

УДК 621.039

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ПОТОКОВ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В НАПОРНОЙ КАМЕРЕ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРАДмитриев С.М., Хробостов А.Е., Легчанов М.А., Рязанов А.В., Добров А.А., Доронков Д.В.,
Пронин А.Н.*Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
(Нижний Новгород, Российская Федерация)*

Аннотация. 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. В процессе исследований было определено пространственное распределение трассера в потоке теплоносителя в опускном кольцевом канале, а также в нижней напорной камере.

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

EXPERIMENTAL STUDY OF THE FLOW MIXING PROCESSES OF THE COOLANT IN THE PRESSURE CHAMBER OF A NUCLEAR REACTORSergei M. Dmitriev, Alexander E. Khrobostov, Maksim A. Legchanov, Anton V. Ryazanov,
Alexander A. Dobrov, Denis V. Doronkov, Alexey N. Pronin
*Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
(Nizhniy Novgorod, Russian Federation)*

Abstract. In the presented experimental research, the phenomenon of the loop flows mixing of the coolant inside the model of the lowering chamber of a nuclear reactor was simulated. The study was carried out at the high-pressure aerodynamic stand of the NNSTU n.a. R.E. Alekseev. The scale model of a nuclear reactor possessed structural elements characteristic of loop reactor plants (lowering ring duct, lower pressure chamber). Experimental studies were carried out in the range of Reynolds numbers from 20,000 to 50,000, determined in the annular gap of the lower part of the model. In the course of the research, the spatial distribution of the tracer in the coolant flow in the lowering annular channel, as well as in the lower pressure chamber, was determined.

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

Введение

Создание новых водо-водяных ядерных энергетических установок 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.

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. 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]. Также результаты таких исследований необходимы для расчета распределения концентрации борной кислоты в активной зоне при инъекции ее в теплоноситель первого контура [2].

Методика проведения эксперимента

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 [3]. В состав стенда входят: вентилятор высокого давления, ресиверная ёмкость, подводной гидравлический коллектор, экспериментальная модель, измерительный комплекс.

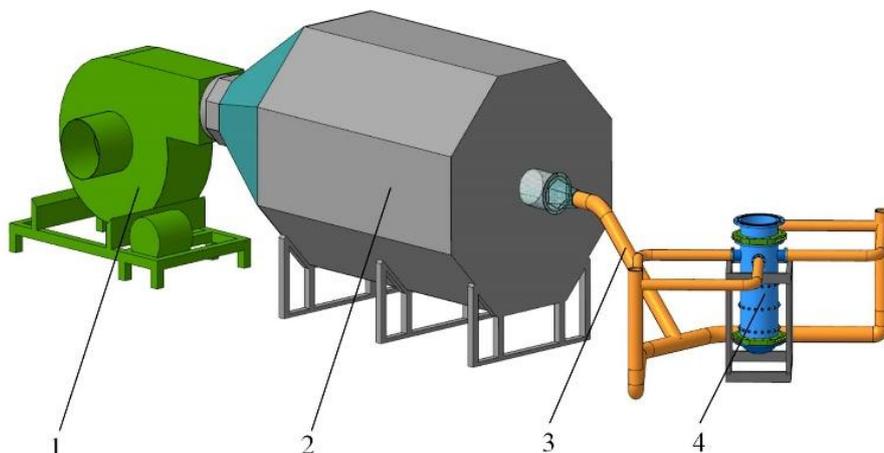


Рис. 1. Общий вид экспериментального стенда: 1 – вентилятор; 2 – ресивер; 3 – подводной коллектор; 4 – экспериментальная модель опускной камеры реактора

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

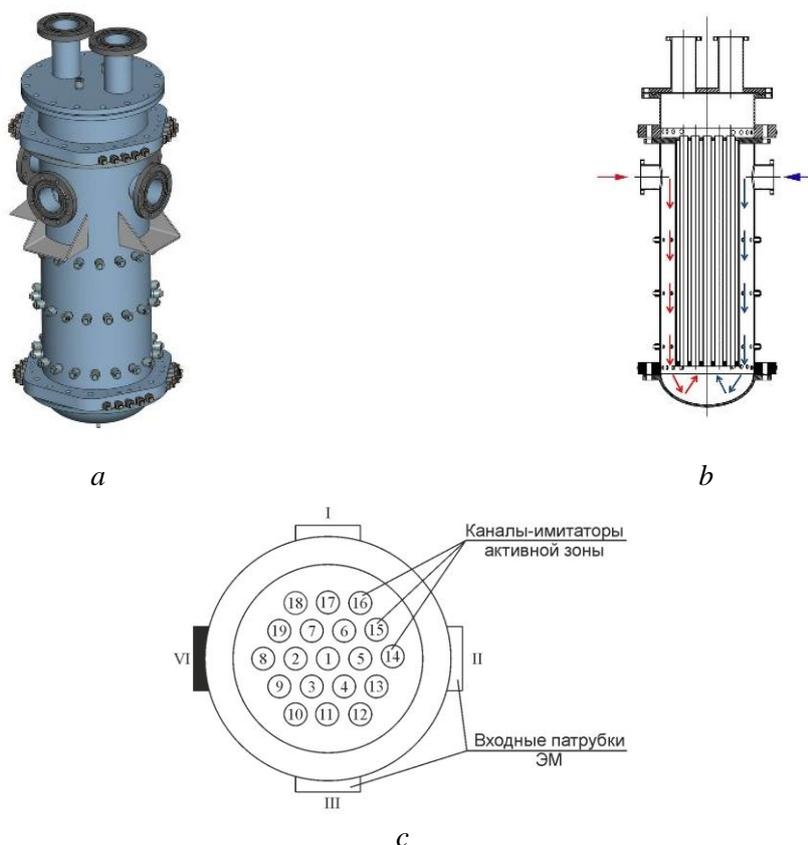


Рис. 2. Экспериментальная модель напорной камеры ядерного реактора: а – общий вид; б – схема движения потоков; с – нумерация каналов-имитаторов активной зоны

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, подъем 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.

По одному из патрубков экспериментальной модели подавался воздух с контрастной примесью, по трем другим – воздух.

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 $Re=10\ 000\div 50\ 000$.

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.

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

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.

Результаты и их обсуждение

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° ($Re=20\ 000$) и $170\text{--}180^\circ$ (во всех остальных экспериментальных режимах) (рис. 3).

По представленным картограммам распределения трассера в опускной камере можно определить, что для всех экспериментальных режимов угол раскрытия контрастной струи составляет $15\text{--}25^\circ$.

На полученных полях концентрации трассера 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 $50\text{--}60^\circ$ 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. Для режима $Re=30\ 000$ 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. 4):

- в центральных семи каналах скорость потока ниже среднерасходной скорости;
- в периферийном ряду скорость потока выше среднерасходной скорости.

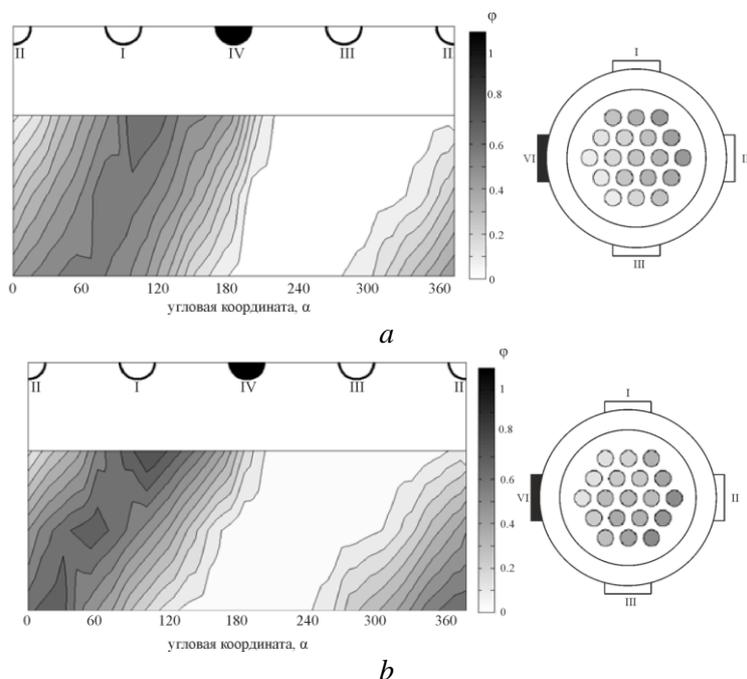


Рис. 3. Картограмма распределения трассера в опускной камере модели реактора (слева) и в нижней напорной камере (справа): *a* – $Re=20\,000$; *b* – $Re=50\,000$

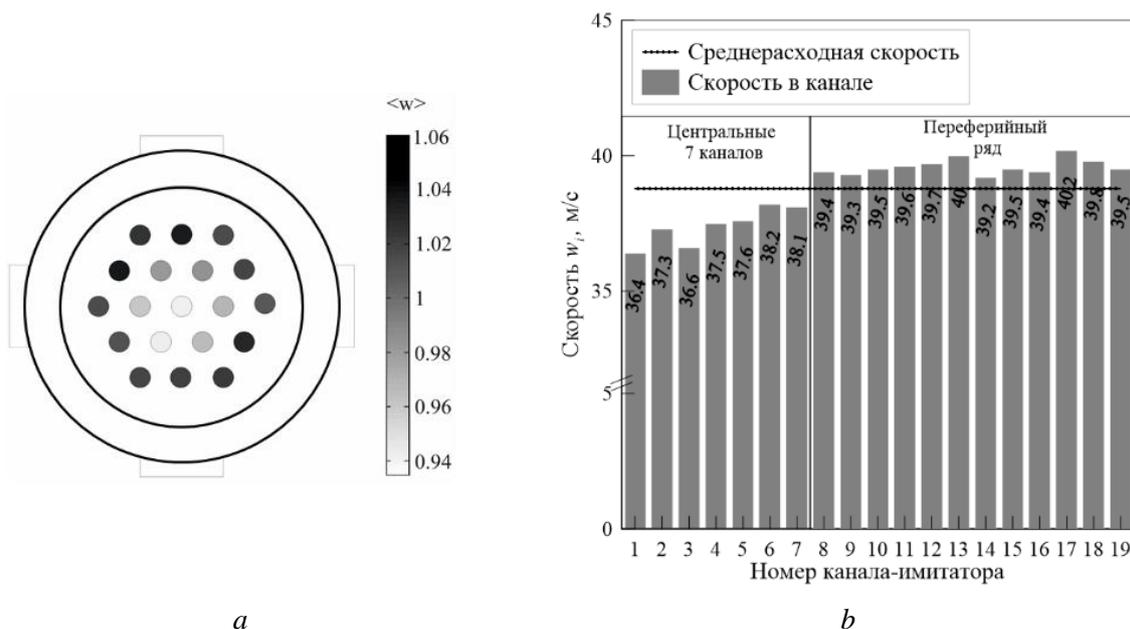


Рис. 4. Распределение относительных скоростей по каналам–имитаторам активной зоны при $Re = 50\,000$: *a* – относительные скорости; *b* – абсолютные скорости

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 могло быть вызвано наличием крупного центрального вихря.

Заключение

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 $120\text{--}180^\circ$. 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 20 000 до 50 000 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 $Re = 20\ 000$ к $Re = 30\ 000$). 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. Farkas I., Hutli E., Farkas T., Takács A., Guba A., Tóth I. Validation of CFD calculation using ROCOM flow measurements in primary loop of coolant in PWR model. Nucl. Eng. Technol. 2016. V. 48. Is. 4. P. 941–951.
2. 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.
3. 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.