

Гидродинамика турбулентного течения теплоносителя на выходе тепловыделяющей сборки реактора РИТМ атомной станции малой мощности

С.М. Дмитриев¹, Т.Д. Демкина¹, А.А. Добров¹, Д.В. Доронков¹, А.Н. Пронин¹, А.В. Рязанов¹, О.О. Карпухов², О.Б. Самойлов², Д.Л. Шипов²

¹ Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева, 603155 Россия, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24

² АО «ОКБМ Африкантов», 603079 Россия, г. Нижний Новгород, Бурнаковский проезд, 15

Реферат. Приведены результаты экспериментального изучения и сравнительного анализа гидродинамики теплоносителя на выходе тепловыделяющей сборки (ТВС) с головками трех различных конструкций. ТВС предназначены для активной зоны реактора РИТМ атомной станции малой мощности (АСММ). Целью работы являлось изучение осевой скорости потока на выходе из пучка твэлов и за головками разной конструкции, а также определение областей пучка твэлов, из которых возможно попадание потока в трубу отбора к термометру сопротивления (ТСП). Эксперименты проводились на исследовательском стенде с воздушной рабочей средой на модели выходного участка ТВС. Модель состояла из фрагмента пучка твэлов, сменных макетов головок трех вариантов конструкции, а также макетов плиты под установку ТВС и трубы отбора теплоносителя к ТСП. Пневмометрический метод использовался для определения осевой скорости потока. Метод впрыска контрастной примеси применялся для выявления областей пучка твэлов, из которых возможно попадание потока в трубу отбора к ТСП. Гидродинамическая картина течения потока представлена картограммами осевой скорости и контрастной примеси. Результаты экспериментов позволили детализировать структуру течения турбулентного потока и сделать следующие выводы. Форма проходного сечения конфузора головок незначительно влияет на осевой поток уже перед выходной дистанционирующей решеткой. Значительное же влияние геометрии проточной части головок проявляется при истечении потока из пучка твэлов. Форма проходного сечения конфузора и геометрия проточной части головок оказывают значительное влияние на величину осевой скорости и структуру потока. Наибольший вклад в изменение осевой скорости вносит уменьшение площади проходного сечения головок. Неоднородность структуры потоков из окон головок определяется трубой отбора, которая перекрывает часть проходного сечения. Поток, истекающий из головки с тремя окнами, наиболее неоднороден. При течении потока в конфузорах головок фиксируется процесс его перемешивания, выраженный смещением примеси в направлении трубы отбора.

© Дмитриев С.М., Демкина Т.Д., Добров А.А., Доронков Д.В., Пронин А.Н., Рязанов А.В., Карпухов О.О., Самойлов О.Б., Шипов Д.Л., 2026

Наибольшее поперечное смещение примеси происходит в конфузоре головки с тремя окнами. Для минимизации влияния потоков с разной температурой на показания ТСП необходимо использовать головки с тремя окнами. Результаты исследований использованы специалистами АО «ОКБМ Африкантов» для обоснования инженерных решений при проектировании активных зон.

Ключевые слова: активная зона, тепловыделяющая сборка, головка, труба отбора, теплоноситель, осевая скорость, контрастная примесь.

Для цитирования: Дмитриев С.М., Демкина Т.Д., Добров А.А., Доронков Д.В., Пронин А.Н., Рязанов А.В., Карпухов О.О., Самойлов О.Б., Шипов Д.Л. Гидродинамика турбулентного течения теплоносителя на выходе тепловыделяющей сборки реактора РИТМ атомной станции малой мощности. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2026;1:52–70. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2026.1.05>

Введение

Развитие районов Северного морского пути Российской Федерации затруднительно без источника энергии с такими качествами, как автономность, надежность и маневренность. Энергоисточником такого рода должна стать атомная станция малой мощности (АСММ) [1, 2]. Сейчас Госкорпорацией «Росатом» разрабатывается проект АСММ, в основе которого лежит судовая реакторная установка РИТМ [3 – 5].

Однако использование судовых реакторных технологий для создания стационарных энергетических установок потребовало значительных изменений в конструкции активной зоны реактора, а также повышения точности измерения температуры теплоносителя на выходе из нее [6 – 9]. Это обусловлено более строгими требованиями нормативной документации. Для выполнения этих требований необходимо увеличить количество точек контроля температуры с трех до двадцати четырех. Температура теплоносителя измеряется термометром сопротивления (ТСП), отбор потока к которому осуществлен специальными трубами, установленными на уровне выходных отверстий головок ТВС.

Значительное влияние на точность определения температуры теплоносителя с помощью ТСП может оказать попадание локальных холодных или горячих струйных потоков из пучка твэлов в трубу отбора. Для учета этого влияния необходимо выявить области пучка твэлов, из которых теплоноситель попадает в трубу отбора, и подобрать геометрию головки ТВС, обеспечивающую интенсивное перемешивание потока.

Изучение процесса формирования потока теплоносителя при его истечении из ТВС позволит определить оптимальную геометрию головки и выявить области пучка твэлов, из которых попадание потока в трубу отбора наиболее вероятно. Полученные опытные данные необходимы для обоснования конструкторских решений элементов активных зон реактора РИТМ для АСММ.

Исследовательский стенд и методика экспериментов

Моделирование течения водяного теплоносителя осуществлялось потоком воздуха исследовательского стенда научно-исследовательской лаборатории теплогидравлики ядерных энергетических установок (НИЛ ТГ ЯЭУ) в НГТУ им. Р.Е. Алексеева на основании теории гидродинамического моделирования [10, 11].

В разомкнутый контур аэродинамического стенда входят вентилятор высокого давления, экспериментальная модель и система измерения [12, 13]. Канал модели шестигранной формы собран из двух частей. В первой части располагались имитаторы твэлов, стержней выгорающего поглотителя, центрального вытеснителя, шести уголков жесткости и двух дистанционирующих решеток. Вторая часть модели включала в себя сменные макеты головок, а также макет плиты под установку ТВС с трубой отбора (рис. 1). Размеры всех элементов модели увеличены относительно штатных элементов конструкции согласно коэффициенту геометрического подобия 5,79.

В конструкции модели использованы три типа головок ТВС. Первый тип характеризуется наличием трех широких сливных окон для радиального истечения потока

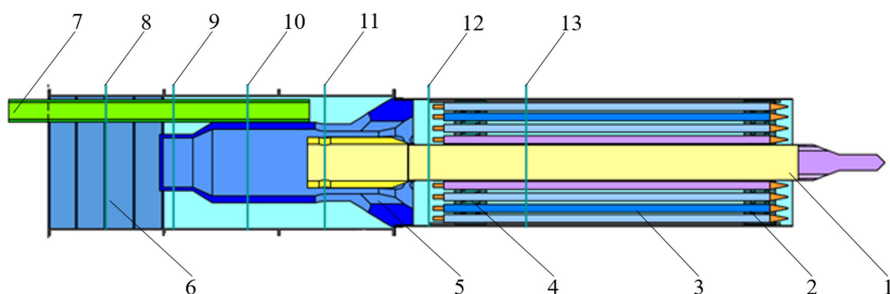


Рис. 1. Экспериментальная модель: 1 – центральный вытеснитель; 2 – входная дистанционирующая решетка; 3 – пучок стержней; 4 – выходная дистанционирующая решетка; 5 – головка; 6 – плита под установку ТВС; 7 – труба отбора; 8–13 – сечения измерений в окнах плиты под установку ТВС и трубе отбора, в узкой части головки, в широкой части головки, на выходе из головки, на выходе из пучка твэлов, перед выходной дистанционирующей решеткой

и шести круглых отверстий для осевого выхода потока. Для второго типа головки характерно наличие шести узких сливных окон и шести круглых осевых отверстий. Проходное сечение головок первого и второго типа одинаково. Из конструкции головки третьего типа исключены шесть круглых отверстий для осевого истечения потока (рис. 2).

Измерение осевой скорости потока проводилось пневмометрическим методом. Для определения статического и динамического давления потока в точке использовались напорные трубки Пито. Далее, величины давлений с учетом поправочных коэффициентов пересчитывались в значения осевой скорости с помощью цифрового дифференциального манометра. Погрешность определения величины осевой скорости не превышала 7,5%.

Для определения влияния конструкции головки на течение теплоносителя и выявления зон пучка твэлов, из которых поток попадает в трубу отбора, применялся метод впрыска примеси (газ пропан) в воздушный поток, который заключался в следующем:

- примесь подавалась в пучок стержней с соблюдением условия нахождения примеси в пределах индивидуальной ячейки, образованной поверхностями трех соседних имитаторов твэлов, перед дистанционирующей решеткой, что обеспечивается выбором расстояния от точки подачи до решетки, на котором примесь отсутствует в ячейках, соседних с ячейкой подачи примеси;

- концентрация примеси измерялась зондом с погрешностью не более 1,5%.

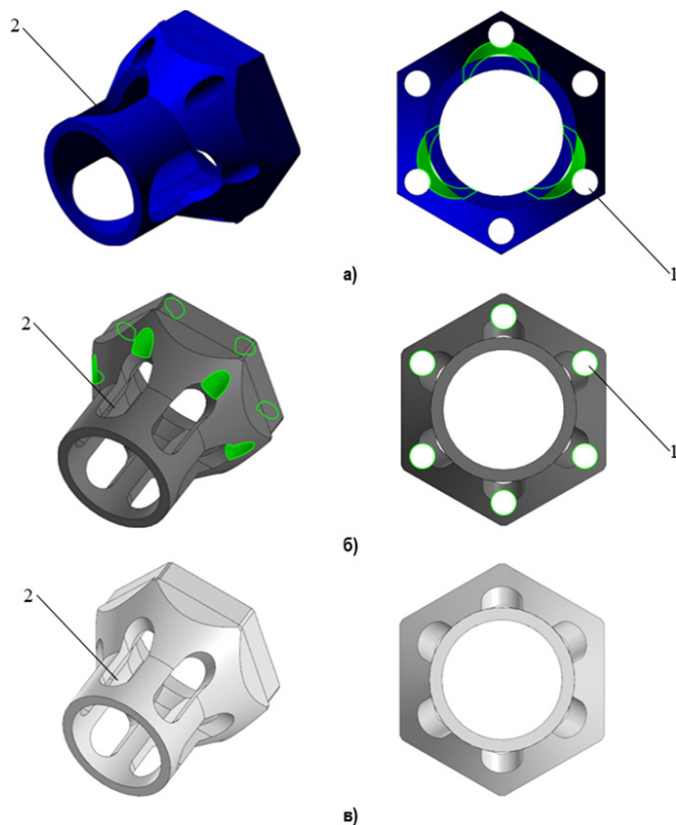


Рис. 2. Типы конструкции головок: а) – головка первого типа с тремя окнами и шестью осевыми отверстиями; б) – головка второго типа с шестью окнами и шестью осевыми отверстиями; в) – головка третьего типа с шестью окнами и без шести осевых отверстий; 1 – сливные окна; 2 – осевые отверстия

Для выявления зон пучка твэлов, из которых поток может попасть в трубу отбора, выбраны угловая ячейка и ячейка центрального вытеснителя, а также пара регулярных ячеек, одна из которых находится напротив сечения трубы отбора, а другая находится с противоположной стороны пучка твэлов (рис. 3). Через эти ячейки осуществлялась подача примеси.

Все измерения проводились перед выходной дистанционирующей решеткой, на выходе из пучка твэлов, на выходе из головки, в области между головкой и плитой под установку тепловыделяющих сборок, в макете трубы отбора и отверстиях плиты под установку ТВС. На основании результатов замеров построены картограммы осевой скорости и распределения примеси.

Определение структуры осевого потока в характерных сечениях производилось на основании безразмерных величин осевой скорости потока. Безразмерные величины получены путем нормирования локальных значений скорости в точках измерения к среднерасходной скорости в каждом сечении измерения. Различие среднерасходной скорости потока в каждом сечении измерений обусловлено значительным различием площадей каждого такого характерного сечения. Значение среднерасходной скорости в характерных сечениях определялось путем соотношения величины осевого расхода

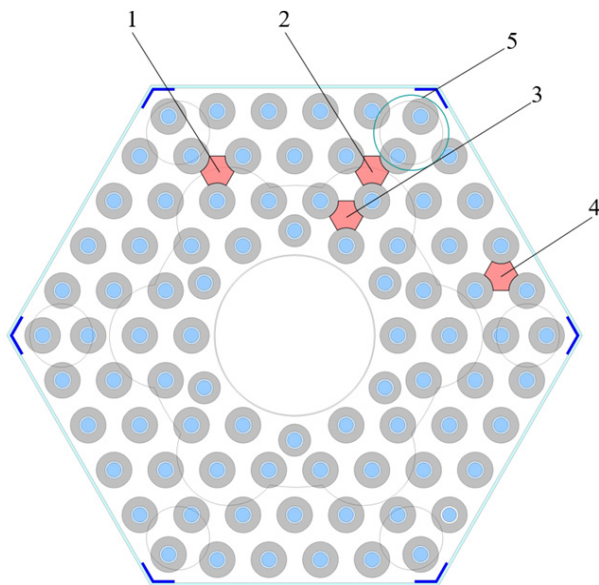


Рис. 3. Расположение ячеек подачи примеси: 1 – регулярная ячейка, удаленная от трубы отбора; 2 – регулярная ячейка, расположенная возле трубы отбора; 3 – ячейка у центрального вытеснителя; 4 – ячейка в угловой области; 5 – проходное сечение трубы отбора

воздушной рабочей среды на входе в канал экспериментальной модели к площади проходного сечения модели в областях проведения измерений.

Расход потока на входе в канал экспериментальной модели определялся с помощью измерительного коллектора. Перепад давления на измерительном коллекторе измерялся дифференциальным датчиком давления САПФИР с погрешность не более 0,25%. Далее на основании соответствующего пересчета определялась величина осевого расхода потока. Для подтверждения величины расхода потока на входе в модель, измеренного с помощью расходомерного коллектора, проводились дополнительные измерения скорости за коллектором на успокоительном участке перед моделью. Измерение скорости осуществлялось термоанемометрическим датчиком Omniport 40-T30 с погрешностью не более 0,1% по методике, изложенной в ГОСТ 12.3.018-79 «Системы вентиляционные. Методы аэродинамических испытаний». Также проводилось измерение профиля скорости на успокоительном участке перед каналом модели. В ходе измерений был получен равномерный профиль скорости.

Во время проведения исследований проводилась фиксация температурного состояния воздушной рабочей среды на входе в канал экспериментальной модели. Диапазон измеренной температуры воздушного потока составил от 25 до 27°C, что не оказало значительного влияния на другие его физические параметры.

Обоснование представительности экспериментов

Выбор оптимальной геометрии экспериментальной модели и возможность последующего пересчета характеристик воздушного потока, полученных в ходе экспериментов, на натурные условия течения теплоносителя возможны при выполнении

гидродинамического подобия, которое требует одновременно соблюдения условий геометрического, кинематического и динамического подобия.

Геометрическое подобие обеспечивается соответствием геометрических размеров модели и натурального объекта с учетом масштабного коэффициента, составляющего 5,79. Использование большого масштабного коэффициента и, как следствие, использование имитаторов твэлов диаметром 40 мм обусловлено следующими факторами:

- необходимостью увеличения проходного сечения ячеек и всей модели для увеличения гидравлического диаметра; это необходимо для обеспечения высокого значения критерия Рейнольдса, достаточного для гарантированного выхода в зону автомоделного движения потока; критерий Рейнольдса для данного вида экспериментов является определяющим;
- для обеспечения минимального затеснения площади проходного сечения областей проведения замеров и минимизации влияния средств измерения на движение потока.

Динамическое подобие процесса движения сред в геометрически подобных элементах конструкции обеспечивается за счет соблюдения близких значений критерия Рейнольдса. Максимальное значение критерия Рейнольдса в модели составило 90000, а в штатном объекте 100000.

Кинематическое подобие процессов движения сред в геометрически подобных элементах конструкции обеспечивается за счет соблюдения пропорциональности безразмерных скоростей в соответствующих точках в модели и штатной конструкции, для этого необходимо обеспечить проведение экспериментальных исследований в зоне подобия величины коэффициента сопротивления элементов ТВС.

Исследования структуры течения потока в экспериментальной модели проводились в зоне подобия величины коэффициента сопротивления элементов ТВС. Начало зоны подобия величины коэффициента сопротивления элементов ТВС определялось экспериментально:

- 1) на основе построения зависимости сопротивления трения пучка гладких труб от величины критерия Рейнольдса (рис. 4);
- 2) на основе построения зависимости коэффициента гидравлического сопротивления (КГС) элементов модели от критерия Рейнольдса (рис. 5, 6); к основным элементам модели относятся дистанционирующие решетки и головки различной конструкции.

Анализ указанных выше зависимостей показывает, что, начиная с некоторого значения критерия Рейнольдса, величины сопротивления трения пучка гладких труб и КГС дистанционирующей решетки и головок ТВС перестают значительно изменяться, описанное явление говорит о начале зоны подобия величины коэффициента сопротивления элементов ТВС. При проведении экспериментов зона подобия величины коэффициента сопротивления элементов ТВС начиналась в диапазоне величин критерия Рейнольдса от 30000 до 40000.

Также результаты измерения КГС дистанционирующей решетки и головок ТВС показали их соответствие величинам КГС, полученным для штатных элементов конструкции ТВС при идентичных значениях критерия Рейнольдса. Это также подтверждает представительность экспериментальных исследований.

Критерий Рейнольдса определялся согласно формуле

$$Re = (W \cdot d_c) / \nu, \quad (1)$$

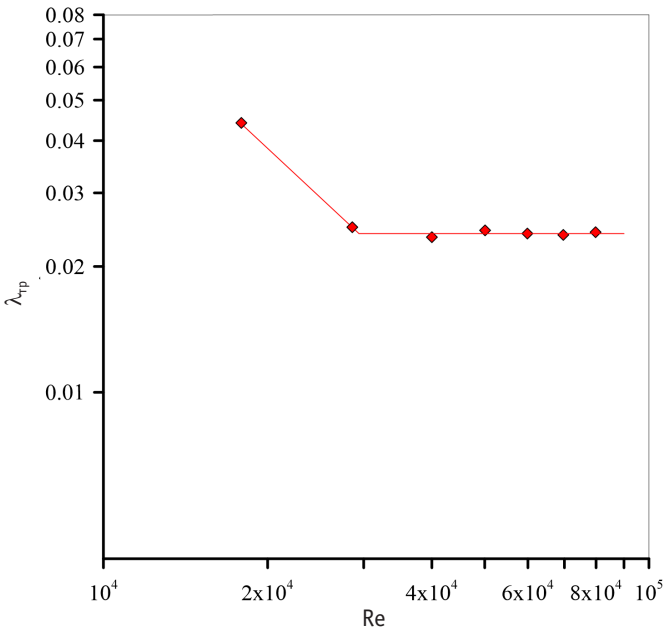


Рис. 4. Зависимость сопротивления трения пучка гладких труб от критерия Рейнольдса

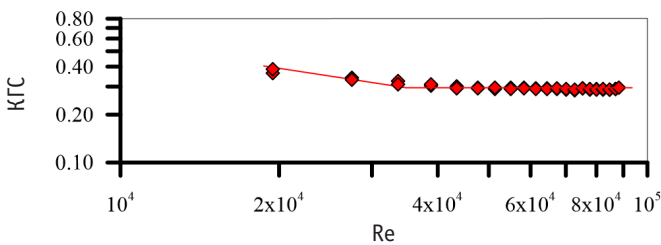


Рис. 5. Зависимость КГС дистанционирующей решетки от критерия Рейнольдса

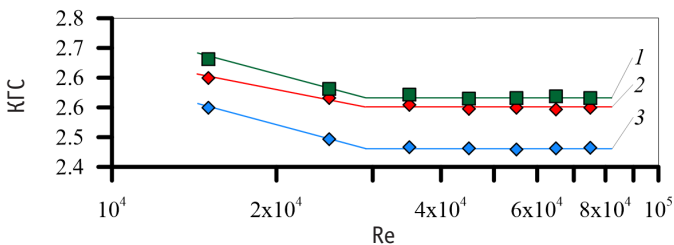


Рис. 6. Зависимость КГС головок ТВС от критерия Рейнольдса: 1 – головка с тремя окнами; 2 – головка с шестью окнами; 3 – головка с шестью окнами и шестью отверстиями

здесь W – величина скорости потока на входе в канал экспериментальной модели (м/с), d_r – гидравлический диаметр в характерном сечении экспериментальной модели (м), ν – кинематическая вязкость среды (м²/с). Гидравлический диаметр (d_r) определялся для каждого сечения проведения замеров.

Все измерения проводились при среднерасходной скорости воздуха в характерных сечениях модели в диапазоне 20 – 40 м/с и критерии Рейнольдса 60000 – 90000.

Результаты экспериментальных исследований

Результаты экспериментальных исследований осевой скорости потока позволили выявить основные закономерности его формирования при истечении из ТВС.

В пучке твэлов перед выходной дистанционирующей решеткой осевая скорость потока неоднородна. В центральной области пучка твэлов, расположенной перед проходным сечением конфузора головки, величина безразмерной осевой скорости потока составила 1,05 – 1,2. У чехла ТВС, в области одного ряда твэлов от него, величина безразмерной скорости на 20% ниже и составляет 0,8 – 1. Данная картина течения потока характерна для всех типов головок. Следовательно, в данной области особенности формы проходного сечения конфузоров головок не оказывают на поток значительного влияния (рис. 7).

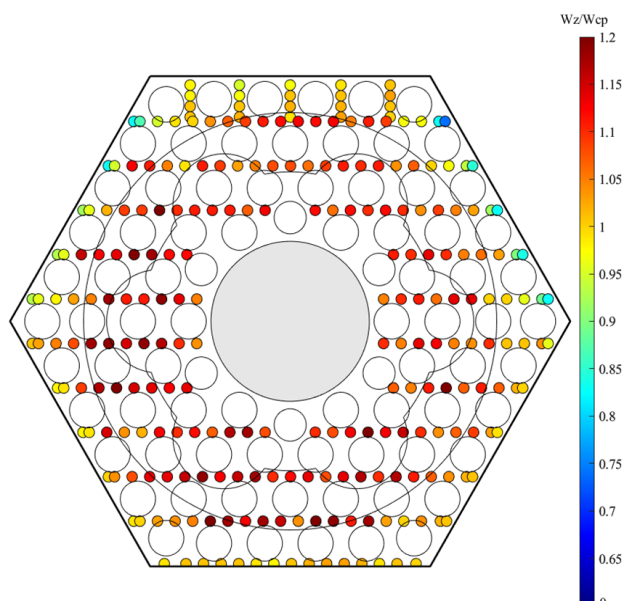


Рис. 7. Осевая скорость потока перед выходной дистанционирующей решеткой

При истечении потока из пучка твэлов фиксируется перераспределение осевой скорости потока, вызванное особенностями геометрии выходной части пучка, формой конфузора и величиной площади проходного сечения отверстий головок.

Влияние геометрии выходной части пучка твэлов характеризуется образованием такой структуры осевого потока, при которой величина его скорости за выходной частью каждого твэла на 35% ниже, чем в свободных от твэлов областях поперечного сечения.

Влияние формы конфузора и площади проходного сечения отверстий головок на поток при его истечении из пучка твэлов характеризуется образованием обширных

областей с низким и высоким значениями осевой скорости. Перед головками ТВС, в конструкции которых присутствуют шесть круглых отверстий для осевого выхода потока, величина безразмерной осевой скорости в области конфузора головки составила 1,1 – 1,7, а перед шестью круглыми отверстиями 1 – 1,3. Перед головкой без шести осевых отверстий величина безразмерной скорости потока перед сечением конфузора в среднем на 30% выше и составляет 1,4 – 2,2, что обусловлено уменьшением площади проходного сечения головки. Для головок всех типов характерно образование зоны низкой осевой скорости потока на периферии пучка твэлов, величина безразмерной осевой скорости в данной области составила 0,2 – 0,7, образование данной области во многом обусловлено геометрией входного сечения головок (рис. 8).

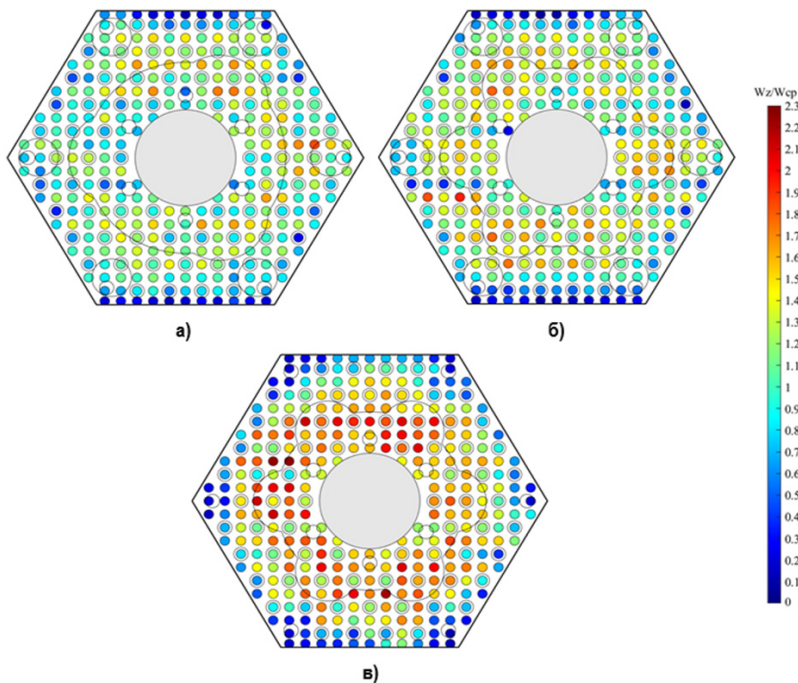


Рис. 8. Осевая скорость потока на выходе из пучка твэлов: а) – головка первого типа с тремя окнами и шестью осевыми отверстиями; б) – головка второго типа с шестью окнами и шестью осевыми отверстиями; в) – головка третьего типа с шестью окнами и без шести осевых отверстий

На величину осевой скорости потока, проходящего через головки ТВС, оказывает влияние конфигурация и форма выходных отверстий, а также их площадь проходного сечения. Влияние конфигурации и формы выходных отверстий головок ярко проявляется при сравнении структуры потока в головках 1 и 2 типа, которые имеют одинаковую площадь проходного сечения, но отличаются формой и количеством больших сливных окон. В головке с тремя широкими сливными окнами безразмерная осевая скорость потока составила 2,7 – 3,2, а в головке с шестью узкими окнами 2,5 – 3,1. Таким образом, форма проходного сечения конфузора головки оказывает влияние на величину осевой скорости потока, протекающего через него. Наибольший вклад в изменение осевой скорости потока вносит уменьшение площади проходного сечения головок, что видно при сравнении структуры осевой скорости

в головках 2 и 3 типов. В головке 3 типа без шести круглых отверстий и, как следствие, с наименьшей площадью проходного сечения величина безразмерной осевой скорости потока на 20% выше и имеет значение 3,2–4. В шести круглых отверстиях головок 1 и 2 типа безразмерная осевая скорость потока имеет близкие значения и составляет 2,3–3,2 (рис. 9).

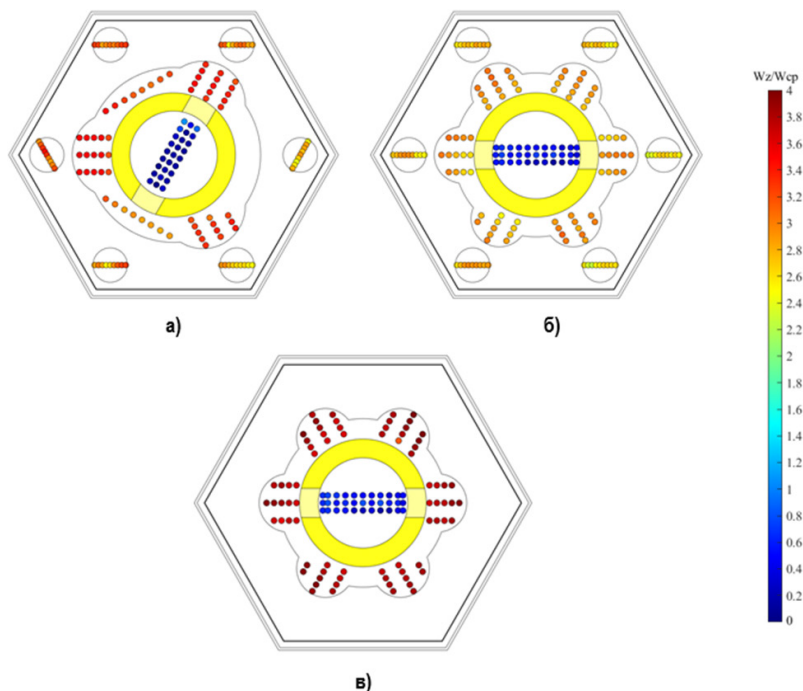


Рис. 9. Осевая скорость потока на выходе из головок разной конструкции: а) – головка первого типа с тремя окнами и шестью осевыми отверстиями; б) – головка второго типа с шестью окнами и шестью осевыми отверстиями; в) – головка третьего типа с шестью окнами и без шести осевых отверстий

В области между сливными окнами головок и плитой под установку ТВС течение потока имеет ярко выраженный струйный характер, с образованием локальных максимумов осевой скорости и обширной области с низкой скоростью у головки и трубы отбора, размер которой зависит от конструкции головок и площади перекрытия проходного сечения головок трубой отбора, а величина безразмерной скорости в этой области не зависит от типа головки и составляет 0,3–0,6. За головкой с тремя широкими окнами область низкой скорости наиболее обширна, а за головкой без шести круглых осевых отверстий имеет наименьший размер, это обусловлено тем, что за головкой с тремя широкими окнами трубой отбора перекрыта третья часть сечения для истечения потока, а за головкой с шестью узкими окнами только шестая часть (рис. 10).

Неоднородность структуры струйных потоков из окон головок и самом внутреннем объеме конфузора головок определяется наличием трубы отбора. Перекрывая часть проходного сечения головок, труба отбора перераспределяет поток таким образом, что за головками с тремя и шестью окнами образуется две и пять высокоскоростных струй соответственно. За головкой с тремя окнами величина безразмерной скорости

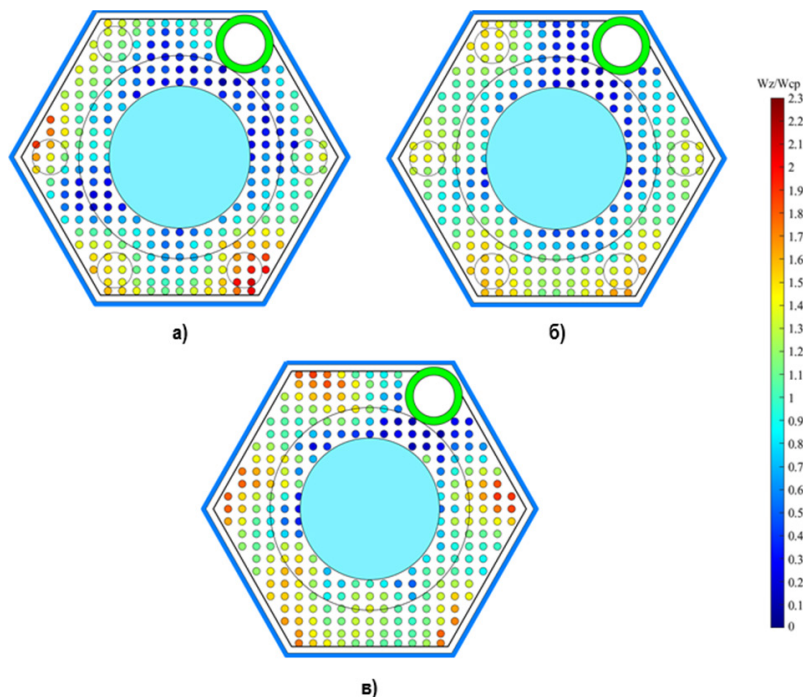


Рис. 10. Осевая скорость потока в области между головкой и плитой под установку тепловыделяющих сборок: а) – головка первого типа с тремя окнами и шестью осевыми отверстиями; б) – головка второго типа с шестью окнами и шестью осевыми отверстиями; в) – головка третьего типа с шестью окнами и без шести осевых отверстий

в области высокоскоростных струй 1,7 – 2,1, за головкой с шестью окнами и шестью осевыми отверстиями 1,4 – 1,7, а за головкой без шести осевых отверстий 1,5 – 2. При истечении потока из головки с тремя окнами и шестью круглыми отверстиями фиксируется наибольшая его неоднородность, которая выражается обширной областью низкой скорости и высокими значениями скорости в области локальных струй.

В фрагментах отверстий плиты под установку ТВС сохраняется струйное течение потока из головок, локальные максимумы скорости фиксируются в отверстиях противоположащих окнам головок без трубы отбора. За головкой с тремя окнами в отверстиях плиты под установку ТВС образуется пара локальных максимумов безразмерной скорости, имеющей значение 1,2 – 1,3. За головками с шестью окнами в отверстиях плиты под установку ТВС образуется пять локальных максимумов безразмерной скорости, составляющей 1 – 1,2. В отверстиях плиты под установку ТВС за всеми типами головок около трубы отбора образуется область низкой осевой скорости, обусловленная замедлением потока у стенок трубы. Величина безразмерной скорости в данной области составила 0,4 – 0,8 (рис. 11).

Однородность осевого потока в трубе отбора в значительной степени зависит от наличия процесса слияния радиального потока из окон головок и осевого потока из шести круглых отверстий. За головками 1 и 2 типа данный процесс присутствует, безразмерная осевая скорость потока в трубе отбора составила 0,6 – 0,9, а за головкой 3 типа процесс слияния потоков разной направленности отсутствует, величина безразмерной осевой скорости составила 0,95 – 1.

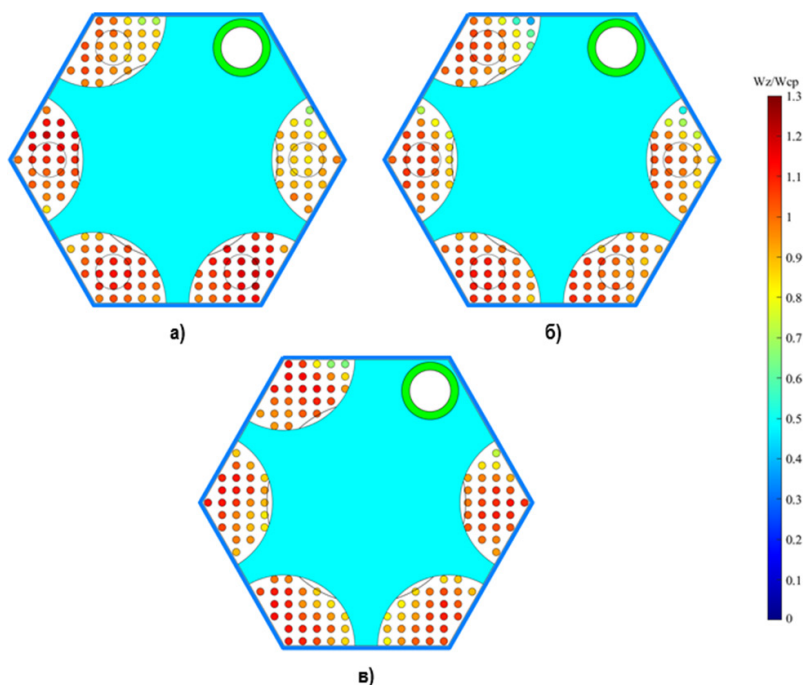


Рис. 11. Осевая скорость потока в окнах плиты под установку тепловыделяющих сборок: а) – головка первого типа с тремя окнами и шестью осевыми отверстиями; б) – головка второго типа с шестью окнами и шестью осевыми отверстиями; в) – головка третьего типа с шестью окнами и без шести осевых отверстий

Результаты экспериментального изучения процесса перемешивания потока позволили выбрать оптимальную конструкцию головки, минимизирующую влияние струйных потоков с различной температурой на показание ТСП, и сделать ниже представленные выводы.

Конструкция головки ТВС не оказала значительного влияния на образование поперечных потоков при истечении из пучка твэлов. Это подтверждается отсутствием размытия примеси в поперечном сечении и преимущественной ее локализацией в ячейке подачи. Такое распределение примеси характерно для головок всех типов конструкции. Значения концентрации примеси во всех ячейках подачи при установке головок всех типов составили 2100 – 2500 ppm.

При течении потока в конфузоре головок фиксируется процесс его перемешивания, выраженный смещением примеси в направлении имитатора трубы отбора. Область смещения примеси в значительной степени зависит от асимметрии течения потока ввиду затеснения проходного сечения конфузора головок трубой отбора. Для всех вариантов зон подачи примеси наибольшее ее поперечное смещение в направлении трубы отбора и, следовательно, перемешивание потока происходит в конфузоре головки с тремя окнами. Для данного типа конструкции головки примесь фиксируется в области трубы отбора для всех зон ее подачи в пучке твэлов.

В других головках примесь фиксируется в окнах, расположенных напротив ячеек подачи или близких к ним, таким образом в трубу отбора преимущественно попадает поток из области регулярных ячеек и ячеек вытеснителя, расположенных напротив или в непосредственной близости к проходному сечению трубы отбора. Значения

концентрации примеси для всех ячеек подачи при установке головок всех типов составили 200–500 ppm. Примеры распределения примеси на выходе из головок при подаче примеси в регулярную ячейку, удаленную от трубы отбора, приведены на рис. 12.

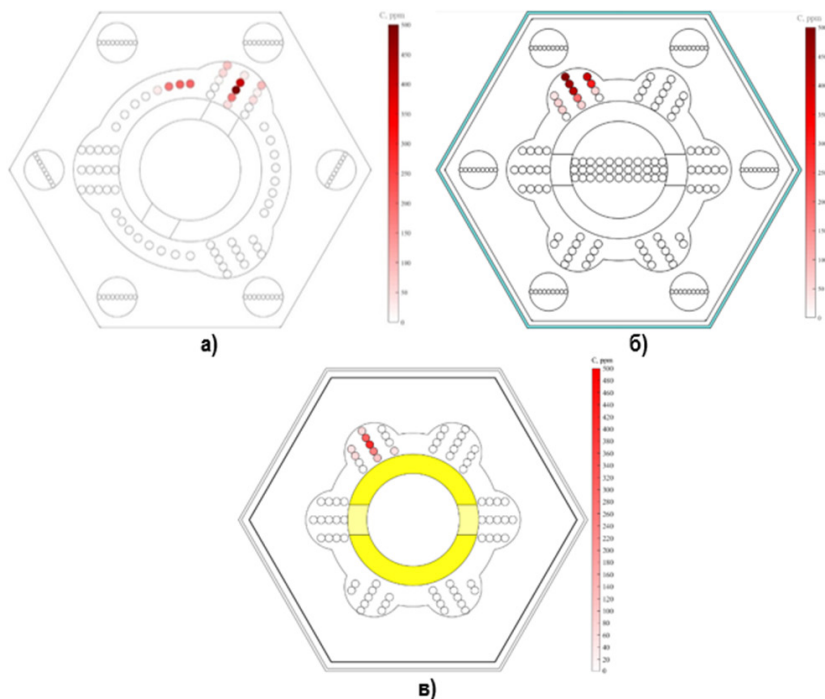


Рис. 12. Распределение примеси на выходе из головок нескольких типов при подаче примеси в регулярную ячейку, удаленную от трубы отбора: а) – головка первого типа с тремя окнами и шестью осевыми отверстиями; б) – головка второго типа с шестью окнами и шестью осевыми отверстиями; в) – головка третьего типа с шестью окнами и без шести осевых отверстий

Наличие примеси из зон подачи в пучке твэлов в трубе отбора визуализировано картограммами распределения примеси перед входным сечением самой трубы отбора (рис. 13). В трубу отбора из каждой характерной зоны впрыска в пучке твэлов попадает в среднем 10–15% от начального расхода примеси.

Таким образом, для минимизации влияния потоков с разной температурой на показания ТСП необходимо использовать в конструкции ТВС головки с тремя окнами, асимметрично расположенными относительно шести отверстий круглой формы.

Заключение

1. Форма проходного сечения конфузора головок ТВС оказывает влияние на структуру осевого потока уже перед выходной дистанционирующей решеткой. Значительное влияние геометрии головки проявляется при истечении теплоносителя из пучка твэлов. Перед головками, в конструкции которых присутствуют шесть круглых отверстий для осевого выхода потока, величина безразмерной скорости в области конфузора составила 1,1–1,7. Перед головкой без шести осевых отверстий величина

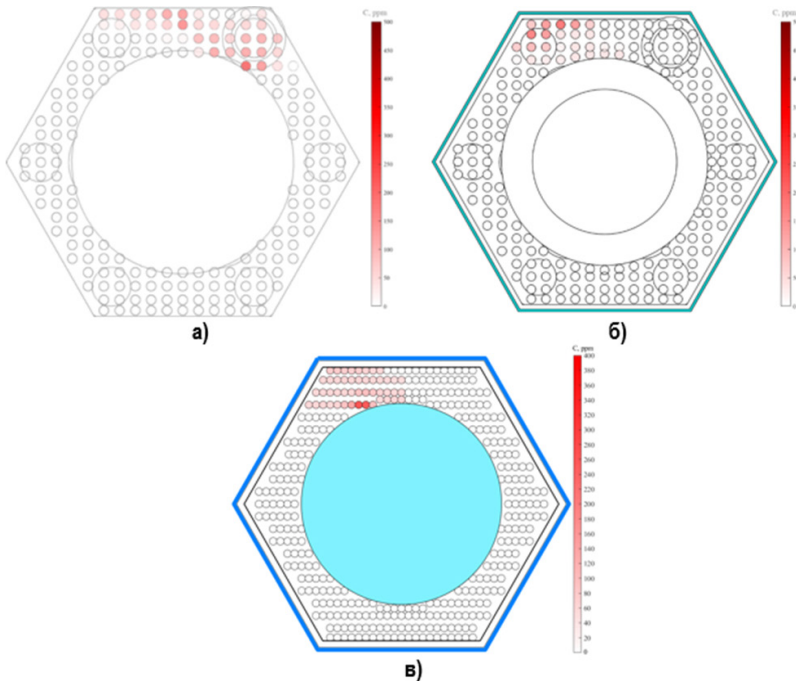


Рис. 13. Распределение примеси перед проходным сечением трубы отбора при подаче примеси в регулярную ячейку, удаленную от нее: а) – головка первого типа с тремя окнами и шестью осевыми отверстиями; б) – головка второго типа с шестью окнами и шестью осевыми отверстиями; в) – головка третьего типа с шестью окнами и без шести осевых отверстий

безразмерной скорости потока перед сечением конфузора в среднем на 30% выше и составляет 1,4 – 2,2.

2. Форма проходного сечения конфузора головки оказывает влияние на величину осевой скорости потока, протекающего в нем. В головке с тремя сливными окнами безразмерная осевая скорость потока составила 2,7 – 3,2, а в головке с шестью узкими окнами 2,5 – 3,1. Наибольший вклад в изменение осевой скорости потока вносит уменьшение площади проходного сечения головок, в головке без шести круглых отверстий и, как следствие, с меньшей площадью проходного сечения величина осевой скорости потока на 20% выше.

3. Неоднородность структуры струйных потоков из окон головок и самом внутреннем объеме их конфузора определяется трубой отбора, которая перекрывает часть проходного сечения головок и перераспределяет поток таким образом, что за головками с тремя и шестью окнами образуется две и пять высокоскоростных струй соответственно. За головкой с тремя окнами величина безразмерной скорости в области высокоскоростных струй наибольшая и составляет 1,7 – 2,1. Поток, истекающий из головки с тремя окнами, наиболее неоднороден.

4. Однородность осевого потока в трубе отбора зависит от наличия процесса слияния радиального потока из окон головок и осевого потока из шести круглых отверстий. Наибольшая однородность потока в трубе отбора фиксируется за головкой с наименьшей площадью проходного сечения, величина безразмерной осевой скорости составила 0,95 – 1.

5. При течении потока в конфузорах головок фиксируется процесс его перемешивания, выраженный смещением примеси в направлении имитатора трубы отбора. Область смещения примеси в значительной степени зависит от асимметрии течения потока ввиду затеснения проходного сечения конфузора головок трубой отбора. Для всех вариантов зон подачи примеси наибольшее ее поперечное смещение в направлении трубы отбора и, следовательно, перемешивание теплоносителя происходит в конфузоре головки с тремя окнами. Значения концентрации примеси для всех ячеек подачи при установке головок всех типов составили 200 – 500 ppm.

6. Для минимизации влияния потоков с разной температурой на показания ТСП необходимо использовать в конструкции ТВС головки с тремя окнами, асимметрично расположенными относительно шести отверстий круглой формы.

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (тема № FSWE-2024-0003).

Литература

1. Петрунин В.В. Реакторные установки для атомных станций малой мощности. *Вестник Российской академии наук*. 2021;91(6):528–540. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869587321050182>

2. Беляев В.М., Большухин М.А., Пахомов А.Н., Хизбуллин А.М., Лепехин А.Н., Полуничев В.И., Вешняков К.Б., Соколов А.Н., Турусов А.Ю. Опыт создания первой в мире плавучей АЭС. Направления дальнейшего развития. *Атомная энергия*. 2020;129(1):37–43. URL: <https://j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/3201> (дата обращения 20.11.2025).

3. Петрунин В.В., Шешина Н.В., Фатеев С.А., Кураченко А.В., Щекин Д.В., Брыкалов С.М., Безруков А.А. Научно-технические аспекты создания инновационной реакторной установки РИТМ-200Н для АСММ. *Атомная энергия*. 2023;134(12):3–11. URL: <https://j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/5265> (дата обращения 20.11.2025).

4. Самойлов О.Б., Романов А.И., Галицких В.Ю., Захарычев А.А., Морозов О.А., Митрофанов А.В., Силаев В.Ю. Анализ опыта эксплуатации активных зон атомных ледоколов первого поколения. База данных в обоснование и развитие новых атомных ледоколов и плавучих энергоблоков. *Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок*. 2023;3(33):16–24.

5. Зверев Д.Л., Фадеев Ю.П., Пахомов А.Н., Галицких В.Ю., Полуничев В.И., Вешняков К.Б., Кабин С.В., Турусов А.Ю. Реакторные установки для атомных ледоколов. Опыт создания и современное состояние. *Атомная энергия*. 2020;129(1):29–37. URL: <https://j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/3200> (дата обращения 20.11.2025).

6. Романов А.И., Папотин В.Ю., Тутуркин М.Ю. Разработка активных зон для АСММ и ПЭБ. Текущее состояние и направления развития. *ВАНТ. Сер.: Материаловедение и новые материалы*. 2023;5:86–111.

7. Зверев Д.Л., Самойлов О.Б., Морозов О.А., Захарычев А.А., Силаев В.Ю., Матяш П.Б., Вишнев А.Ю., Кашка М.М., Дарбинян О.Э. Активные зоны действующих атомных ледоколов. *Судостроение*. 2020;1:13–16.

8. Кулаков Г.В., Ватулин А.В., Ершов С.А., Коновалов Ю.В., Морозов А.В., Савченко А.М., Сорокин В.И., Романов А.И., Морозов О.А., Шишин В.Ю., Шельдяков А.А. Разработка топлива для атомных станций малой мощности и плавучих энергоблоков, состояние и перспективы. *ВАНТ. Сер.: Материаловедение и новые материалы*. 2020;1:116–128.

9. Захарычев А.А., Иксанова Г.Ш., Куприянов А.В., Осин А.Б., Петрунин В.В., Самойлов О.Б., Шипов Д.Л. Методические вопросы и некоторые результаты экспериментальных и расчетных

исследований критических тепловых потоков в ТВС реактора РИТМ-200 для АСММ. *Атомная энергия*. 2021;130(2):63–68. URL: <https://j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/4266> (дата обращения 20.11.2025).

10. Гухман А.А. Введение в теорию подобия. М.: Высшая школа, 1973, 296 с.

11. Гухман А.А. Применение теории подобия к исследованию процессов тепло-массообмена (процессы переноса в движущейся среде). М.: Высшая школа, 1974, 328 с.

12. Дмитриев С.М., Герасимов А.В., Добров А.А., Доронков Д.В., Пронин А.Н., Рязанов А.В., Солнцев Д.Н., Хробостов А.Е., Носков А.С., Самойлов О.Б., Швецов Ю.К., Шипов Д.Л. Экспериментальное исследование течения потока теплоносителя в активной зоне реактора ВВЭР с ТВСА. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2020;4:25–36. DOI: <https://doi.org/10.26583/pre.2020.4.03>

13. Дмитриев С.М., Герасимов А.В., Добров А.А., Доронков Д.В., Пронин А.Н., Солнцев Д.Н., Хробостов А.Е., Швецов Ю.К., Шипов Д.Л. Гидродинамика и перемешивание теплоносителя в активной зоне реактора ВВЭР с тепловыделяющими сборками различных конструкций. *Теплофизика и аэромеханика*. 2019;26(6):897–912.

Поступила в редакцию 01.04.2025

После доработки 24.11.2025

Принята к опубликованию 20.03.2026

Авторы

Дмитриев Сергей Михайлович, ректор, профессор, д.т.н.,

E-mail: dmitriev@nntu.ru

Демкина Татьяна Дмитриевна, младший научный сотрудник,

E-mail: demkina.td@mail.ru

Добров Александр Алексеевич, старший научный сотрудник,

E-mail: dobrov@nntu.ru

Доронков Денис Владимирович, старший научный сотрудник, к.т.н.,

E-mail: nevid000@mail.ru

Пронин Алексей Николаевич, старший научный сотрудник,

E-mail: proninaleksei@mail.ru

Рязанов Антон Владимирович, старший научный сотрудник,

E-mail: riazanov.av@nntu.ru

Карпухов Олег Олегович, ведущий инженер-конструктор,

E-mail: karpuhovo@okbm.nnov.ru

Самойлов Олег Борисович, советник директора, профессор, д.т.н.,

E-mail: dep48_teplofiz@okbm.nnov.ru

Шипов Дмитрий Леонидович, ведущий специалист, к.т.н.,

E-mail: dep48_teplofiz@okbm.nnov.ru

UDC 621.039

Hydrodynamics of Turbulent Coolant Flow at the Outlet of the Fuel Assembly of the RITM Reactor of a Low-Power Nuclear Power Plant**Dmitriev S.M.¹, Demkina T.D.¹, Dobrov A.A.¹, Doronkov D.V.¹, Pronin A.N.¹, Ryazanov A.V.¹, Karpukhov O.O.², Samoiloov O.B.², Shipov D.L.²**¹ *Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev,
24 Minina St., 603155 Nizhny Novgorod, Russia*² *JSC "OKBM Afrikantov",
15 Burnakovskiy Pr., 603079 Nizhny Novgorod, Russia***Abstract**

The article presents the results of an experimental study and comparative analysis of the coolant hydrodynamics at the outlet of a fuel assembly with heads of three different designs. Fuel assemblies are designed for the core of the RITM reactor of a low-power nuclear power plant. The objective of the work was to study the axial flow velocity at the outlet of the fuel element bundle and behind heads of different designs, as well as to determine the areas of the fuel element bundle from which the flow is most likely to enter the selection pipe to the resistance thermometer. The experiments were carried out on a research bench with an air working environment on a model of the outlet section of the fuel assembly. The model consisted of a fragment of the fuel element bundle, as well as replaceable mock-ups of heads of three design options and a plate for installing the fuel assemblies. The pneumometric method was used to determine the axial flow velocity. The method of injection of a contrast admixture was used to identify the areas of the fuel element bundle from which the flow enters the selection pipe. The hydrodynamic pattern of the flow is presented by cartograms of the axial velocity and contrast admixture. The experimental results allowed us to detail the structure of the turbulent flow and draw the following conclusions. The shape of the flow section of the head confuser has little effect on the axial flow in front of the outlet spacer grid. The influence of the head geometry is manifested when the coolant flows out of the bundle of fuel elements. The shape of the flow section of the confuser has little effect on the axial flow velocity. The greatest contribution to the change in axial velocity is made by a decrease in the area of the flow section of the heads. The heterogeneity of the structure of flows from the head windows is determined by the selection pipe, which blocks part of the flow section. The flow flowing out of the head with three windows is the most heterogeneous. When the flow flows in the head confusers, the process of its mixing is recorded, expressed by the displacement of the impurity in the direction of the selection pipe. The greatest transverse displacement of the impurity occurs in the confuser of the head with three windows. To minimize the effect of flows with different temperatures on the resistance thermometer readings, it is necessary to use heads with three windows. The research results were used by specialists of JSC Afrikantov OKBM to substantiate engineering solutions when designing cores.

Keywords: core, fuel assembly, head, extraction pipe, coolant, axial velocity, contrast agent.

For citation: Dmitriev S.M., Demkina T.D., Dobrov A.A., Doronkov D.V., Pronin A.N., Ryazanov A.V., Karpukhov O.O., Samoiloov O.B., Shipov D.L. Hydrodynamics of Turbulent Coolant Flow at the Outlet of the Fuel Assembly of the RITM Reactor of a Low-power Nuclear Power Plant. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2026;1:52–70. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2026.1.05> (in Russian).

References

1. Petrunin V.V. Reactor Units for Small Nuclear Power Plants. *Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2021;91(3):335–346. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1019331621030126>
2. Belyaev V.M., Bol'shukhin M.A., Pakhomov A.N., Khizbullin A.M., Lepekhin A.N., Polunichev V.I., Veshnyakov K.B., Sokolov A.N., Turusov A.Y. The World's First Floating NPP: Origination and Direction of Future Development. *Atomic Energy*. 2020;129(1):27–34. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-021-00707-w>
3. Petrunin V.V., Sheshina N.V., Fateev S.A., Kurachenkov A.V., Shchekin D.V., Brykalov S.M., Bezrukov A.A. Scientific and technical aspects of developing a RITM-200N innovative reactor for SNPPS. *Atomic Energy*. 2023;134(1-2):1–10. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-023-01020-4>
4. Samoilov O.B., Romanov A.I., Galitskikh V.Y., Zakharychev A.A., Morozov O.A., Mitrofanov A.V., Silaev V.Y. Analysis of operating experience of first generation nuclear icebreaker cores. Database in support of development of new nuclear icebreakers and floating nuclear power units. *Nuclear propulsion reactor plants. Life cycle management technologies*. 2023;3:16–24. EDN: BLTGBW.
5. Zverev D.L., Fadeev Y.P., Pakhomov A.N., Galitskikh V.Y., Polunichev V.I., Veshnyakov K.B., Kabin S.V., Turusov A.Y. Reactor installations for nuclear icebreakers: origination experience and current status. *Atomic Energy*. 2020;129(1):18–26. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-021-00706-x>
6. Romanov A.I., Papotin V.Y., Tuturkin M.Y. Reactor core development for SNPP and FPU current status and development trends. *PAST. Ser.: Materials technology and new materials*. 2023;5:86–111 (in Russian).
7. Zverev D.L., Samoilov O.B., Morozov O.A., Zakharychev A.A., Silaev V.Y., Matyash P.B., Vishnev A.Yu., Kashka M.M., Darbinyan O.E. The cores of operating nuclear icebreakers. *Sudostroenie*. 2020;1:13–16 (in Russian).
8. Kulakov G.V., Vatulin A.V., Ershov S.A., Konovalov Y.V., Morozov A.V., Savchenko A.M., Sorokin V.I., Romanov A.I., Morozov O.A., Shishin V.Y., Sheldyakov A.A. Development of fuel for low power reactors and floating power units. Status and prospects. *PAST. Ser.: Materials technology and new materials*. 2020;1:116–128 (in Russian).
9. Zakharychev A.A., Iksanova G.S., Kupriyanov A.V., Osin A.B., Petrunin V.V., Samoilov O.B., Shipov D.L. Methodological issues and results of experimental and computational studies of critical heat flows in RITM-200 reactor fuel assemblies for small NPP. *Atomic Energy*. 2021;130(2):63–68. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-021-00775-y>
10. Gukhman A.A. Introduction to the theory of similarity. Moscow, High School Publ., 1973, 296 p.
11. Gukhman A.A. Application of similarity theory to the study of heat and mass transfer processes (transfer processes in a moving medium). Moscow, High School Publ., 1974, 328 p.
12. Dmitriev S.M., Gerasimov A.V., Dobrov A.A., Doronkov D.V., Pronin A.N., Ryazanov A.V., Solntsev D.N., Khrobostov A.E., Noskov A.S., Samoilov O.B., Shvetsov Yu.K., Shipov D.L. Experimental investigation of the coolant flow in the VVER reactor core with TVSA fuel assemblies. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2020;4:25–36. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2020.4.03> (in Russian).
13. Dmitriev S.M., Gerasimov A.V., Dobrov A.A., Doronkov D.V., Pronin A.N., Solntsev D.N., Khrobostov A.E., Shvetsov Y.K., Shipov D.L. Hydrodynamics and mixing of a coolant in the core of the VVER with fuel assemblies of different designs. *Thermophysics and Aeromechanics*. 2019;26(6):845–860. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0869864319060064>

Authors

Sergey M. Dmitriev, Rector, Professor, Doc. Sci. (Engineering),

E-mail: dmitriev@nntu.ru

Tatiana D. Demkina, Junior research fellow,

E-mail: demkina.td@mail.ru

Alexander A. Dobrov, Senior research fellow,

E-mail: dobrov@nntu.ru

Denis V. Doronkov, Senior research fellow, Cand. Sci. (Engineering),

E-mail: nevid000@mail.ru

Alexey N. Pronin, Senior research fellow,

E-mail: proninaleksei@mail.ru

Anton V. Ryazanov, Senior research fellow,

E-mail: riazanov.av@nntu.ru

Oleg O. Karpuhov, Lead design engineer,

E-mail: karpuhovoo@okbm.nnov.ru

Oleg B. Samoilov, General director's council, Professor, Doc. Sci. (Engineering),

E-mail: dep48_teplofiz@okbm.nnov.ru

Dmitrii L. Shipov, Leading expert, Cand. Sci. (Engineering),

E-mail: dep48_teplofiz@okbm.nnov.ru