

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ПЕТЛЕВЫХ ПОТОКОВ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ОПУСКНОЙ КАМЕРЕ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА¹

© 2021 г. С. М. Дмитриев^а, А. Е. Хробостов^а, М. А. Легчанов^а, А. А. Добров^а, А. В. Рязанов^а *, Д. В. Доронков^а, А. Н. Пронин^а, Д. Н. Солнцев^а, А. А. Баринов^а, А. В. Герасимов^а

^аНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, ул. Минина, д. 24, г. Нижний Новгород, 603950 Россия

*e-mail: a_v_ryazanov@rambler.ru

Поступила в редакцию 08.08.2019 г.

После доработки 18.06.2020 г.

Принята к публикации 24.06.2020 г.

Данная работа посвящена экспериментальным исследованиям гидродинамики потока теплоносителя во внутрикорпусном напорном тракте водо-водяного ядерного реактора. В статье описываются экспериментальный стенд и исследуемая модель ядерного реактора, изложена методика измерений, приводятся режимные параметры, при которых проводились исследования, и полученные результаты. В представленной экспериментальной работе моделировалось явление перемешивания петлевых потоков теплоносителя внутри модели опускной камеры ядерного реактора. Исследование выполнялось на высоконапорном аэродинамическом стенде НГТУ им. Р.Е. Алексеева. Масштабная модель ядерного реактора обладала конструктивными элементами, характерными для петлевых реакторных установок (опускной кольцевой тракт, нижняя напорная камера). Экспериментальные исследования были проведены в диапазоне чисел Рейнольдса от 20 000 до 50 000, определенных в кольцевом зазоре опускной части модели. Поле осевых скоростей на входе в имитатор активной зоны модели реактора исследовалось с помощью пневмометрического зонда. Регистрация температурного поля осуществлялась в эксперименте методом диффузии примеси, т.е. введением в одну из петель модели контрастного трассера. По концентрации примеси (трассера) на входе в имитатор активной зоны оценивалась степень перемешивания потоков. В качестве контрастной примеси применялся пропан. В процессе исследований было определено пространственное распределение трассера в потоке теплоносителя в опускном кольцевом канале, а также в нижней напорной камере. Данные по распределению контрастной примеси представлены в виде картограмм. Проведен анализ результатов закрутки потока теплоносителя во внутрикорпусном напорном тракте. Показано, что в нижней напорной камере на интенсивность перемешивания влияние оказывает центральный вихрь с центральной осью. Выполнена оценка параметров перемешивания примеси в модели внутриреакторного напорного тракта.

Ключевые слова: гидродинамика потока, перемешивание потоков, ядерный реактор, теплоноситель, метод непосредственного отбора проб, трассер

DOI: 10.1134/S0040363621030012

Для строительства новых атомных ледоколов с высокими ходовыми характеристиками необходима разработка перспективных энергонапряженных ядерных реакторов. Конструкция реакторной установки перспективного ледокола при нормальной эксплуатации предусматривает режимы с отключением части теплообменной поверхности парогенераторов, что может привести к возникновению процессов смещения потоков теплоносителя с различными температурами и

физическими свойствами. При консервативном подходе к обоснованию безопасности перемешивание потоков теплоносителя в камере реактора не учитывается, что существенно ограничивает выбор эксплуатационных режимов и уровней мощности реактора. Альтернативным методом обоснования безопасности является расчетный анализ как новых конструктивных элементов ядерного реактора, так и режимов работы реакторной установки. При этом обоснование теплотехнической надежности активной зоны невозможно без знания точных входных данных: полей скорости, температуры или концентрации примесей в камерах реактора. Все это определяет высокую ак-

¹ В работе использовалась система измерения концентрации трассера и скорости воздуха, разработанная за счет средств гранта Российского научного фонда (проект № 18-19-00473).

туальность исследований процессов перемешивания петлевых потоков теплоносителя в опускной камере ядерного реактора.

Представленная в открытых источниках информация свидетельствует о том, что на сегодняшний день европейские научные коллаборации (например, европейский проект FLOWMIX-R на установке ROCOM [1–3]) нарабатывали обширную базу высокоточных экспериментальных данных о процессах турбулентного перемешивания потоков теплоносителя в каналах, форма которых характерна для водо-водяных реакторных установок. Эта база данных успешно используется для валидации расчетных кодов вычислительной гидродинамики (ANSYS Fluent) [4]. Однако работы [1–4] обладают рядом недостатков, среди которых следует отметить отсутствие экспериментальных исследований влияния отдельных физических величин на процессы турбулентного перемешивания. Также не были проведены исследования по изучению масштабируемости результатов трехмерных компьютерных расчетов на натурные установки.

К настоящему времени разработано довольно большое количество расчетных комплексов, предназначенных для численного моделирования теплофизических и гидродинамических процессов. Эти прикладные программы могут иметь принципиальные различия в схемах решения уравнений движения жидкости, способах задания расчетной сетки, а также в используемых моделях турбулентности. Причем даже работы одних и тех же авторов, демонстрирующие примеры расчетов сложных гидродинамических процессов внутри модели реактора с применением различных моделей турбулентности, свидетельствуют о расхождении результатов [5–8].

В России на сегодняшний день отсутствует необходимая база прецизионно-точных экспериментальных данных, без которой просто невозможен процесс валидации отечественных импортзамещающих кодов вычислительной гидродинамики для решения класса задач в области турбулентных смешений потоков с различными физическими свойствами [9]. Ввиду конструктивной сложности оборудования атомной отрасли имеются немногочисленные исследовательские работы российских ученых, посвященные изучению процессов турбулентного перемешивания потоков в отдельных узлах реакторной установки [10, 11]. Показательным примером сложного технического объекта атомной промышленности, который довольно часто находится под влиянием процессов турбулентного перемешивания потоков с различными физическими свойствами, является реакторная установка атомного ледокола.

Проведение аэродинамического эксперимента с использованием изотермической модели напорного тракта водо-водяного ядерного реактора

дает возможность исследовать особенности течения потока и смоделировать температуру теплоносителя на входе в активную зону в процессе перемешивания петлевых потоков. Данная работа является первым этапом комплексных исследований процессов турбулентного смешения потоков теплоносителя в напорной камере модели реактора с варьированием параметров, входящих в определяющие критерии подобия, в том числе путем изменения рабочей среды. Такие исследования направлены на повышение эксплуатационных характеристик и технико-экономических показателей перспективных реакторных установок малой мощности при парциальных режимах работы.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Одним из этапов комплексных исследований, направленных на изучение гидродинамики процессов перемешивания петлевых потоков теплоносителя в опускной камере ядерного реактора, являлся аэродинамический эксперимент, который проводился на высоконапорном аэродинамическом стенде НГТУ им. Р.Е. Алексеева. Стенд (рис. 1) представляет собой аэродинамический разомкнутый контур, в состав которого входят вентилятор высокого давления, буферная емкость, раздающая система трубопроводов, экспериментальная модель, измерительный комплекс.

Экспериментальная модель (рис. 2) — это масштабная модель, которая имеет конструкцию, характерную для водо-водяного ядерного реактора, а именно: радиальный подвод теплоносителя через патрубки, движение теплоносителя по опускному каналу до нижней напорной камеры, сформированной эллиптическим днищем и нижней частью имитатора активной зоны, разворот теплоносителя при переходе из опускного канала в нижнюю камеру, подъем теплоносителя через каналы—имитаторы активной зоны с последующим осевым выходом из верхней сливной камеры. Экспериментальная модель водо-водяного ядерного реактора обладает четырьмя вводными патрубками, отстоящими один от другого на 90°. Наружный диаметр опускной камеры составляет 400 мм. Имитатор активной зоны представляет собой набор из девятнадцати вертикальных каналов круглого сечения, внутри которых протекает теплоноситель — воздух (рис. 3). На входе в каждый канал устанавливались дроссели, предназначенные для создания гидравлического сопротивления потоку теплоносителя в целях моделирования перепада давления в активной зоне.

Циркуляцию рабочей среды обеспечивает один вентилятор высокого давления, поэтому на выходе из буферной емкости организована раздающая система трубопроводов. Все ветки обладают одинаковыми геометрическими характеристиками, что позволяет поддерживать и контролировать равен-

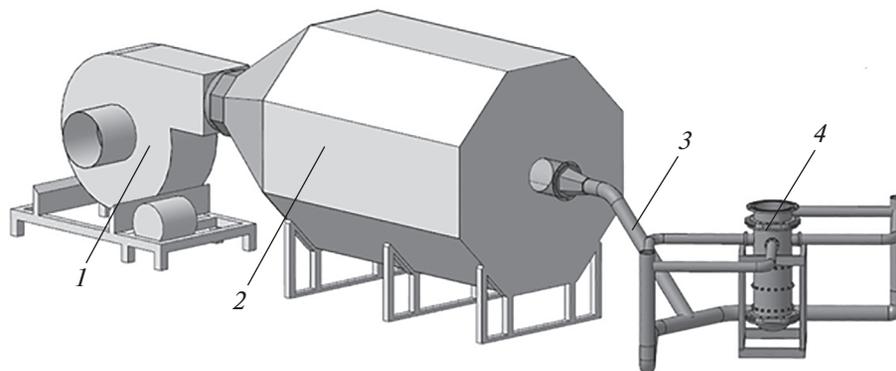


Рис. 1. Общий вид экспериментальной установки.

1 – вентилятор высокого давления; 2 – буферная емкость; 3 – раздающая система трубопроводов; 4 – экспериментальная модель

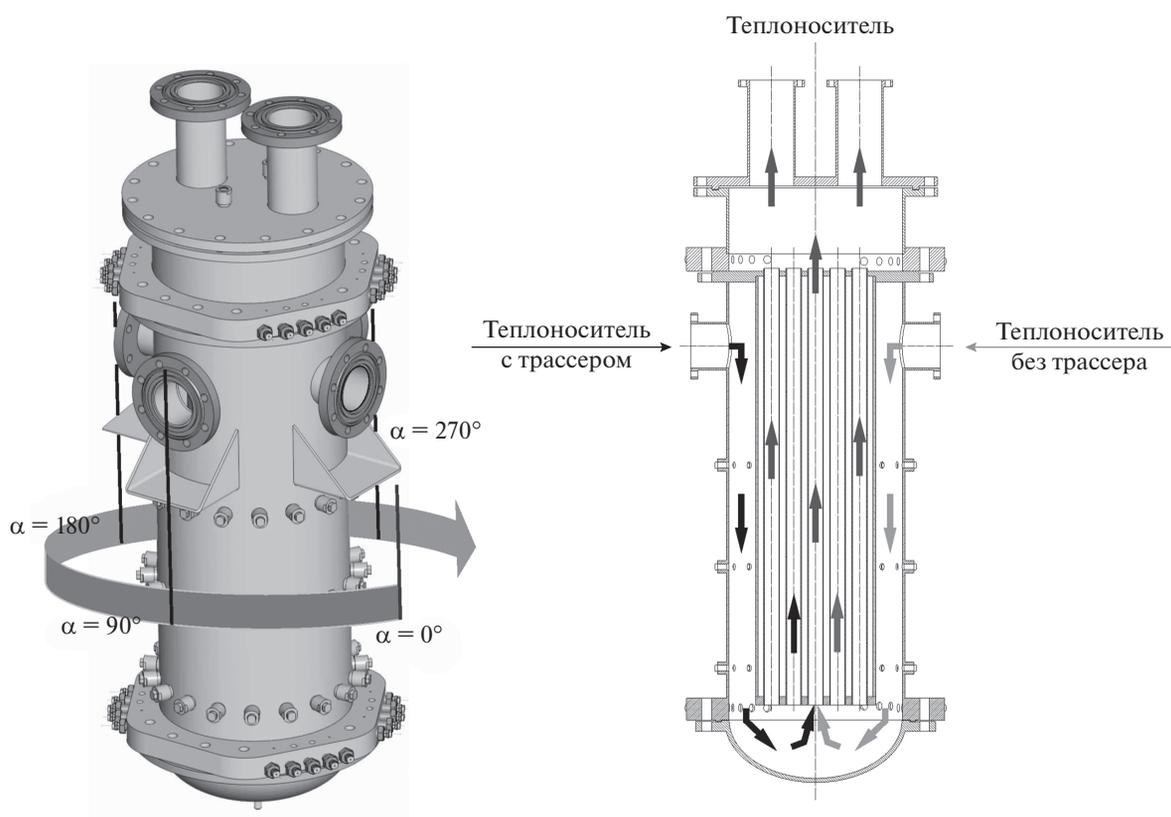


Рис. 2. Экспериментальная модель

ство расходов во всех петлях на входе в экспериментальную модель. Нестабильность поддержания режимных параметров в эксперименте не превышает 3% (рис. 4).

Для измерения скорости рабочей среды применялась трубка Пито–Прандтля. Измерения скорости проводились в каждой петле на входе в экспериментальную модель, а также внутри каналов–имитаторов активной зоны.

Для изучения особенностей течения теплоносителя внутри модели реактора применялся метод диффузии примеси. Этот метод основан на реги-

страции потока массы по некоторой переносимой субстанции. В качестве контрастной примеси (трассера) был выбран пропан. Во время проведения экспериментального исследования в одну из петель модели реактора (через патрубков IV) был организован подвод трассера. Подача пропана не превышала $0.005 \text{ м}^3/\text{с}$ при расходе воздуха $0.1 \text{ м}^3/\text{с}$ по каждой петле. Такое количество трассера в контуре дает возможность с высокой точностью регистрировать его перераспределение внутри среды, не оказывая при этом значительного влияния на гидродинамику основного потока.

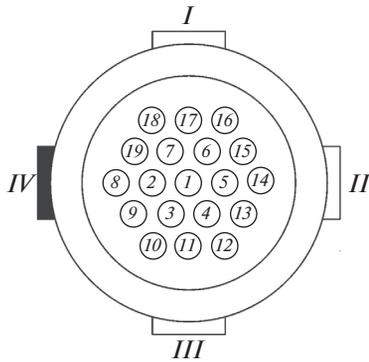


Рис. 3. Нумерация каналов–имитаторов активной зоны (1–19) и входных патрубков (I–IV) экспериментальной модели. В патрубок IV подается контрастная примесь

Для контроля за диффузией (концентрацией) трассера использовался измерительный комплекс АДК-03Р, который был индивидуально отградуирован по эталонной смеси воздуха с пропаном, погрешность измеряемой объемной концентрации пропана не превышала $\pm 15 \text{ млн}^{-1}$. Подача газа контролировалась расходомером El-Flow F-201CV (погрешность поддержания расхода составляла 0.5%). С помощью отборных зондов измерения проводились в трех характерных плоскостях опускной камеры (равномерно расположенных в области от входных патрубков экспериментальной модели до входа потока в нижнюю напорную камеру), а также внутри каналов–имитаторов активной зоны.

При проведении исследований максимальный суммарный расход воздуха по четырем петлям экспериментальной модели достигал $0.4 \text{ м}^3/\text{с}$, что соответствует числу Рейнольдса, определенному по поперечному сечению опускного кольцевого канала и равному $Re = 50000$. При этом температура воздуха составляла 20°C , перепад давления на всей экспериментальной модели не превышал 4 кПа. Всего было исследовано три экспериментальных режима, соответствующих числам Рейнольдса, определенным по опускному кольцевому

каналу модели: $Re = 20000, 30000$ и 50000 . Варьирование чисел Рейнольдса достигалось изменением суммарного расхода воздуха путем регулирования числа оборотов вентилятора.

ПРЕДСТАВИТЕЛЬНОСТЬ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Применение метода диффузии примеси в экспериментальных исследованиях позволяет исследовать перераспределение поля температур или концентрации примеси в потоке теплоносителя при использовании изотермических аэродинамических моделей. Ввод трассера в поток рабочей среды достаточно широко практикуется при исследованиях теплогидравлических и массообменных процессов [12–18]. Математической основой применения данного метода является одинаковый вид дифференциальных уравнений переноса тепла и массы. В движущемся высокотурбулентном потоке жидкости поле температуры вдали от стенок, как и поле концентрации примеси, зависит от поля скорости, которое описывается уравнениями гидродинамики, и крупных вихрей, генерация которых обусловлена формой канала. В несжимаемой среде в предположении независимости коэффициента вязкости от температуры уравнение Навье–Стокса совместно с уравнением неразрывности образуют замкнутую систему, описывающую ее (среды) движение. Для некоторой скалярной величины Φ , в качестве которой могут выступать массовая концентрация химического компонента, энтальпия или температура, компоненты скорости, кинетическая энергия турбулентности или масштаб турбулентности, обобщенное дифференциальное уравнение принимает вид [19]

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\Phi) + \text{div}(\rho w\Phi) = \text{div}(\rho D_\Phi \text{grad}\Phi) + S_\Phi, \quad (1)$$

где ρ и w – плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$, и скорость, $\text{м}/\text{с}$, среды; D_Φ – коэффициент диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$; S_Φ – источникный член.

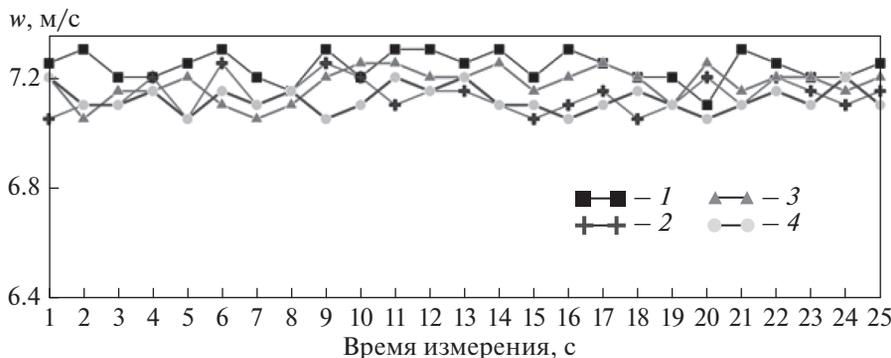


Рис. 4. Скорость по каждой петле на входе в экспериментальную модель при $Re = 30000$. Номер линии соответствует номеру петли

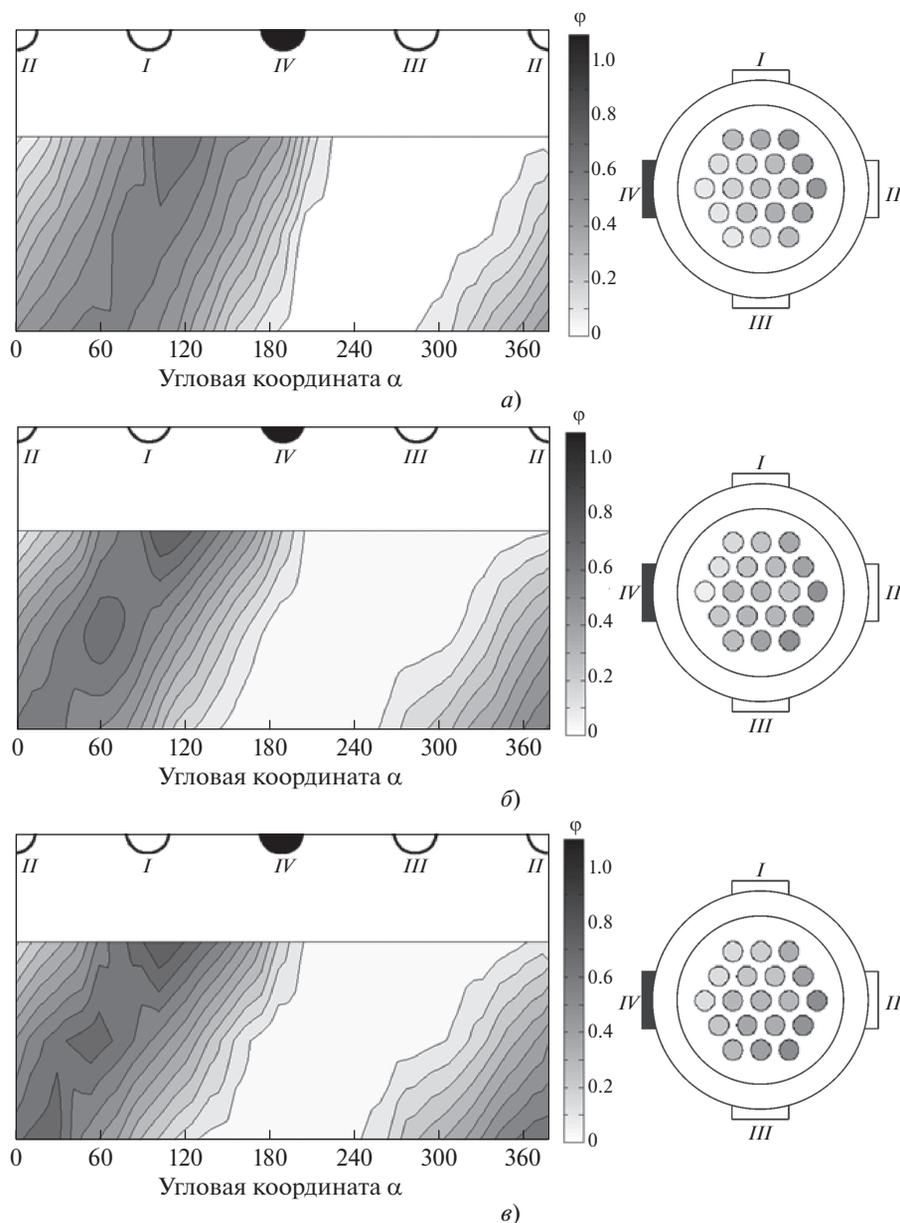


Рис. 5. Картограмма распределения трассера в опускной камере модели реактора (слева) и в нижней напорной камере (справа).

Число Re: *a* – 20000; *б* – 30000; *в* – 50000

Эффективный коэффициент диффузии D_{Φ} в высокотурбулентном потоке будет определяться в большей степени турбулентной составляющей, которая зависит от параметров потока, а не от свойств среды.

При проведении экспериментов, как уже отмечалось ранее, предполагалось, что рабочая среда является несжимаемой, поскольку перепады давления на участках модели не превышали 4 кПа. Максимальное локальное значение числа Маха составляет 0.12, т.е. поток существенно дозвуковой. Вводимый пропановый трассер

рассматривался как пассивная примесь, так как его максимальная объемная концентрация в модели не превышала 0.15% (по объему) (1500 млн^{-1}).

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В ходе эксперимента были получены данные о распределении скорости рабочей среды и концентрации примеси в характерных областях модели. Результаты далее приводятся в безразмерной форме – в виде безразмерной относительной концентрации примеси и безразмерной скорости.

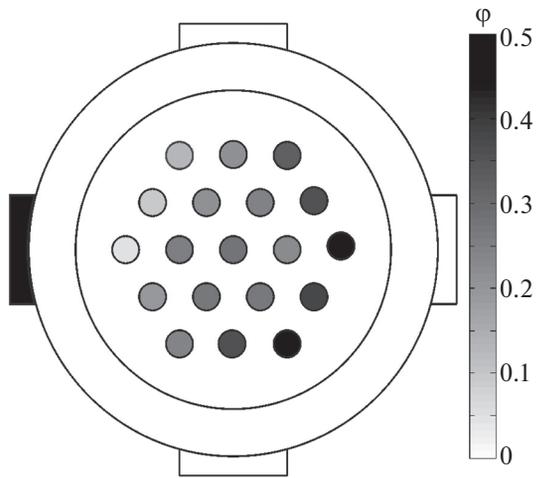


Рис. 6. Картограмма относительной концентрации трассера на входе в каналы-имитаторы активной зоны

Безразмерная относительная концентрация примеси рассчитывается по формуле

$$\varphi = \frac{c_{\text{изм}} - c_{\text{min}}}{c_{\text{max}} - c_{\text{min}}},$$

где c_{max} , c_{min} – максимальная и минимальная концентрация примеси; $c_{\text{изм}}$ – измеренная текущая концентрация примеси.

Величина φ может рассматриваться как скаляр Φ в уравнении (1).

Безразмерная скорость определяется следующим образом:

$$\langle w \rangle = \frac{w_i}{w_{\text{ср.р}}},$$

где w_i – осевая скорость в i -м канале-имитаторе активной зоны; $w_{\text{ср.р}}$ – среднерасходная скорость.

На первом этапе экспериментальных работ проводилось исследование картины движения потока теплоносителя при прохождении его через опускную камеру от входных патрубков до имитатора активной зоны.

Во всех экспериментальных режимах пятно контрастного трассера было обнаружено в области противоположной его вводу, что является следствием наличия закрутки потока теплоносителя относительно патрубка подачи трассера. При этом наибольший вклад в спиральное движение теплоносителя вносит опускная камера, при движении внутри которой поток отклоняется на угол примерно 120° ($Re = 20000$) и 170° – 180° (во всех остальных экспериментальных режимах) (рис. 5).

По представленным картограммам распределения трассера в опускной камере можно определить, что для всех экспериментальных режимов угол раскрытия контрастной струи составляет 15° – 25° .

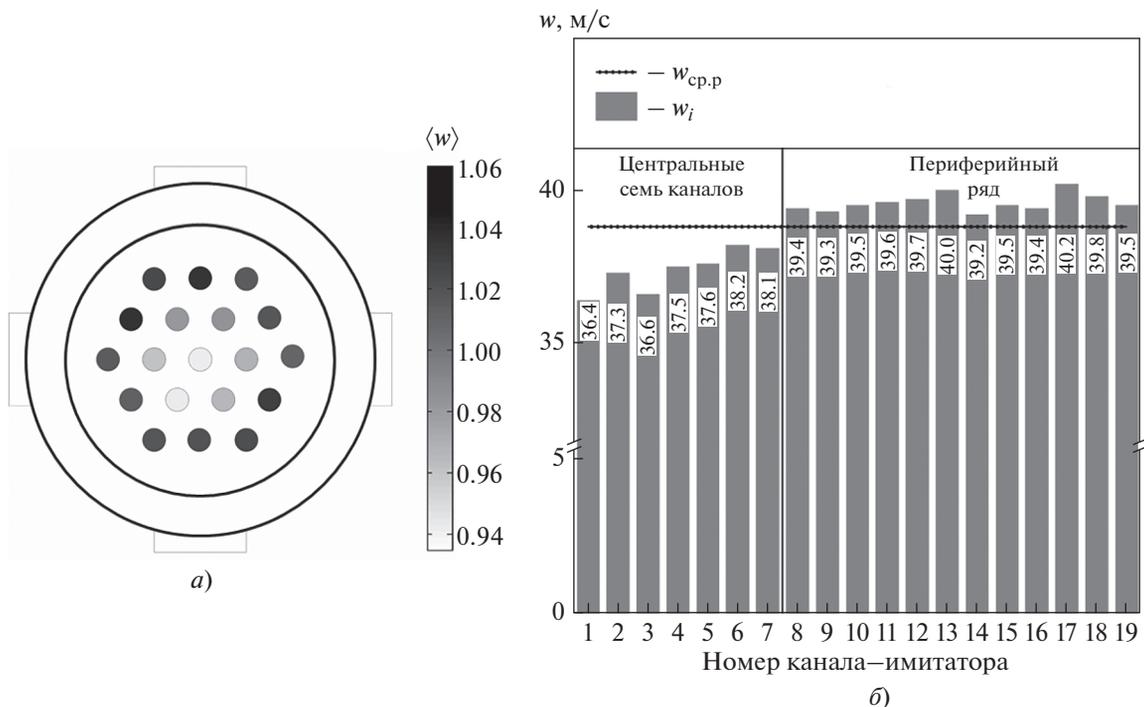


Рис. 7. Распределение относительных $\langle w \rangle$ (а) и абсолютных w (б) осевых скоростей по каналам-имитаторам активной зоны при $Re = 50000$

Результаты экспериментальных исследований

Показатель	Число Рейнольдса		
	20000	30000	50000
Расход через экспериментальную модель:			
воздуха, м ³ /с	0.16	0.24	0.40
трассера, дм ³ /мин	2.0	3.0	5.0
Угол поворота потока в камере, град:			
опускной	120	180	180
напорной		60	
Относительная концентрация трассера в напорной камере (номер канала):			
максимальная	0.44 (14)	0.44 (12)	0.47 (12)
минимальная	0.08 (8)	0.05 (8)	0.05 (8)

Согласно [20], резкий поворот потока при выходе из опускной камеры в большой объем напорной камеры приводит к образованию тороидального вихря. Однако на полученных полях концентрации трассера (см. рис. 5, 6) можно заметить поворот локального максимума концентрации при перетекании теплоносителя от нижнего сечения опускной камеры к сечению входа в каналы—имитаторы активной зоны. При всех числах Рейнольдса угол поворота контрастного пятна находится в диапазоне 50°–60° относительно выхода из кольцевого канала. Это объясняется закруткой потока в нижней камере, обусловленной наличием дополнительного осевого вихря.

Следует отметить, что полного перемешивания контрастной примеси в экспериментальной модели не произошло, о чем свидетельствует существенное различие ее относительной концентрации на входе в каналы—имитаторы активной зоны (см. рис. 6). Для режима $Re = 30000$ минимальная относительная концентрация была обнаружена в канале № 8 и составила 0.05, максимальная относительная концентрация 0.44 локально расположена в канале № 12.

В распределении скорости теплоносителя через каналы экспериментальной модели отчетливо наблюдаются две области течения (рис. 7):

в центральных семи каналах скорость потока ниже среднерасходной скорости;

в периферийном ряду скорость потока выше среднерасходной скорости.

Такое распределение скорости теплоносителя через каналы—имитаторы активной зоны экспериментальной модели является следствием перераспределения поля давления в нижней напорной камере. Существенное занижение полного давления на входе в имитатор активной зоны мог-

ло быть вызвано наличием крупного центрального вихря.

Обобщенные результаты экспериментальных исследований представлены в таблице.

ВЫВОДЫ

1. Экспериментальные исследования и анализ результатов перемешивания петлевых потоков теплоносителя в опускной камере модели ядерного реактора показали, что закрутка потока происходит преимущественно в опускной камере модели реактора. Для разных экспериментальных режимов угол закрутки составлял 120°–180°. При этом в нижней напорной камере, независимо от значения критерия Рейнольдса, поток дополнительно подкручивался на 60°.

2. Основное перемешивание межпетлевых потоков обусловлено конвективным турбулентным переносом в опускной камере модели реактора, поэтому целесообразно в реакторных установках, для которых требуется обеспечение максимального перемешивания потоков теплоносителя, дополнительные турбулизирующие и перемешивающие устройства располагать в зоне опускного кольцевого канала, а не в нижней напорной камере.

3. Экспериментальные исследования продемонстрировали, что при увеличении числа Re от 20000 до 50000 характеристики процесса турбулентного смешения потоков существенно не меняются (максимальные и минимальные относительные концентрации, угол раскрытия струи, поворот потока в нижней напорной камере), однако происходит изменение угла закрутки потока теплоносителя в опускной камере (особенно существенно этот эффект выражен при переходе от

режима $Re = 20000$ к $Re = 30000$). Поэтому целесообразно для выявления масштабируемости результатов изучения процессов межпетлевого перемешивания провести исследования с более высокими числами Рейнольдса. В связи с этим в НГТУ им. Р.Е. Алексеева создан крупномасштабный стенд с водяным теплоносителем, на котором будут проведены аналогичные исследования при тех же и больших числах Рейнольдса, а также на увеличенной модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Fluid mixing and flow distribution in the reactor circuit, measurement data base** / U. Rohde, S. Kliem, T. Höhne, R. Karlsson, B. Hemström, J. Lillington, T. Toppila, J. Elter, Y. Bezrukov // Nucl. Eng. Des. 2005. V. 235. Is. 2–4. P. 421–443. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2004.08.045>
2. **Simulation of mixing effects in a VVER-1000 reactor** / U. Bieder, G. Fauchet, S. Béтин, N. Kolev, D. Popov // Nucl. Eng. Des. 2007. V. 237. Is. 15–17. P. 1718–1728. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2007.02.015>
3. **Experiments at the mixing test facility ROCOM for benchmarking of CFD codes** / S. Kleim, T. Sühnel, U. Rohde, T. Höhne, H.-M. Prasser, F.-P. Weissa // Nucl. Eng. Des. 2008. V. 238. Is. 3. P. 566–576. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2007.02.053>
4. **Validation of CFD calculation using ROCOM flow measurements in primary loop of coolant in PWR model** / I. Farkas, E. Hutli, T. Farkas, A. Takács, A. Guba, I. Tóth // Nucl. Eng. Technol. 2016. V. 48. Is. 4. P. 941–951. <https://doi.org/10.1016/j.net.2016.02.017>
5. **CFD simulation for thermal mixing of a SMART flow mixing header assembly** / Y.I. Kim, Y. Bae, Y.J. Chung, K.K. Kim // Ann. Nucl. Energy. 2015. V. 85. P. 357–370. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2015.05.019>
6. **Numerical study on coolant flow distribution at the core inlet for an integral pressurized water reactor** / L. Sun, M. Peng, G. Xia, X. Lv, R. Li // Nucl. Eng. Technol. 2017. V. 49. Is. 1. P. 71–81. <https://doi.org/10.1016/j.net.2016.07.005>
7. **Flow mixing and heat transfer in nuclear reactor vessel with direct vessel injection** / Y. Weng, H. Wang, B. Cai, H. Gu, H. Wang // Appl. Therm. Eng. 2017. V. 125. P. 617–632. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.07.040>
8. **LIF study of temporal and spatial fluid mixing in an annular downcomer** / X. Li, P. Qi, T. Zhao, Sh. Qiao, S. Tan // Ann. Nucl. Energy. 2019. V. 126. P. 220–232. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2018.11.006>
9. **Будников А.В., Свешников Д.Н., Романов Р.И.** Проблемы масштабирования CFD программ к описанию смешения в реакторных установках // Сб. докл. науч.-техн. семинара “Проблемы верификации и применения CFD кодов в атомной энергетике”. Н. Новгород: ОКБМ Африкантов, 13–14 сентября 2016 г.
10. **Термографическое исследование турбулентных пульсаций воды при неизотермическом смешении** / М.А. Большухин, И.А. Знаменская, Д.Н. Свешников, В.И. Фомичев // Автометрия. 2014. Т. 5. С. 75–83.
11. **Calculation and experimental studies of coolant hydrodynamics in the inlet region of fuel assembly** / S.M. Dmitriev, A.A. Dobrov, A. Pronin, A. Ryazanov // J. Phys.: Conf. Ser. 2018. V. 1128. Is. 1. P. 12125. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1128/1/012125>
12. **Габрианович Б.Н., Дельнов В.Н.** Исследование перемешивания теплоносителя в раздающих коллекторных системах быстрых реакторов и ВВЭР // Атомная энергия. 1994. Т. 77. Вып. 5. С. 340–344.
13. **Габрианович Б.Н., Дельнов В.Н., Рухадзе В.К.** Методика исследования процессов перемешивания и времени движения теплоносителя в теплообменном оборудовании с использованием галоидного трассера // Теплоэнергетика. 1995. № 7. С. 60–63.
14. **Дельнов В.Н., Левченко Ю.И., Шепелев С.Ф.** Метод суперпозиции при моделировании температурного поля в теплообменных устройствах полем концентрации трассера // Изв. вузов. Ядерная энергетика. 2009. № 3. С. 152–160.
15. **Экспериментальные исследования эффективности перемешивания теплоносителя в обоснование выбора оптимальной конструкции ТВСА для внедрения в реакторы типа ВВЭР** / С.М. Дмитриев, С.С. Бородин, А.Н. Ершов, М.А. Легчанов, Д.А. Ныркoв, Д.Н. Солнцев, А.Е. Хробостов // Изв. вузов. Ядерная энергетика. 2009. № 1. С. 88–97.
16. **Экспериментальные исследования гидродинамических и массообменных характеристик потока теплоносителя в ТВСА ВВЭР** / С.М. Дмитриев, С.С. Бородин, М.А. Легчанов, Д.Н. Солнцев, В.Д. Сорокин, А.Е. Хробостов // Атомная энергия. 2012. Т. 113. Вып. 5. С. 252–256.
17. **Исследования межкассетного взаимодействия теплоносителя в активной зоне реактора ВВЭР-1000 с различными модификациями ТВСА** / С.М. Дмитриев, А.В. Варенцов, А.А. Добров, Д.В. Доронков, А.Н. Пронин, В.Д. Сорокин, А.Е. Хробостов // ИФЖ. 2015. Т. 88. № 5. С. 1245–1252.
18. **Экспериментальные исследования локальной гидродинамики и массообмена теплоносителя в тепловыделяющих сборках реакторных установок с водой под давлением** / С.М. Дмитриев, А.А. Баринoв, А.Н. Пронин, В.Д. Сорокин, А.Е. Хробостов // Энергетика. Изв. вузов и энергет. объединений СНГ. 2016. Т. 59. № 6. С. 591–603.
19. **Снегирёв А.Ю.** Высокопроизводительные вычисления в технической физике. Численное моделирование турбулентных течений: учеб. пособие. СПб.: Изд-во политехн. ун-та, 2009.
20. **Митрофанова О.В.** Гидродинамика и тепломассообмен закрученных потоков в каналах ядерно-энергетических установок. М.: Физматлит, 2010.

An Experimental Study into the Hydrodynamics of the Loop Coolant Flows' Mixing in the Nuclear Reactor Downcomer

S. M. Dmitriev^a, A. E. Khrobostov^a, M. A. Legchanov^a, A. A. Dobrov^a, A. V. Ryazanov^{a,*},
D. V. Doronkov^a, A. N. Pronin^a, D. N. Solntsev^a, A. A. Barinov^a, and A. V. Gerasimov^a

^a*Alekseev State Technical University, Nizhny Novgorod, 603950 Russia*

**e-mail: a_v_ryazanov@rambler.ru*

Abstract—This work is an experimental study into the hydrodynamics of the coolant flow in the in-vessel pressure duct of a pressurized water reactor. In the article, an experimental testbench and a nuclear reactor model under investigation are described, the measurement methods are set forth, and the operating variables at which the study was conducted and the obtained results are provided. In the experiments, the mixing of the loop coolant flows inside the model of the nuclear reactor downcomer was simulated. The study was conducted on the high-pressure aerodynamic testbench of Alekseev State Technical University in Nizhny Novgorod. The scale model of the nuclear reactor had the structural components characteristic of loop-type reactor units, such as the annular downcomer and the bottom pressure vessel. The experiments were conducted at Reynolds numbers within the 20000–50000 range measured in the annular gap of the downcomer of the model. The axial velocity field at the inlet to the reactor core simulator was investigated using a pneumatic probe. The temperature field was recorded in the experiment by the impurity diffusion method, i.e., by introducing of a contrast tracer into one of the loops of the model. The degree of mixing the flows was estimated by the admixture (tracer) concentration at the inlet to the core simulator. Propane was used as the contrast admixture. The study has yielded the spatial distribution of the tracer in the coolant flow in the annular downcomer and in the bottom pressure vessel. The data on the distribution of the contrast admixture are presented in the form of charts. The swirling of the coolant flow in the in-vessel pressure duct has been analyzed. It has been shown that the mixing intensity in the bottom pressure vessel is affected by the central vortex with the central axis. The parameters of mixing the admixture in the model of the in-vessel pressure duct have been estimated.

Keywords: flow hydrodynamics, flow mixing, nuclear reactor, coolant, direct sampling method, tracer