Цветовая шкала соответствует относительным значениям измеренной локальной концентрации

**Figure 5** – Cartograms of experimental distributions of concentration of impurities

\* Colorbar corresponds to the normalized value of measured concentration



Таблица 3 / Table 3

**Сравнение характерных параметров процесса в эксперименте и расчете (эксперимент / расчет [отклонение])**

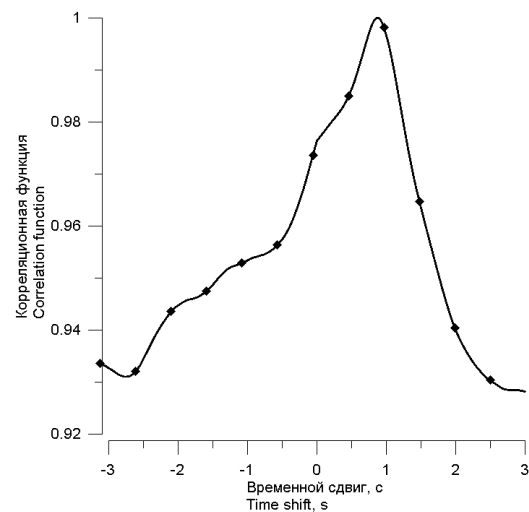
**Comparison of characteristic parameters of the process in the experiment and calculation (experiment / calculation [deviation])**

| Режим / Mode   | 10/20                                    | 20/20                                   | 20/56                                     |
|--|--|---|---|
| Макс. значение усредненной концентрации (%) и соотв. канал<br>The max. value of the average concentration (%) and the appropriate channel  | 37,0(16)/<br>45,2(16)<br>[8,2]           | 37,2(14)/<br>44,4(16)<br>[7,2]          | 32,3(16)/<br>42,6(16)<br>[10,3]           |
| Мин. значение усредненной концентрации (%) и соотв. канал ЭМ<br>The min. value of the average concentration (%) and the appropriate channel of the EM  | 7,9(19)/<br>9,3(10)<br>[1,4]             | 9,2(8)/<br>10,3(10)<br>[1,1]            | 6,9(7)/<br>11,8(10)<br>[4,9]              |
| Неравномерность интегральная, %<br>Integral unevenness, %  | 29,1/<br>35,9<br>[6,8]                   | 28,0/<br>34,1 [6,1]                     | 25,4/<br>30,8<br>[5,4]                    |
| Макс. мгновенное значение концентрации (%) и соотв. канал ЭМ<br>The max. instantaneous concentration (%) and the appropriate channel of the EM   | 53,6(16)/<br>64,1(16)<br>[10,5]          | 53,2(16)/<br>65,2(15)<br>[12,0]         | 54,9(16)/<br>65,9(16)<br>[11,0]           |
| Среднеквадратическое отклонение реализации безразмерной концентрации по каналам с макс. (мин.) осредненным значением, %<br>Root-mean-square deviation of realization of dimensionless concentration in channels with the max. (min.) averaged value, % | 8,5(2,9)/<br>7,9(5,7)<br>[-0,6<br>(2,8)] | 6,6(3,4)/<br>8,0(5,6)<br>[1,4<br>(2,2)] | 8,8(7,1)/<br>8,5(6,6)<br>[-0,3<br>(-0,5)] |
| Среднее время транспорта по корреляции показаний СД верх-низ измер. (расч.), сек<br>The average transport time for the correlation of the readings of the wire-mesh sensors in the top-bottom measurement. (calculated), s                             | 1,74<br>(1,63)<br>[-0,11]                | 0,88<br>(0,82)<br>[-0,6]                | 1,59<br>(1,62)<br>[0,3]                   |

3) На основе вышесказанного прямое сравнение (наложение) осредненных полей для расчета и эксперимента не представляется возможным. Поэтому в качестве критериев для сравнения были выбраны значения максимальной, минимальной мгновенной и осредненной концентраций, а также значения разброса, оцененные по

среднеквадратичному отклонению ( $\sigma$ ) реализации. Согласно данным, приведенным в таблице 3, максимальные (минимальные) осредненные значения отличаются не более чем на 10,3 % (4,9 %), при этом для всех режимов расчет завышает оба значения. Средний уровень интегральной неравномерности находится в пределах 25–36 %, при этом расчетные значения неравномерности также больше экспериментальных. Значения  $\sigma$ , оцененные по реализациям, хорошо согласуются с расчетом (отклонения в пределах 3 %).

4) Совместный корреляционный анализ сигналов верхнего и нижнего сетчатого датчиков позволил оценить время транспорта теплоносителя между плоскостями их размещения. Оценочный гидравлический расчет течения в каналах ЭМ для режима 20/20 дает значение времени 0,84 с, в то время как средняя абсцисса максимума функции корреляции равна 0,88 с. Это свидетельствует о возможностях метода пространственной кондуктометрии в части определения скорости потока, что может использоваться в дальнейшем для частичного восстановления поля скорости в потоке.

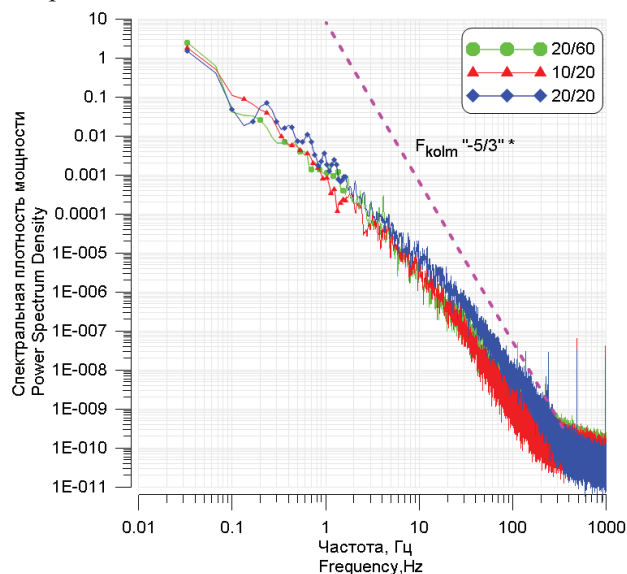


**Рисунок 6** – Пример кросс-корреляционной зависимости реализаций нижнего и верхнего СД (14-й канал, режим 20/20)

**Figure 6** – An example of the cross-correlation dependence of the realizations of the lower and upper wire-mesh sensors (channel 14, mode 20/20)

5) Спектральный анализ сигналов датчиков позволяет оценить диапазон частот основных энергонесущих вихрей и интенсивность каскадного процесса распада вихревых структур. Согласно рисунку 7 характерные частоты крупных вихрей находятся в диапазоне 0–1 Гц. Поскольку все режимы течения являются развитыми турбулентными, к ним может быть применена оценка постоянного значения числа Струхала:  $Sh \approx 0,2$ . В этом

случае, используя в качестве характерного размера ширину кольцевой камеры модели (0,0635 м), можно оценить характерные частоты основных вихрей: 0,26, 0,52, и 0,25 Гц соответственно, что дает хорошее согласие по порядку величины с экспериментом. Нанесенные на графики наклоны, соответствующие эмпирическому «закону Колмогорова  $-5/3$ », позволяют выделить область наибольшего соответствия наклона графика спектральной плотности мощности: 20–120 Гц. При этом расчетный спектр плотности мощности показывает поведение близкое с экспериментальным спектром в области низких частот (около характерных), в то время как далее расчетная кривая спадает гораздо интенсивнее. График расчетной спектральной плотности мощности выходит на плато уже в районе десятков герц, что, возможно, обусловлено фильтрацией нестационарного решения на расчетной сетке. В целом можно заключить, что спектральный анализ реализаций расчета и эксперимента требует более внимательного анализа, рассмотрения более длительных реализаций сигнала и дополнительных тестов на потоках с одинаковой соленостью при различных скоростях течения.

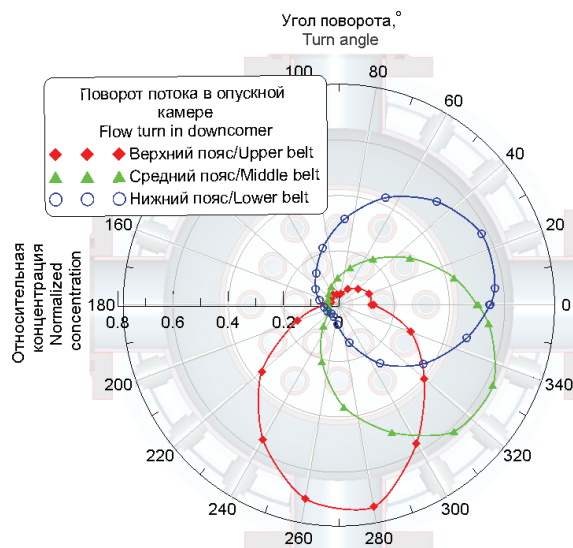


**Рисунок 7** – Пример графиков спектральной плотности мощности реализации измерительного сигнала (16-й канал, все режимы)

\*  $F_{kolm} \ll -5/3$  – характерный наклон каскадного процесса передачи энергии при распаде турбулентных вихрей («закон Колмогорова»)

**Figure 7** – An example of the power spectral density graph of the measuring signal realization (channel 16, all modes)

\*  $F_{kolm} \ll -5/3$  – characteristic slope of the cascade energy transition due to the turbulent vortex decay («Kolmogorov's law»)



**Рисунок 8** – Пример азимутального графика распределения концентрации в кольцевой камере экспериментальной модели

**Figure 8** – An example of the azimuthal distribution schedule of the concentration in the annular chamber of the experimental model

## Заключение

Проведенный совместный анализ полученных результатов позволил выявить основные закономерности исследуемого процесса, продемонстрировать возможности созданной измерительной системы в части получения экспериментальных данных требуемого для верификации «CFD-качества».

Проведенная адаптация пространственных датчиков позволяет провести более обширную программу экспериментальных исследований, на основе которой будет создан банк данных и необходимых обобщений. Полученная информация дает возможность ответить на ряд вопросов, связанных с масштабированием результатов CFD-расчетов на натурные параметры работы водо-водяных ядерных реакторов.

## Список использованных источников

1. Review of Uncertainty Methods for Computational Fluid Dynamics Application to Nuclear Reactor Thermal Hydraulics // OECD, NEA. – 2016. – 132 с.
2. Rohde, U. Fluid mixing and flow distribution in the reactor circuit, measurement data base / U. Rohde [et al.] // Nuclear Engineering and Design. – Vol. 235. – 2005.
3. Farkas, 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 / I. Farkas, E. Hutly, T. Farkas, A. Takaxs, A. Guba, I. Toth // Nuclear engineering and technology. – 2016. – Vol. 48. – P. 941–951. doi: 10.1016/j.net.2016.02.017

4. Kim, K. Mixing behaviors in a downcomer and core inlet / K. Kim, D.J. Euh, T.S. Kwon, E. Schleicher // Proceedings of Specialists Workshop on Advanced instrumentation and Measurement Techniques for Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (SWINTH-2016). – 2016. – paper #016, pp. 1–14.

5. Kim, K. Experimental study of the APR+ reactor core flow and pressure distributions under 4-pump running conditions / K. Kim, D.J. Euh, I.C. Chu, Y.J. Youn, H.S. Choi, T.S. Kwon // Nuclear Engineering and Design. – 2013. – Vol. 265. – P. 957–966. doi: 10.1016/j.nucengdes.2013.07.021

6. Forgone, N. Downcomer and lower plenum experimental facility / N. Forgone, V. Baudanza, I. Angelo, D. Martelli // Report RdS, ENEA, UNIPI. – 2011.

7. Волков, В.Ю. Верификация CFD модели реактора по результатам испытания системы быстрого ввода бора / В.Ю. Волков [и др.] // Материалы 10-й МНТК «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». – Подольск, 2017.

8. Дмитриев, С.М. Особенности применения пространственных кондуктометрических датчиков при моделировании смешения потоков теплоносителя в элементах оборудования ядерных энергетических установок / С.М. Дмитриев, А.Е. Хробостов, А.А. Баринов, В.Г. Главный // Приборы и методы измерений. – 2016. – Т. 7. – № 3. – С. 247–255.

9. daSilva, M.J. High speed multichannel impedance measuring system / M.J. daSilva, N.S. Eduardo, T.P. Vendruscolo // Acta IMEKO. – 2012. – Vol. 1. – P. 36–41.

10. Будников, А.В. Проблемы масштабирования CFD программ к описанию процессов смешения в реакторных установках / А.В. Будников [и др.] // Сборник трудов НТС «Проблемы верификации и применения CFD-кодов в атомной энергетике». – Н. Новгород, 2016.

## References

1. Review of Uncertainty Methods for Computational Fluid Dynamics Application to Nuclear Reactor Thermal Hydraulics. *OECD, NEA*, 2016, 132 c.

2. 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*, 2005, vol. 235, pp. 421–443.

doi: 10.1016/j.nucengdes.2004.08.045

3. 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*, 2016, vol.48, pp. 941–951. doi: 10.1016/j.net.2016.02.017

4. Kim K., Euh D.J., Kwon T.S. Schleicher E. Mixing behaviors in a downcomer and core inlet. *Proceedings of Specialists Workshop on Advanced instrumentation and Measurement Techniques for Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (SWINTH-2016)*, 2016, paper #016, pp. 1–14.

5. Kim K., Euh D.J., Chu I.C., Youn Y.J., Choi H.S., Kwon T.S. Experimental study of the APR+ reactor core flow and pressure distributions under 4-pump running conditions. *Nuclear Engineering and Design*, 2013, vol. 265, pp. 957–966. doi: 10.1016/j.nucengdes.2013.07.021

6. Forgone N., Baudanza V., Angelo I., Martelli D. Downcomer and lower plenum experimental facility. *Report RdS, ENEA, UNIPI*, 2011.

7. Volkov V. Golibrodo L., Krutikov A. Kudryavtsev O., Nadinsky U., Skibin A. [Verification of CFD reactor model on the fast borated water injection system test results]. *Materialy 10-j MNTK «Obespechenie bezopasnosti AJeS s VVER», OKB «GIDROPRESS»* [Proceedings of the 10th international conference «NPP with VVER safety assurance» JSC OKB Hidropress], 2017 (in Russian).

8. Dmitriev S.M., Khrobostov A.E., Barinov A.A., Glavny V.G. [Application features of spatial conductometry sensors in modelling of coolant flow mixing in nuclear power unit equipment]. *Devices and Methods of Measurements*, 2016, vol. 7, no. 3, pp. 247–255 (in Russian).

9. daSilva M.J., Eduardo N.S., Vendruscolo T.P. High speed multichannel impedance measuring system. *Acta IMEKO*, 2012, vol. 1, pp. 36–41.

10. Budnikov A.V., Sveshnikov D.N., Romanov R.I. [Problems of CFD-program scaling for mixing processes description in nuclear power units]. *Materialy konferencii «Problemy verifikacii i primeneniya CFD-kodov v atomnoy energetike»* [Problems of CFD-codes verification and application in atomic energy], 2016 (in Russian).