

УДК 621.039

DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2026.3.06>

Оригинальная статья / Original paper

Гидродинамические характеристики потока в пучке тепловыделяющих элементов ТВС реактора РИТМ атомной станции малой мощности

С.М. Дмитриев, Т.Д. Демкина, А.А. Добров, Д.В. Доронков, А.Н. Пронин, А.В. Рязанов

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

Реферат. Приведены результаты экспериментального изучения гидродинамических характеристик потока в пучке тепловыделяющих элементов тепловыделяющей сборки (ТВС), предназначенной для активной зоны реактора РИТМ атомной станции малой мощности (АСММ). Эксперименты проводились на исследовательском стенде с воздушной рабочей средой с использованием теории гидродинамического подобия. Экспериментальная модель (ЭМ) – набор стержней со сложной, нерегулярной схемой расположения, имитирующий пучок тепловыделяющих элементов штатной ТВС. Оценка интенсивности поперечных течений потока за дистанционирующей решеткой (ДР) проводилась на основании анализа величин и топологии компонент вектора скорости, полученных путем применения пневмометрического метода измерения с использованием пятиканального датчика, а общая направленность поперечных течений потока определялась методом инъекции контрастной примеси. Опытные данные были представлены в виде картограмм и графических зависимостей безразмерных величин скорости и концентрации примеси. Результаты экспериментов позволили выявить неоднородность структуры поля осевой скорости потока в пучке тепловыделяющих элементов, а также направленность и интенсивность его поперечных течений. На периферии пучка фиксируются области низкой осевой скорости, сохраняющие свою структуру за ДР на расстоянии более чем $L/d_r \approx 10$. Различие величин осевой скорости в поле регулярных ячеек составило 10–15%. За ДР на расстоянии $L/d_r \approx 10$ на периферии и у центрального вытеснителя сохраняются вторичные поперечные течения потока низкой интенсивности, величина безразмерной поперечной скорости 0,08, а на их направленность оказывает влияние степень затенения ячеек пластинами ДР. Общая структура поперечных течений потока и структура поля осевой скорости преимущественно обусловлены нерегулярным шагом расположения стержней в пучке, делающим зазоры между ними неодинаковыми и значительно изменяющим направленность поперечных течений, центральным вытеснителем, создающим два типа поперечных течений: вдоль своей поверхности и от нее в поле регулярных ячеек, а также использованием в конструкции ТВС чехла, что обусловило снижение осевой скорости потока на периферии и интенсифицировало вытеснение части потока с периферии в регулярные ячейки.

Результаты исследований использованы специалистами АО «ОКБМ Африкантов» для обоснования инженерных решений при проектировании новых активных зон.

Ключевые слова: активная зона, тепловыделяющая сборка, тепловыделяющий элемент, поток, осевая скорость, поперечная скорость, контрастная примесь, поперечные течения.

Для цитирования: Дмитриев С.М., Демкина Т.Д., Добров А.А., Доронков Д.В., Пронин А.Н., Рязанов А.В. Гидродинамические характеристики потока в пучке тепловыделяющих элементов ТВС реактора РИТМ атомной станции малой мощности. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2026;3:80–94. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2026.3.06>

Введение

В настоящее время разработка и применение атомных станций малой мощности (АСММ) является одним из наиболее перспективных направлений развития атомной энергетики [1]. Использование источников энергии этого класса в Арктическом регионе Российской Федерации приобретает особую актуальность ввиду его удаленности, ограниченности сетевой инфраструктуры и стремительном развитии добывающей промышленности [2].

Госкорпорация «Росатом» разрабатывает широкий спектр проектов в области малой атомной энергетики, к которым относятся наземная АСММ, а также плавучие энергетические блоки с реакторами РИТМ [3]. Данный реактор разработан АО «ОКБМ Африкантов» и изначально предназначен для атомных ледоколов нового поколения [4, 5].

Применение судового реактора РИТМ в составе стационарного источника энергии потребовало его модернизации. Одно из направлений модернизации – увеличение продолжительности топливной кампании и, как следствие, интервала между перегрузками активной зоны до шести лет, что потребовало внести значительные изменения в ее конструкцию [6–8]. Одним из изменений конструкции активной зоны явилось удлинение тепловыделяющих элементов с 1200 до 1650 мм, что также потребовало изменить шаг расположения ДР.

Активная зона новой конструкции потребовала экспериментального и расчетного обоснования теплотехнической надежности [9], один из этапов которого – экспериментальное исследование гидродинамики теплоносителя в пучке тепловыделяющих элементов. Новые опытные данные позволяют уточнить результаты теплогидравлического расчета, лежащего в основе обоснования теплотехнической надежности. Таким образом, цель научной работы – экспериментальное определение гидродинамических характеристик потока в пучке тепловыделяющих элементов ТВС реактора РИТМ.

Исследовательский стенд и методика экспериментов

Имитация течения водяного теплоносителя осуществлялась воздушным потоком исследовательского стенда [10, 11], движущимся через проточную часть экспериментальной модели (ЭМ). Весь комплекс экспериментальных работ проведен в научно-исследовательской лаборатории теплогидравлики ядерных энергетических

установок (НИЛ ТГ ЯЭУ) в НГТУ им. Р.Е. Алексеева на основе теории гидродинамического подобия. ЭМ – набор стержней со сложной нерегулярной схемой расположения, имитирующий пучок тепловыделяющих элементов штатной ТВС (рис. 1).

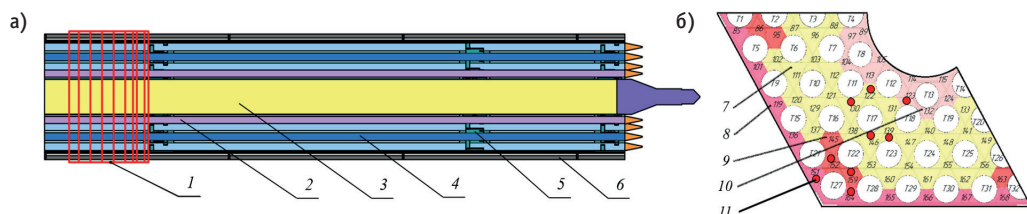


Рис. 1. Экспериментальная модель: а) продольное сечение ЭМ; б) область исследований; 1 – область измерений; 2 – стержень выгорающего поглотителя; 3 – центральный вытеснитель; 4 – стержень-имитатор тепловыделяющего элемента; 5 – ДР; 6 – уголок жесткости; 7 – зона регулярных ячеек; 8 – периферийная зона; 9 – уголковая зона; 10 – зона центрального вытеснителя; 11 – расположение ячеек инжектирования примеси

Модельный пучок стержней размещен в корпусе, имитирующем чехол штатной ТВС. Позиционирование пучка ЭМ обеспечивалось тремя имитаторами штатных ДР, состоящими из пересекающихся пластин разного профиля, располагающихся между двумя обечайками. Центральный вытеснитель устанавливается во внутренних обечайках ДР, соединенных между собой шестью уголками жесткости, а шаг их расположения в ЭМ соответствует штатному с учетом масштабного коэффициента. Все элементы ЭМ увеличены относительно натурного объекта согласно масштабному коэффициенту в 5,79 раза. ЭМ предназначалась для выявления особенностей осевой скорости, поперечных течений и перемешивания потока в пучке стержней со сложной нерегулярной схемой расположения в районе ДР.

Оценка интенсивности поперечных течений потока за ДР проводилась на основании анализа величин и топологии компонент вектора скорости, полученных пневмометрическим методом измерения с использованием пятиканального датчика. Величины компонент скорости восстанавливались путем определения зависимостей давления в каналах датчика от угла набегания потока и его скорости, полученных при тарировке. Тарировка пятиканального датчика заключалась в определении коэффициентов связывающих величины давлений в пяти каналах с величинами и направленностью компонент скорости. Погрешность определения компонент скорости потока не превышала 7%.

Исследование процесса образования поперечных течений и структуры осевой скорости потока в пучке тепловыделяющих элементов осуществлялось в области, охватывающей треть поперечного сечения ЭМ. Область исследований располагалась за ДР и включала в себя 10 сечений измерения. Выбор области исследования обусловлен асимметричностью конструкции ДР и пучка стержней. Ячейки исследуемой части поперечного сечения были разделены на четыре группы: регулярные, периферийные, уголковые и ячейки центрального вытеснителя (см. рис. 1). В каждой из групп произведено разделение на ячейки с пересечением пластин ДР (пластины образуют треугольник в центре ячейки) и без пересечения (пластины прилегают к поверхности стержней, центр ячейки свободен).

Общая направленность поперечных течений потока определялась методом инжекции контрастной примеси. Данный метод позволяет на основании анализа топологии

распространения примеси (газ пропан) судить о направленности поперечных течений и перемешивании потока. Примесь в ЭМ подавалась через впускной зонд с рассеивающим насадком, предназначенным для равномерного распределения примеси по поперечному сечению области впрыска. Отбор газовой смеси осуществлялся зондом, подключенным к газоанализатору. Погрешность определения концентрации примеси не превышала $\pm 1,5\%$. Измерение концентрации примеси производилось в тех же сечениях и точках, что и при проведении исследований пневмометрическим методом (см. рис. 1).

Опытные данные были представлены в виде картограмм и графических зависимостей безразмерных величин скорости и концентрации примеси. Безразмерные величины скорости получены соотношением локального значения скорости (W_z и W_{xy}) и скорости потока на входе в ЭМ (W_{cp}). Безразмерные величины концентрации получены соотношением локального значения концентрации (C) и максимального ее значения в сечении измерения наиболее приближенного к выходному сечению впускного зонда (C_0), при этом в данном сечении примесь должна находиться исключительно в пределах ячейки инжектирования.

Все исследования осуществлялись при величине критерия Рейнольдса 90000 и скорости воздушного потока на входе в ЭМ 36,2 м/с.

Обоснование представительности экспериментов

В ходе проведения экспериментов потоком воздуха исследовательского стенда моделировалось течение однофазного водяного теплоносителя в пучке тепловыделяющих элементов ТВС реактора РИТМ. Моделирование процессов теплообмена не осуществлялось, моделировалась только гидродинамическая структура течения турбулентного потока. Весь комплекс экспериментов основывался на теории гидродинамического подобия [12, 13]. Данная теория требует соблюдения геометрического, кинематического и динамического подобий.

Геометрическое подобие представляет собой пропорциональность размеров и равенство соответствующих углов. В гидравлике под геометрическим подобием понимают подобие тех поверхностей, которые ограничивают потоки, т.е. подобие каналов. Кинематическое подобие означает пропорциональность местных скоростей в сходственных точках и равенство углов, характеризующих направление этих скоростей. Из кинематического подобия вытекает геометрическое подобие линий тока, поэтому для кинематического подобия требуется геометрическое подобие каналов. Динамическое подобие – это пропорциональность сил, действующих на сходственные объемы в кинематически подобных потоках, и равенство углов, характеризующих направление этих сил.

В потоках жидкостей обычно действуют разные силы: силы давления, вязкости, инерции и др. Соблюдение их пропорциональности означает полное гидродинамическое подобие. Осуществление на практике полного гидродинамического подобия оказывается весьма затруднительным или невозможным, поэтому применяют частичное гидродинамическое подобие, при котором соблюдается пропорциональность лишь основных, главных сил. Частичное гидродинамическое подобие потоков в натуре

и модели можно охарактеризовать с помощью критериев подобия и выражать все подобные величины в относительных единицах.

Критерии, полученные из динамического уравнения движения, являются мерой соотношения сил, действующих в движущейся жидкости, и определяют важные свойства процесса. К основным критериям подобия, применяемым при проведении данного класса экспериментов, можно отнести критерии Фруда (Fr), Эйлера (Eu) и Рейнольдса (Re).

Fr характеризует соотношение между инерционными силами и силами тяжести в потоке жидкости. Поэтому данный критерий является существенным в тех случаях, когда гравитационные эффекты играют заметную роль. Fr определяется согласно следующему соотношению:

$$Fr = \frac{W}{\sqrt{L \cdot g}} \quad (1)$$

где W – характерная скорость движения сред, м/с; L – характерный размер, м; g – ускорение свободного падения, м/с².

В качестве характерной скорости движения среды выбраны среднерасходная скорость движения водяного теплоносителя в пучке твэлов активной зоны реактора РИТМ – 2 м/с и среднерасходная скорость воздушного потока в пучке стержней-имитаторов ЭМ – 36,2 м/с. В качестве характерного размера выбраны диаметры стержней-имитаторов твэлов ЭМ (40 мм) и штатных твэлов активной зоны реактора РИТМ (6,9 мм). По результатам вычислений $Fr_{\text{модели}}$ составил 57,8, а $Fr_{\text{штатного объекта}} – 7,7$.

Re характеризует соотношение между инерционными силами и силами вязкости в потоке жидкости или газа. Известно, что в пучке твэлов активной зоны реактора РИТМ критерий Re составляет 110000, а при проведении экспериментальных исследований величина критерия Re составила 90000.

Eu характеризует соотношение между силами давления и инерционными силами в потоке жидкости или газа. Eu определяется согласно следующей формуле:

$$Eu = \frac{\Delta P}{\rho \cdot W^2}, \quad (2)$$

где W – характерная скорость движения сред, м/с; ΔP – перепад давления, Па; ρ – плотность среды, кг/м³.

Представим перепад давления ΔP в виде соотношения:

$$\Delta P = \xi \cdot \frac{\rho \cdot W^2}{2}, \quad (3)$$

где ξ – коэффициент гидравлического сопротивления (КГС).

С учетом соотношения (3) формула (2) примет следующий вид:

$$Eu = \frac{\xi}{2}, \quad (4)$$

где ξ – КГС.

В ходе проведения исследований были определены КГС элементов ЭМ, к которым относятся ДР и фрагмент пучка стержней. Величины КГС ДР и сопротивления трения пучка стержней ЭМ были определены с погрешностью, не превышающей 3%. Величина КГС ДР составила 0,27, а фрагмента пучка стержней 0,023. Сравнение значений КГС ДР, полученных в НГТУ им. Р.Е. Алексеева на воздушной рабочей среде и в АО «ОКБМ Африкантов» на водяной рабочей среде при штатных величинах критерия Re , показало их соответствие. Таким образом, проведя вычисления согласно соотношению (4), получим, что $Eu_{\text{модели}} = Eu_{\text{штатного объекта}} = 0,135$. Результаты вычисления критериев подобия собраны в табл. 1.

Таблица 1

Результаты вычисления критериев подобия

Критерий Рейнольдса		Критерий Эйлера		Критерий Фруда	
модель	штатный объект	модель	штатный объект	модель	штатный объект
90000	110000	0,135	0,135	57,8	7,7
Частичное соответствие		Соответствие		Отсутствие соответствия	

Таким образом, проводя экспериментальные работы в области несжимаемости воздушного потока, при близких величинах критерия Re , подобности геометрических характеристик ЭМ с учетом коэффициента геометрического подобия 5,79, соответствии критерия Eu и отсутствии соответствия критерия Fr можно утверждать наличие частичного гидродинамического подобия потоков в штатном объекте и ЭМ.

Результаты экспериментальных исследований

Анализ результатов исследований гидродинамических характеристик потока пневмометрическим методом позволил сделать нижепредставленные выводы.

За пластинами ДР (на расстоянии $L/d_r = 0,25$) формируется неоднородность осевой и поперечных скоростей потока. Неоднородность осевой скорости потока зависит главным образом от типа ячейки, образованной пластинами ДР, и способа их пересечения.

На периферии присутствует существенная неоднородность осевой скорости потока в ячейках с пересечением пластин ДР; в центре этих ячеек скорость на 13% ниже, чем в ячейках без него. Это может быть обусловлено перетеканием потока в ячейки без пересечения пластин из ячеек с их пересечением, что подтверждается наличием в них обширных областей со значительными безразмерными поперечными скоростями – 0,08 – 0,15.

В зоне угловых ячеек величина безразмерной осевой скорости потока – 0,8 – 1,1, в ячейках с пересечением пластин ДР в центре величина осевой скорости ниже на 12%, чем без пересечения.

В ячейках, расположенных вблизи центрального вытеснителя, величина безразмерной осевой скорости 0,8 – 1,2; влияния типа ячейки, обусловленного положением пластин ДР, не наблюдается.

В регулярных ячейках формируется ярко выраженная неоднородность осевой скорости потока. В ячейках без пересечения пластин ДР поле осевой скорости од-

нородно, а ее безразмерная величина составила 1,0–1,2. В ячейках с пересечением пластин в центре не формируется равномерного поля осевой скорости, что может быть обусловлено влиянием пластин, при этом величина скорости на 10% ниже, чем в ячейках без пересечения пластин.

Распределение поперечных скоростей потока за ДР неоднородно. За пластинами располагаются области с наибольшими поперечными скоростями – 0,1–0,2, при этом размеры данных областей зависят от расположения пластин, а также их ширины; так за широкими пластинами формируются наибольшие области с высокими поперечными скоростями (рис. 2б).

При движении потока по длине пучка наблюдается низкоинтенсивный процесс выравнивания неравномерности распределения осевой скорости потока (рис. 2, 3).

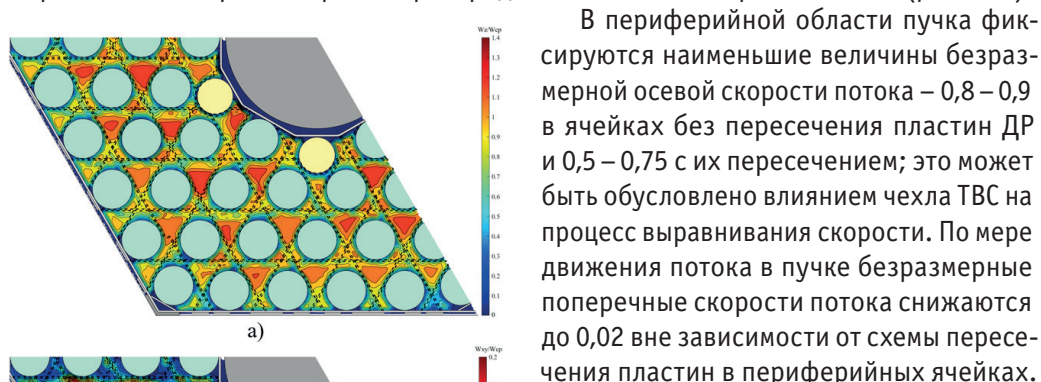


Рис. 2. Картограммы поля безразмерной скорости потока на расстоянии $L/d_r \approx 0,25$ от пластин ДР: а) осевая скорость потока; б) поперечные скорости потока

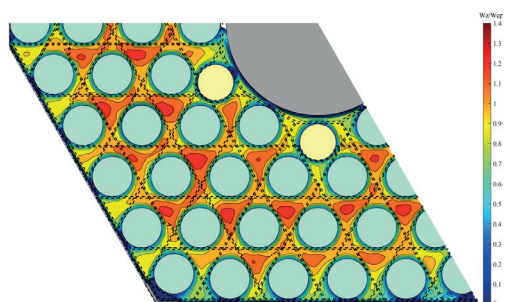


Рис. 3. Картограммы поля безразмерной осевой скорости потока на расстоянии $L/d_r \approx 10$ от пластин ДР

В периферийной области пучка фиксируются наименьшие величины безразмерной осевой скорости потока – 0,8–0,9 в ячейках без пересечения пластин ДР и 0,5–0,75 с их пересечением; это может быть обусловлено влиянием чехла ТВС на процесс выравнивания скорости. По мере движения потока в пучке безразмерные поперечные скорости потока снижаются до 0,02 вне зависимости от схемы пересечения пластин в периферийных ячейках.

В угловых ячейках и ячейках возле центрального вытеснителя на расстоянии $L/d_r \approx 9–10$ от ДР величина безразмерной осевой скорости потока в ячейках с разной схемой пересечения пластин имеет близкие значения, так в ячейках без пересечения пластин осевая скорость потока составила 0,9–1,0, а с пересечением 0,85–0,95 (см. рис. 3).

В области регулярных ячеек на расстоянии $L/d_r \approx 3–4$ от ДР усредненная безразмерная осевая скорость потока в ячейках практически не изменяется, в ячейках без пересечения пластин величина осевой скорости находится вблизи 1,1, а в ячейках с пересечением пластин вблизи 1,0.

Для всех типов ячеек кроме тех, которые расположены в области центрального вытеснителя, величина усредненной поперечной скорости по мере движения потока снижается и составляет 0,02–0,03, при этом наблюдается незначительный рост величины

поперечной скорости до 0,04–0,05 в области примыкания смежных ячеек без пересечения и с пересечением пластин. Наибольшие величины безразмерных поперечных скоростей потока сохраняются в области центрального вытеснителя в ячейках с пересечением пластин ДР, составившие 0,05–0,06 (а локально достигающие 0,16); это может быть вызвано направленным поперечным течением потока вокруг центрального вытеснителя.

Результаты исследований гидродинамических характеристик потока в пучке тепловыделяющих элементов, полученных с использованием пневмометрического метода измерений, в дальнейшем использованы в качестве базы опытных данных для валидации программного комплекса ЛОГОС.

Анализ результатов экспериментальных исследований гидродинамических характеристик потока в пучке тепловыделяющих элементов методом контрастной примеси позволил сделать нижепредставленные выводы.

На периферии пучка направленность поперечных течений потока во многом зависит от типа пересечения пластин ДР в ячейках. Наличие пересечения пластин усиливает процесс вытеснения потока из периферийных ячеек в направлении регулярных, а поперечные течения, ориентированные внутри периферийной области между ячейками с пересечением пластин, практически отсутствуют. Между ячейками без пересечения пластин фиксируются поперечные течения, ориентированные внутри периферийной области, при этом процесс вытеснения потока из ячеек данного вида менее интенсивен, что подтверждается топологией растекания контрастной примеси, приведенной на рис. 4.

При подаче примеси в периферийную ячейку без пересечения пластин ДР растекание примеси по мере движения потока в пучке имеет менее интенсивный характер в сравнении со случаем подачи примеси в ячейку с пересечением пластин (см. рис. 4), о чем свидетельствует большая на 30% область растекания примеси на расстоянии $L/d_r \approx 10$ от ДР, при этом отмечается, что величина осредненной безразмерной концентрации существенно изменяется на расстоянии $L/d_r \approx 2 - 3$ от ДР вне зависимости от типа ячейки подачи примеси.

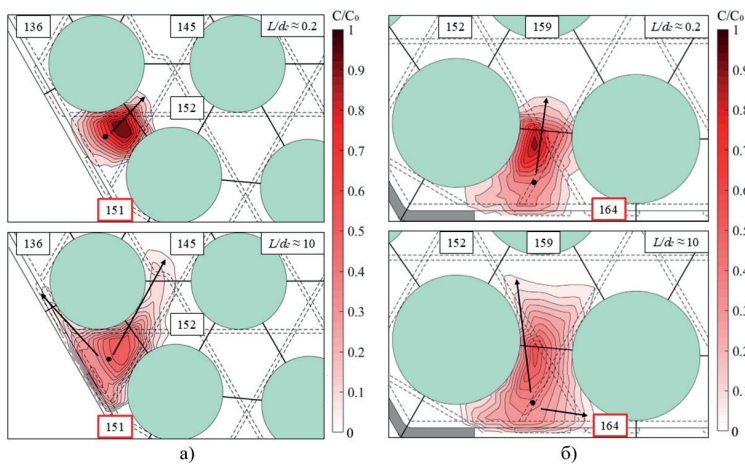


Рис. 4. Картограммы безразмерной концентрации примеси при ее подаче в периферийные ячейки: а) ячейка без пересечения пластин; б) ячейка с пересечением пластин

Для обоих типов периферийных ячеек характерна направленность распространения примеси преимущественно в область регулярных ячеек, а тип пресечения пластин ДР оказывает влияние только на интенсивность данного процесса.

В регулярных ячейках, соседствующих с периферийными, структура поперечных течений потока преимущественно ориентирована в направлении периферийных ячеек без пересечения пластин ДР. Такая картина поперечных течений характерна для всех регулярных ячеек данной области независимо от типа пересечения пластин и обусловлена более интенсивным процессом вытеснения потока из периферийных ячеек с пересечением пластин по сравнению с процессом вытеснения без их пересечения. Таким образом, между периферийными ячейками без пересечения пластин и соседствующими с ними регулярными ячейками фиксируется взаимный обмен долями расхода потока.

При подаче примеси в регулярные ячейки, которые соседствуют с периферийными, фиксируется, что наибольшая область растекания примеси из ячейки с пересечением пластин ДР, однако независимо от ячейки подачи отмечается направленность растекания примеси в сторону периферийной ячейки без пересечения пластин. Независимо от ячейки подачи осредненная величина концентрации примеси в ячейке подачи снижается с 0,5 до 0,4 на расстоянии $L/d_r \approx 2-3$ от ДР, а в соседних ячейках стабилизируется на уровне 0,05 – 0,12.

Возле центрального вытеснителя поперечные течения потока имеют два типа направленности – вокруг вытеснителя и от него в направлении регулярных ячеек. Структура поперечных течений определяется преимущественно сложной геометрией расположения пучка вокруг вытеснителя, для которой характерно наличие нерегулярного шага расположения стержней при их различающихся диаметрах. На направленность и интенсивность поперечных течений геометрия пластин ДР в ячейках не оказывает значительного влияния. В области центрального вытеснителя независимо от способа пересечения пластин ДР в ячейках наблюдается процесс перетекания примеси в направлении к центральному вытеснителю, что обусловлено захватом части контрастной примеси поперечным потоком, направленным вокруг вытеснителя. Одновременно с этим на расстоянии $L/d_r \approx 10$ от ДР фиксируется сонаправленное растекание примеси из ячеек инжектирования независимо от типа пересечения пластин в них от центрального вытеснителя (рис. 5). Распределение по длине пучка осредненной безразмерной концентрации примеси имеет нисходящий характер в ячейках подачи, при этом в ячейке с пересечением пластин снижение концентрации протекает наиболее интенсивно, концентрация на расстоянии $L/d_r \approx 10$ от ДР снизилась в 2,4 раза, в то время как при подаче примеси в ячейку без пересечения снизилась в 1,6 раза.

В регулярных ячейках, приближенных к ячейкам области центрального вытеснителя, фиксируется влияние поперечных течений потока, направленных от вытеснителя, что характеризуется неоднородностью топологии распространения примеси из регулярной ячейки в соседние. В регулярных ячейках, равноудаленных от периферии и вытеснителя, структура образования поперечных течений изотропна и не зависит от типа пересечения пластин ДР, поперечные течения направлены через зазоры между стержнями с близкой интенсивностью.

Распределения осредненной безразмерной величины концентрации примеси по мере удаления от ДР имеют схожий вид, при этом в смежных ячейках при удалении

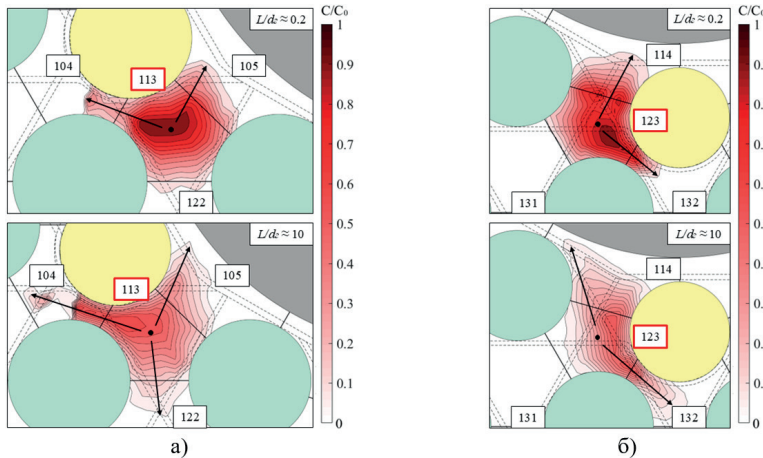


Рис. 5. Картограммы безразмерной концентрации примеси при ее подаче в ячейки, расположенные возле центрального вытеснителя: а) ячейка без пересечения пластин; б) ячейка с пересечением пластин

от ДР на расстояние $L/d_r \approx 4 - 5$ величина концентрации выравнивается и при дальнейшем удалении не претерпевает значительных изменений. В регулярных ячейках, приближенных к ячейкам вытеснителя, осредненная концентрация примеси стабилизируется на уровне 0,5, а в регулярных ячейках, равноудаленных от центральной и периферийной областей, составляет 0,3 – 0,35. Такое различие в величине концентрации примеси может быть обусловлено отличием структуры поля скорости.

Таким образом, структура поперечных течений обусловлена

- нерегулярным шагом расположения стержней в пучке, делающим зазоры между ними неодинаковыми и значительно изменяющим направленность поперечных течений;
- наличием центрального вытеснителя, создающим два типа поперечных течений: вдоль своей поверхности и от нее, что искажает структуру потока в регулярной области;
- использованием в конструкции ТВС чехла, что обусловило снижение скорости потока на периферии и интенсифицировало вытеснение части потока в регулярные ячейки.

Результаты исследований гидродинамических характеристик потока в пучке тепловыделяющих элементов методом инъекции контрастной примеси в дальнейшем использованы при разработке матрицы перемешивания потока для уточнения методики теплогидравлического расчета в коде КАНАЛ.

Заключение

Проведен комплекс экспериментальных исследований гидродинамики теплоносителя в пучке тепловыделяющих элементов ТВС реактора РИТМ. Величины компонент вектора скорости потока получены с погрешностью, не превышающей 7%. Определение общей направленности поперечных течений было произведено с применением метода инъекции контрастной примеси, значения концентрации примеси получены с погрешностью не более 1,5%. Величины КГС ДР и сопротивления трения пучка стержней определены с погрешностью, не превышающей 3%.

Экспериментально определена неоднородность структуры осевой скорости потока в пучке тепловыделяющих элементов. На структуру осевой скорости потока, направленность и интенсивность поперечных течений оказывают влияние нерегулярная структура пучка стержней, центральный вытеснитель, чехол ТВС и сложная схема пересечения пластин ДР.

На периферии пучка тепловыделяющих элементов фиксируются области низкой осевой скорости потока, сохраняющие свою структуру за ДР на расстоянии более чем $L/d_r \approx 10$. На величину скорости в данной области влияние оказывает схема пересечения пластин ДР.

Неоднородная структура осевой скорости потока в поле регулярных ячеек обусловлена схемой пересечения пластин ДР, создающих чередующиеся локальные препятствия потоку в ячейках, приводящих к разной величине осевой скорости в них, отличающейся на 10–15%.

В пучке тепловыделяющих элементов за ДР на расстоянии $L/d_r \approx 10$ на периферии и возле центрального вытеснителя сохраняются поперечные течения потока низкой интенсивности, величина безразмерной поперечной скорости потока не превышает 0,08.

На направленность поперечных течений на периферии пучка оказывает влияние степень затеснения ячеек пластинами ДР, зависящая от схемы их пересечения. Пересечение пластин в центре ячейки перенаправляет поперечные течения потока с периферии в центральную область, а отсутствие пластин в центре ячейки перенаправляет поперечные течения в обратном направлении.

Общая структура поперечных течений потока преимущественно обусловлена нерегулярным шагом расположения стержней, делающим зазоры между ними неодинаковыми и изменяющим направленность поперечных течений, центральным вытеснителем, создающим два типа течений: вдоль своей поверхности и от нее в поле регулярных ячеек, а также использованием в конструкции ТВС чехла, что обусловило снижение скорости потока на периферии и интенсифицировало вытеснение части потока в регулярные ячейки.

Целесообразно использование перемешивающих решеток-интенсификаторов для создания поперечных течений высокой интенсивности в пучке стержней для гомогенизации характеристик потока.

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;134(1–2):37–43. URL: <https://j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/3201> (дата обращения 10.08.2026).
3. Петрунин В.В., Шешина Н.В., Фатеев С.А., Кураченков 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(1–2):3–11. URL: <https://j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/5265> (дата обращения 10.08.2026).

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 10.08.2026).
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 10.08.2026).
10. 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>
11. 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.
12. Гухман А.А. Введение в теорию подобия. М.: Высшая школа, 1973, 296 с.
13. Гухман А.А. Применение теории подобия к исследованию процессов тепло-массообмена (процессы переноса в движущейся среде). М.: Высшая школа, 1974, 328 с.

Поступила в редакцию 30.03.2026

После доработки 18.08.2026

Принята к опубликованию 10.09.2026

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

UDC 621.039

Hydrodynamic Characteristics of Flow in a Fuel Rod Bundle of a Fuel Assembly for the RITM Reactor of a Low-Power Nuclear Power Plant

Dmitriev S.M., Demkina T.D., Dobrov A.A., Doronkov D.V., Pronin A.N., Ryazanov A.V.

*Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev,
24 Minin St., 603155 Nizhny Novgorod, Russia*

Abstract

The article presents the results of an experimental study of the hydrodynamic characteristics of flow in a fuel rod bundle of a fuel assembly (FA) intended for the core of the RITM reactor of a low-power nuclear power plant (LNPP, SMR). The experiments were carried out on a research test bench with an air working medium using the theory of hydrodynamic modeling. The experimental model is a set of rods with a complex, irregular arrangement pattern, simulating a fuel rod bundle of a standard FA. The assessment of the intensity of secondary flows behind a spacer grid (SG) was carried out based on the analysis of the values and topology of the velocity vector components obtained by applying a pneumometric measurement method using a five-channel probe, and the overall direction of the secondary flows was determined by the method of injecting a contrast tracer. The experimental data were presented in the form of cartograms and graphical dependences of dimensionless quantities of velocity and tracer concentration. The experimental results made it possible to reveal the heterogeneity of the axial flow velocity field structure in the fuel rod bundle, as well as the direction and intensity of its secondary flows. At the periphery of the fuel rod bundle, areas of low axial flow velocity are recorded, retaining their structure behind the SG at a distance of more than $L/d_h \approx 10$. The difference in axial velocity values in the field of regular cells averaged 10–15%. Behind the SG at a distance of $L/d_h \approx 10$, at the periphery and near the central displacer, low-intensity secondary transverse flows persist, the value of the dimensionless transverse velocity being ≈ 0.08 , and their direction is influenced by the degree of crowding of cells by the SG plates. The overall structure of the secondary transverse flows and the structure of the axial velocity field are mainly due to the irregular pitch of the rods in the bundle, which makes the gaps between them uneven and significantly changes the direction of secondary flows; the central displacer, which creates two types of secondary flows: along its surface and away from it into the field of regular cells; as well as the use of a shroud in the FA design, which caused a decrease in the axial flow velocity at the periphery and intensified the displacement of part of the flow from the periphery into the regular cells. The research results have been used by specialists of JSC “Afrikantov OKBM” to substantiate engineering solutions in the design of cores.

Keywords: core, fuel assembly, fuel rod, flow, axial velocity, transverse velocity, contrast tracer, secondary flows.

For citation: Dmitriev S.M., Demkina T.D., Dobrov A.A., Doronkov D.V., Pronin A.N., Ryazanov A.V. Hydrodynamic Characteristics of Flow in a Fuel Rod Bundle of a Fuel Assembly for the RITM Reactor of a Low-Power Nuclear Power Plant. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2026;3:80–94. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2026.3.06> (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 (in Russian).
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. 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).
11. 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>
12. Gukhman A.A. Introduction to the theory of similarity. Moscow, High School Publ., 1973, 296 p.
13. 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.

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