

УДК 621.039

EDN XLUEIK

**РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ
ВЫБОРА МОДЕЛИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ
ДЛЯ АНАЛИЗА ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАСХОДОВ
В ПРИЗМАТИЧЕСКОЙ АКТИВНОЙ ЗОНЕ
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ГАЗООХЛАЖДАЕМОГО РЕАКТОРА**

Д.Д. Курицин

ORCID: 0000-0001-9384-6950 e-mail: kuritsin.dd@nntu.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Д.В. Доронков

ORCID: 0000-0003-0668-4215 e-mail: doronkov.dv@nntu.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Д.С. Николаев

ORCID: 0000-0003-2244-4780 e-mail: nikolaev.ds@nntu.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

А.В. Рязанов

ORCID: 0000-0002-4951-8930 e-mail: riazanov.av@nntu.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Д.Н. Солнцев

ORCID: 0000-0002-1756-2363 e-mail: solntsev@nntu.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

М.А. Легчанов

ORCID: 0000-0002-6195-3804 e-mail: legchanov@nntu.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Д.А. Кудряшов

ORCID: 0009-0001-1189-0788 e-mail: kud1904@rambler.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Представлены результаты валидации моделей турбулентности k-epsilon, SST и BSL RSM применительно к моделированию течения теплоносителя в геометрии, характерной для призматической активной зоны высокотемпературного газоохлаждаемого реактора (ВТГР). Исследования выполнены на экспериментальном стенде, воспроизводящем центральное продольное сечение топливной колонны с каналом ПС СУЗ, пятью каналами охлаждения и двумя межблочными зазорами. Измерения полей скорости проводились методом лазерной доплеровской анемометрии в диапазоне $Re = 17500-27000$. Численное моделирование выполнялось в ANSYS CFX v.22. Установлено, что распределение расхода по каналам модели не зависит от режима течения: доля расхода через

межблочные зазоры составляет 2,0-2,2 %, через канал ПС СУЗ – 27-28 %, через каждый из пяти каналов охлаждения не превышает 14 %. Модели SST и BSL RSM показали удовлетворительное согласование с экспериментом: отклонения в межблочных зазорах не превышают 7-8 %, в каналах охлаждения – 3 %. Модель k-epsilon систематически завышает байпасный расход на 14-16%.

Ключевые слова: высокотемпературный газоохлаждаемый реактор; призматическая активная зона; байпасное течение; межблочный радиальный зазор; CFD-моделирование; валидация моделей турбулентности; лазерная доплеровская анемометрия.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Курицин, Д.Д. Расчетно-экспериментальное обоснование выбора модели турбулентности для анализа перераспределения расходов в призматической активной зоне высокотемпературного газоохлаждаемого реактора / Д.Д. Курицин, Д.В. Доронков, Д.С. Николаев, А.В. Рязанов, Д.Н. Солнцев, М.А. Легчанов, Д.А. Кудряшов // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2026. № 2. С. 57-69. EDN XLUEIK

COMPUTATIONAL AND EXPERIMENTAL VALIDATION OF TURBULENCE MODELS FOR FLOW DISTRIBUTION ANALYSIS IN A PRISMATIC CORE OF HIGH TEMPERATURE GAS COOLED REACTOR

D.D. Kuritsin

ORCID: 0000-0001-9384-6950 e-mail: kuritsin.dd@nntu.ru
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

D.V. Doronkov

ORCID: 0000-0003-0668-4215 e-mail: doronkov.dv@nntu.ru
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

D.S. Nikolaev

ORCID: 0000-0003-2244-4780 e-mail: nikolaev.ds@nntu.ru
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

A.V. Ryazanov

ORCID: 0000-0002-4951-8930 e-mail: riazanov.av@nntu.ru
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

D.N. Solntsev

ORCID: 0000-0002-1756-2363 e-mail: solntsev@nntu.ru
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

M.A. Legchanov

ORCID: 0000-0002-6195-3804 e-mail: legchanov@nntu.ru
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

D.A. Kudryashov

ORCID: 0009-0001-1189-0788 e-mail: kud1904@rambler.ru
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The paper presents validation results for the k -epsilon, SST, and BSL RSM turbulence models applied to coolant flow simulation in a geometry typical of a prismatic core of a high-temperature gas-cooled reactor (HTGR). Experimental studies were carried out on a planar aerodynamic test bench representing the central longitudinal section of a fuel column with a control rod channel, five cooling channels, and two bypass gaps. Velocity field measurements were performed using laser Doppler anemometry within the Reynolds number range of 17,500-27,000. Numerical simulations were conducted in ANSYS CFX v.22. The flow distribution among the model channels was found to be independent of the flow regime: the flow fraction through the bypass gaps was 2.0-2.2 %, through the control rod channel – 27-28%, and through each of the five cooling channels – approximately 14 %. The SST and BSL RSM models demonstrated satisfactory agreement with the experiment: deviations in the bypass gaps did not exceed 7-8 %, and in the cooling channels – 3 %. The k -epsilon model systematically overestimated the bypass flow rate by 14-16 %.

Key words: high-temperature gas-cooled reactor; prismatic core; bypass flow; bypass gap; CFD modeling; turbulence model validation; laser Doppler anemometry.

FOR CITATION: D.D. Kuritsin, D.S. Nikolaev, A.V. Ryazanov, D.N. Solntsev, M.A. Legchanov and D.A. Kudryashov. Computational and experimental validation of turbulence models for flow distribution analysis in a prismatic core of high temperature gas cooled reactor. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2026. № 2. Pp. 57-69. EDN XLUEIK

Введение

В условиях перехода мировой энергетики к низкоуглеродной модели и роста требований к надежности и воспроизводимости энергоснабжения атомная отрасль рассматривается как одна из немногих, способных обеспечить долгосрочную устойчивость энергетических систем. При этом ее развитие все в большей степени связывается не только с традиционной выработкой электроэнергии, но и с созданием ядерных установок, ориентированных на интеграцию с энергоемкими промышленными и химико-технологическими процессами, требующих высокопотенциального тепла, включая системы производства водорода. В этом отношении высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы (ВТГР) представляют собой перспективный тип реакторных установок, характеризующихся высокой температурой гелиевого теплоносителя на выходе из активной зоны (до 900-1000 °С) [1]. Однако использование ВТГР в составе атомных энерготехнологических станций предъявляет повышенные требования к обоснованию теплотехнической надежности активной зоны.

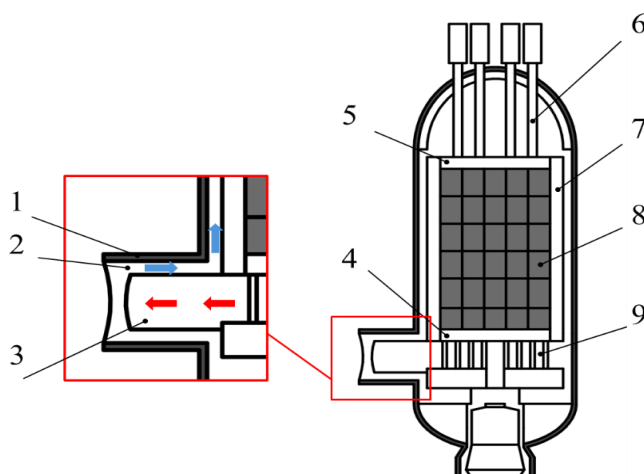


Рис. 1. Принципиальная схема реакторной установки ВТГР:

1 – соединительный корпус; 2 – кольцевой газоход; 3 – центральный горячий газоход; 4 – нижний заменяемый отражатель; 5 – верхний заменяемый отражатель; 6 – система управления и защиты; 7 – незаменяемый боковой отражатель; 8 – активная зона; 9 – нижний собирающий коллектор

Fig. 1. Schematic diagram of the HTGR:

1 – reactor vessel outer wall; 2 – annular space gas duct; 3 – tube-side gas duct; 4 – lower replaceable reflector; 5 – upper replaceable reflector; 6 – control assembly; 7 – permanent side reflector; 8 – reactor core; 9 – lower plenum coolant volume

Постановка проблемы

Активная зона (рис. 1) ВТГР формируется из графитовой кладки, состоящей из вертикальных колонн тепловыделяющих сборок (ТВС) и отражателей, собранных из отдельных призматических графитовых блоков. Ее проект предусматривает наличие как стандартных ТВС (рис. 2, а), содержащих только каналы охлаждения 1, так и сборок, предназначенных для размещения поглощающих стержней системы управления и защиты (ПС СУЗ) (рис. 2, б). В последнем случае в графитовых блоках предусматривается канал увеличенного диаметра 2, что приводит к изменению гидравлического сопротивления колонн ТВС, которое компенсируется установкой дросселирующих устройств 3 в их нижней части. Подача гелиевого теплоносителя осуществляется через кольцевой газоход, расположенный между соединительным корпусом и горячим газоходом, с последующим движением потока через активную зону в направлении сверху вниз в нижний собирающий коллектор и отводом нагретого гелия через центральный горячий газоход.

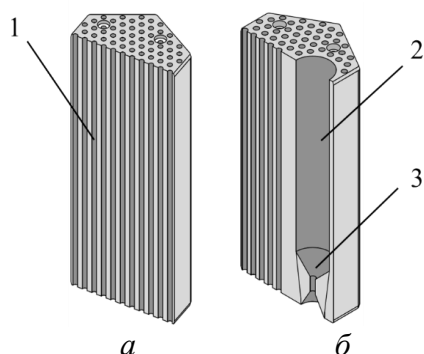


Рис. 2. Типы топливных блоков активной зоны ВТГР:

а) без канала ПС СУЗ; б) с каналом ПС СУЗ;

1 – каналы охлаждения; 2 – канал ПС СУЗ; 3 – дросселирующее устройство

Fig. 2. Types of fuel blocks in the HTGR core:

(a) without rod channel of the neutron control system; (b) with rod channel of the neutron control system;

1 – cooling channels; 2 – control rod channel; 3 – throttling device

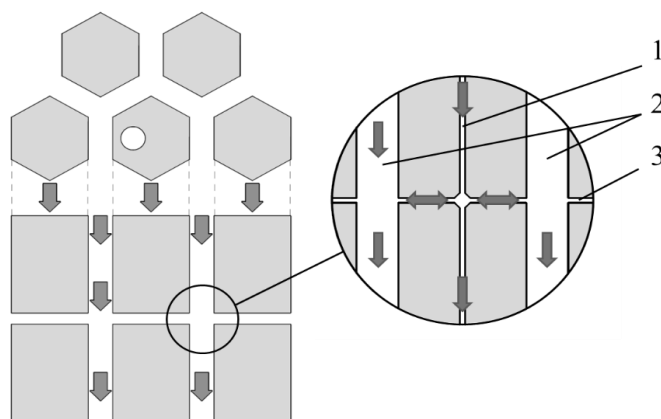


Рис. 3. Перераспределение потока теплоносителя в графитовой кладке ВТГР:

1 – межблочный радиальный зазор; 2 – канал охлаждения топливного блока; 3 – поперечный зазор

Fig. 3. Coolant flow distribution in the graphite masonry of the HTGR:

1 – bypass gap; 2 – cooling channel; 3 – crossflow gap

В процессе эксплуатации активной зоны в графитовой кладке формируются зазоры как по высоте колонн, так и между соседними колоннами (рис. 3). Величины этих зазоров определяются совокупным влиянием проектных допусков при изготовлении и сборке,

температурных деформаций, радиационно-индуцированных изменений размеров и формы графита [2] и возможных механических смещений в процессе эксплуатации. В зависимости от взаимного расположения блоков различают поперечные зазоры, возникающие между блоками одной колонны, и межблочные радиальные зазоры, образующиеся между блоками смежных колонн. Их наличие приводит к формированию обходных путей течения (т.н. «байпасных»), по которым часть гелиевого теплоносителя проходит в обход каналов охлаждения и каналов размещения ПС СУЗ. При этом процесс сопровождается перераспределением расхода теплоносителя в активной зоне, снижением эффективности теплообмена в отдельных ее участках, а также колебаниями температуры теплоносителя на выходе из активной зоны, приводящими к росту температурной неоднородности в нижнем собирающем коллекторе [3-4].

В настоящее время теплогидравлические характеристики потока в призматической активной зоне ВТГР все чаще изучаются с использованием методов вычислительной гидродинамики (CFD). В работах [5-6] выполнено трехмерное расчетное моделирование гидродинамики теплоносителя для модели 1/12 сектора призматической топливной колонны реактора GT-MHR в программном пакете ANSYS Fluent. Проводилось сравнение различных двухпараметрических моделей турбулентности при ширине межблочного радиального зазора 3 мм. Показано, что выбор модели турбулентности оказывает существенное влияние на гидравлические характеристики течения. Модель k - ω давала примерно на 10 % более высокий массовый расход через расчетную область по сравнению с k - ϵ из-за недооценки трения в охлаждающих каналах. При этом сопоставление с эмпирическими зависимостями для коэффициента трения подтвердило, что именно модель k - ϵ обеспечивает более корректное воспроизведение гидравлического сопротивления как в каналах, так и в зазорах, напрямую влияя на перераспределение расходов.

Комплекс работ [7-8] проводился в пакете ANSYS CFX с моделью турбулентности SST. Геометрия включала 7 топливных колонн (по 4 ТВС в каждой). Рассматривались ширины межблочных радиальных зазоров 2, 4 и 6 мм, а также вариант неравномерного распределения зазора по высоте, имитирующий состояние активной зоны к концу топливной кампании. Результаты показали, что доля байпасного расхода резко возрастает с увеличением ширины зазора — от 8,5 % при 2 мм до 44,5 % при 6 мм. По мере продвижения потока к выходу доля байпасного расхода уменьшается за счет перераспределения между радиальными зазорами и охлаждающими каналами. В работах [9-10] проведено сопоставление результатов численного моделирования, выполненного в программе STAR-CCM+ с экспериментальными данными. Экспериментальная модель включала 3 упрощенных призматических блока реактора GT-MHR с межблочным радиальным зазором 2,7, 4,4 и 6,1 мм. Сравнивались модели k - ϵ , k - ω и RSM. Различия между двухпараметрическими моделями (k - ϵ и k - ω) по доле байпасного расхода и перепаду давления оказались минимальны (не более 0,5 %). Модель RSM относительно них давала отклонения до 2 %. Сопоставление с экспериментом показало хорошее согласование для зазоров 4,4 и 6,1 мм (отклонения по байпасному расходу не более 3 %). Однако для минимального зазора 2,7 мм все модели систематически завышали долю байпасного потока на 5-7 %. В работе [11] выполнен кросс-верификационный анализ теплогидравлических характеристик колонны активной зоны ВТГР с использованием ANSYS CFX, ANSYS Fluent и FlowVision. В ANSYS CFX и Fluent применялась модель SST, в FlowVision — k - ϵ . Сопоставление показало удовлетворительное качественное и количественное согласование по ключевым параметрам: температуре графита, температуре теплоносителя на выходе и величине его подогрева в активной зоне.

Анализ показывает, что одним из факторов, влияющих на теплогидравлические характеристики призматической активной зоны ВТГР, является формирование байпасного потока в межблочных радиальных зазорах. Представленные расчеты демонстрируют, что доля байпасного расхода существенно зависит от геометрии зазоров и может достигать 4-7 % от расхода через активную зону. Такое перераспределение потока приводит к снижению расхода тепло-

носителя в охлаждающих каналах топлива и формированию температурных неравномерностей в графитовой кладке. Поэтому при обосновании теплотехнической надежности активной зоны ВТГР учет байпасного течения является необходимым элементом теплогидравлического расчета. В то же время анализ работ показал отсутствие универсальной модели турбулентности, позволяющей с достаточной точностью описывать гидродинамику теплоносителя в каналах графитовой кладки ВТГР. Сопоставление с экспериментальными данными демонстрирует, что в узких межблочных зазорах и при переходных режимах течения стандартные RANS-модели демонстрируют систематические отклонения, достигающие нескольких процентов по доле байпасного расхода. Таким образом, применяемые модели турбулентности требуют дальнейшей валидации и уточнения параметров на основе экспериментальных данных, полученных для геометрий и режимов течения, характерных для призматических активных зон ВТГР.

Описание исследовательского стенда и методики экспериментальных исследований

Для подтверждения достоверности расчетных моделей в ядерной энергетике валидационные исследования проводят на геометрически упрощенных моделях с применением прецизионных методов измерения гидродинамических характеристик потока [12-13].

В настоящей работе в качестве объекта исследования выбран фрагмент активной зоны ВТГР. Упрощение геометрии в экспериментальной модели заключалось в переходе от исходной трехмерной конфигурации к плоской геометрии центрального продольного сечения блока ТВС топливной колонны. В модели, показанной на рис. 4, воспроизведены пять каналов охлаждения 4.

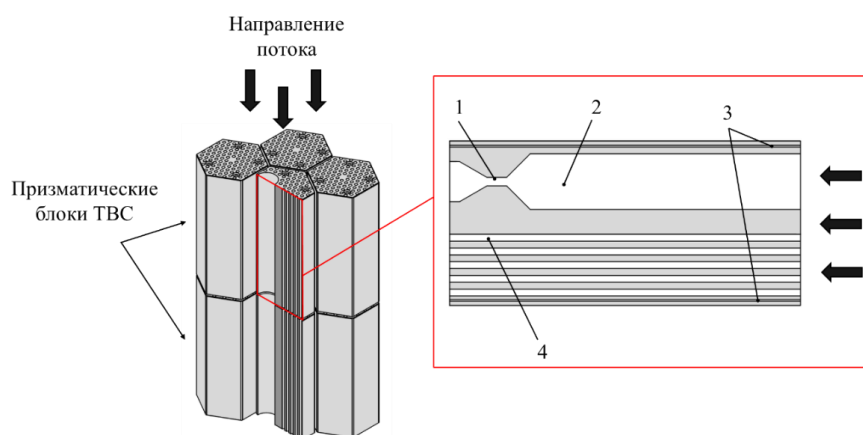


Рис. 4. Схема экспериментальной модели:

1 – дросселирующее устройство; 2 – канал для размещения поглощающего стержня системы управления и защиты; 3 – межблочный зазор; 4 – каналы охлаждения

Fig. 4. Schematic diagram of the experimental model:

1 – throttling device; 2 – control rod channel; 3 – bypass gap; 4 – cooling channels

В силу особенностей конструкции их поперечное сечение имеет прямоугольную форму, при этом линейный размер соответствует диаметру канала охлаждения топливного блока. Кроме того, в модели был учтен канал размещения поглощающего стержня системы управления и защиты (ПС СУЗ) 2, дросселирующее устройство нижней части колонны было представлено сужением 1. Для воспроизведения межблочного радиального течения предусмотрены два продольных зазора 3 в верхней и нижней части модели, имитирующие радиальные зазоры между соседними колоннами ТВС. Габаритные размеры модели составили: длина — 800 мм, ширина – 360 мм, толщина проточной части – 16 мм.

Исследовательский стенд (рис. 5) представлял собой разомкнутый аэродинамический контур, в котором с помощью напорного вентилятора обеспечивалась прокачка воздуха при температуре 25 °С. Перед входом в экспериментальную модель был предусмотрен участок, обеспечивающий формирование равномерного входного профиля скорости.

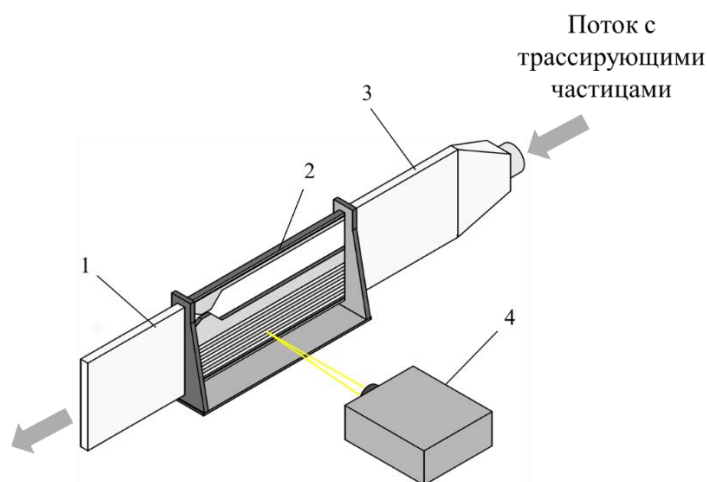


Рис. 5. Схематический вид исследовательского стенда:

*1 – выходной участок; 2- экспериментальная модель; 3 – стабилизирующий участок;
4 – лазерная доплеровская измерительная система (ЛДИС)*

Fig. 5. Schematic view of the experimental setup:

*1 – outlet section; 2 – experimental model; 3 – stabilizing section;
4 – laser Doppler anemometry system (LDA)*

Измерения поля скоростей течения рабочей среды выполнялись с использованием лазерной доплеровской измерительной системы (ЛДИС) «ЛАД-08А», обеспечивающей бесконтактное определение локальных компонент скорости с высокой пространственной и временной разрешающей способностью. Погрешность измерения скорости не превышала $\pm 0,5\%$. Принцип измерений данного прибора основан на анализе доплеровского сдвига частоты лазерного излучения, рассеянного движущимися трассирующими частицами (рис. 6). Лазерный пучок разделяется на два когерентных пучка равной интенсивности, которые сводятся в измерительном объеме. В области их пересечения образуется система прямых интерференционных полос. Трассирующие частицы, пересекая эти полосы, рассеивают свет, который собирается объективом, а затем фильтруется и регистрируется фотодетектором. В результате частота рассеянного света будет прямо пропорциональна скорости движущейся частицы.

Засев потока осуществлялся с помощью генератора аэрозольного дыма, установленного на входе вентилятора. В качестве трассирующих частиц выступали аэрозольные частицы диаметром до 5 мкм, формируемые из содержащей глицерин жидкости. Для повышения качества оптических измерений и снижения влияния паразитных отражений задняя стенка имела черную матовую поверхность. Дополнительно отраженные от передней стенки лучи экранировались путем частичного перекрытия главного объектива светопоглощающим материалом, что позволило снизить уровень фоновых оптических помех [14].

Описание методики численного моделирования

В настоящей работе численное моделирование выполнено в программном комплексе ANSYS CFX v.22. Использовались три модели турбулентности RANS: k-epsilon модель, Shear Stress Transport (SST) – модель Ментера и Baseline Reynolds Stress (BSL RSM) модель. Выбор указанных моделей турбулентности обусловлен необходимостью сопоставления подходов различной степени сложности: от двухпараметрических моделей до более физически детализированной модели на основе уравнений напряжений Рейнольдса [15]. Расчетная область точно воспроизводила геометрию экспериментальной модели. Моделирование проводилось в стационарной постановке для изотермического течения несжимаемой жидкости. На входной границе задавался массовый расход, соответствующий экспериментальным режимам; на выходе — статическое давление, равное нулю.

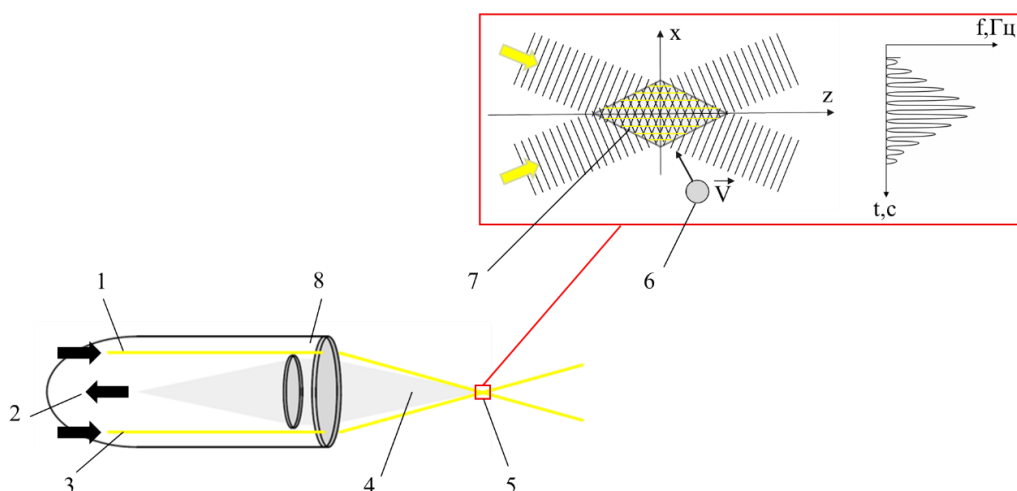


Рис. 6. Принцип работы ЛДИС:

1 – опорный пучок; 2 – выход на фотоэлектронный умножитель; 3 – частотно-сдвинутый пучок; 4 – обратное рассеяние; 5 – измерительный объем; 6 – трассирующая частица; 7 – интерференционные полосы; 8 – система объективов

Fig. 6. Operating principle of the LDA system:

1 – unshifted beam; 2 – output to photomultiplier tube; 3 – shifted beam; 4 – backscattered light; 5 – measurement volume; 6 – seeding particle; 7 – interference fringes; 8 – lens system

Генерация расчетной сетки выполнялась методом протягивания (sweep). Такой подход позволил построить структурированную сетку путем последовательного протягивания элементов вдоль оси, совпадающей с основным направлением движения потока среды. Предусматривалось сгущение ячеек в зонах входа и выхода потока. Для реализации контролируемого сгущения использовалась опция *sweep bias*. Она задает степень неравномерности при протягивании, определяя геометрическую прогрессию изменения линейных размеров ячеек вдоль выбранного направления. Благодаря этому, размер ячеек изменялся монотонно, что позволило создать области сгущения без резких скачков размеров элементов. Параметры сетки подбирались по результатам исследования сеточной независимости решения. В ходе последовательного сгущения сетки было установлено, что стабилизация гидравлических характеристик достигается при количестве элементов порядка 7,5 млн. При этом минимальный размер ячейки составлял 0,25 мм (в межблочном зазоре), а максимальный – 1 мм (в канале ПС СУЗ). Пристеночный слой разрешался с учетом требований применяемых моделей турбулентности. Для *k-epsilon* модели значение y^+ поддерживалось в диапазоне 30-100. Для SST и RSM моделей обеспечивалось разрешение вязкого подслоя ($y^+ \leq 1$).

Обоснование расхода через экспериментальную модель

Для корректного моделирования гелиевого теплоносителя необходимо выполнять равенство критерия Рейнольдса (Re) между штатной конструкцией и экспериментальной моделью. В данной работе в качестве моделируемой была взята ТВС с каналом ПС СУЗ со следующими параметрами: массовый расход через ТВС $G = 1,62$ кг/с, температура гелия на входе $T_1 = 330^\circ\text{C}$, температура на выходе $T_2 = 858^\circ\text{C}$.

Теплофизические свойства гелия определялись по следующим формулам [16].

Плотность, кг/м^3 :

$$\rho = 48,14 \cdot \frac{P}{T} \cdot \left(1 + 0,4446 \cdot \frac{P}{T^{1,2}} \right)^{-1}, \quad (1)$$

где p – давление, бар; T – температура, К.

Динамическая вязкость, Па·с:

$$\mu = 3,674 \cdot 10^{-7} \cdot T^{0,7} \quad (2)$$

где T – температура, К.

Таким образом, можно записать критерий Re как:

$$Re = \frac{W_{cp} \cdot \rho \cdot d_{гид}}{\mu} = \frac{Q}{f_{пр}} \cdot \rho \cdot d_{гид} \cdot \frac{1}{\mu}, \quad (3)$$

где W_{cp} – среднерасходная скорость через ТВС, м/с; Q – объемный расход, м³/с; $d_{гид}$ – характерный размер, м; $f_{пр}$ – проходное сечение через ТВС с учетом зазора $h = 4$ мм с соседними ТВС, м².

Площадь проходного сечения теплоносителя через ТВС вместе с зазором составляет $f_{пр} = 0,02964$ м². В качестве характерного размера был выбран диаметр канала охлаждения $d_{гид} = 0,016$ м. В табл. 1 показаны параметры в характерных сечениях ТВС, полученные согласно представленным формулам.

Таблица 1.
Характеристики теплоносителя при прохождении через ТВС
Table 1.
Coolant characteristics during flow through the fuel assembly

Температура, °С	Плотность, кг/м ³	Динамическая вязкость, 10 ⁻⁵ Па·с	Массовый расход, кг/с	Объемный расход, м ³ /с	Среднерасходная скорость, м/с	Re
330	3,167	3,25	1,62	0,51	17,26	27000
858	1,696	5,04	1,62	0,96	32,23	17500

На основании полученного диапазона штатных значений критерия Рейнольдса (Re) был определен необходимый расход воздуха через экспериментальную модель. Эксперименты проводились при температуре воздуха 25 °С и атмосферном давлении ($\rho = 1,185$ кг/м³; $\mu = 18,35 \cdot 10^{-6}$ Па·с). Площадь проходного сечения экспериментальной модели составляет $f_{пр} = 0,00347$ м². В соответствии с уравнением (3), в диапазоне значений критерия Re от 17500 до 27000 требуемый массовый расход воздуха через экспериментальную модель составил 0,07-0,11 кг/с.

Результаты численных и экспериментальных исследований

Эксперименты показали, что в исследуемом диапазоне $Re = 17500-27000$ перераспределение потока среды между каналами модели не зависит от режима течения. Для всех режимов доля расхода через верхний и нижний продольные зазоры стабильно составляла 2,0-2,2 % от общего расхода, через канал ПС СУЗ – 27-28 %. Распределение расхода между пятью каналами охлаждения было практически равномерным: расход через каждый канал не превышал 14 % от общего расхода, а относительные отклонения между ними не превышали 5 %. Количественное сопоставление результатов численного моделирования с экспериментальными данными выполнено по относительному отклонению расчетного расхода через каждый канал от экспериментально измеренного (рис. 7):

$$\delta = \frac{G_{расч} - G_{эксп}}{G_{эксп}} \cdot 100\%, \quad (4)$$

где $G_{расч}$, $G_{эксп}$ – расчетное и экспериментальное значение массового расхода через канал.

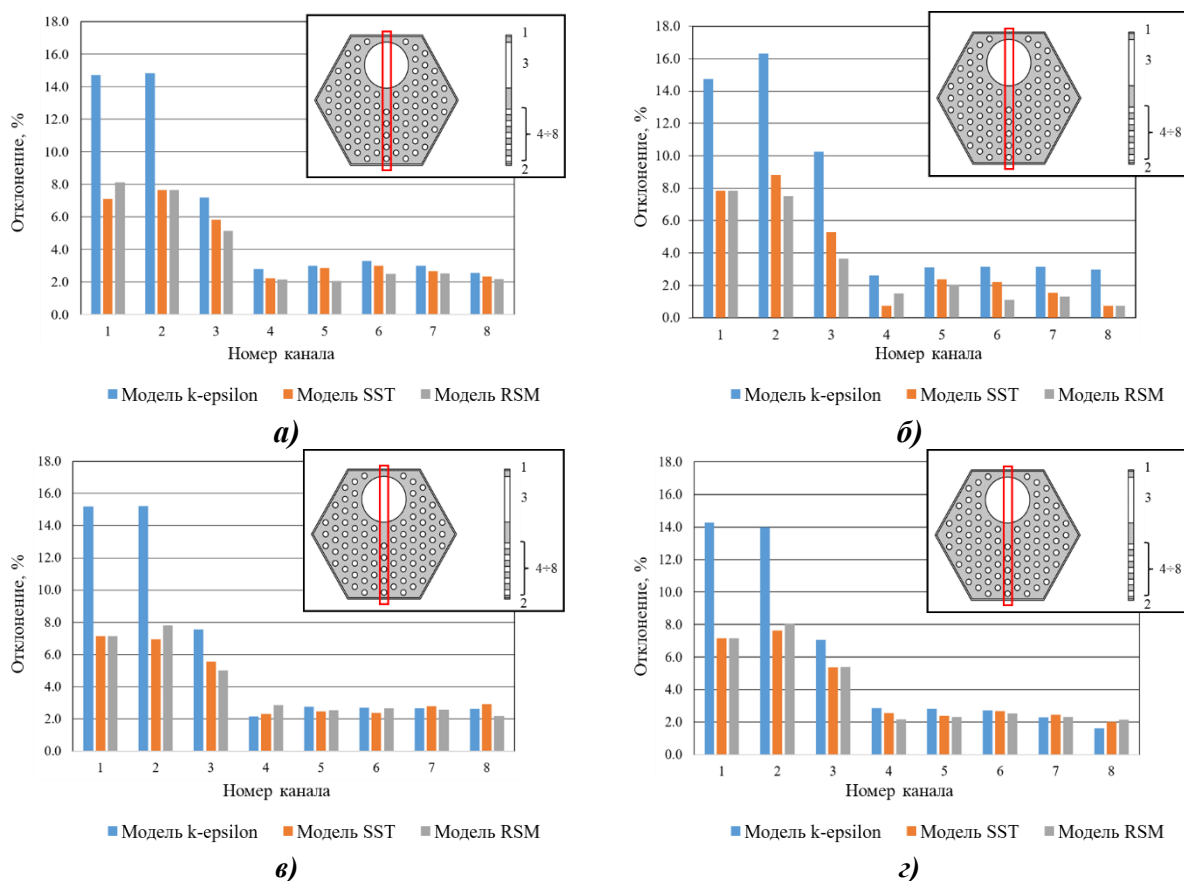


Рис. 7. Относительные отклонения расчетных значений расхода теплоносителя от экспериментальных данных по каналам модели:

1-2 – межблочные зазоры; 3 – канал ПС СУЗ; 4-8 – каналы охлаждения:
а) $Re = 17500$, б) $Re = 21000$, в) $Re = 24500$, г) $Re = 27000$

Fig. 7. Relative deviations (%) of the computed mass flow rates from experimental values across the channels of the model:

1-2 – bypass gaps; 3 – control rod channel; 4-8 – cooling channels:
а) $Re = 17500$, б) $Re = 21000$, в) $Re = 24500$, г) $Re = 27000$

Во всех режимах наибольшие отклонения наблюдались в каналах, имитирующих межблочные зазоры (каналы 1 и 2). Модель k-epsilon систематически завышала расход через эти каналы на 14-16 %. Модели SST и BSL RSM давали более точные результаты — отклонения не превышали 7-8 % и практически совпадали между собой. В канале ПС СУЗ (канал 3) все модели выглядели заметно точнее: отклонения модели k-epsilon составляли порядка 5-10 %, а SST и RSM – 4-6 %. В пяти каналах охлаждения (4-8) отклонения не превышали 3 % вне зависимости от выбираемой модели турбулентности (рис. 7).

Более существенные отклонения в зазорах и канале ПС СУЗ по сравнению с каналами охлаждения были обусловлены особенностями течения в этих областях. Узкие межблочные зазоры характеризовались локально низкими числами Рейнольдса (4000-7000) и вероятным переходным характером течения, где стандартные RANS-модели испытывают трудности из-за ограниченной точности пристеночных функций. В канале ПС СУЗ наличие дросселирующего устройства и значительное изменение поперечного сечения создают структуру потока с участками ускорения, что также усложняет моделирование.

Заключение

Полученные результаты демонстрируют применимость моделей SST и BSL RSM для моделирования гидродинамики течения в геометрии, характерной для призматической активной зоны ВТГР. Вместе с тем, выявленные отклонения расчетных данных от эксперимента в межблочных радиальных зазорах указывают на ограниченную точность стандартных RANS-подходов. Это подчеркивает необходимость дальнейшего совершенствования математических моделей турбулентности, в частности, уточнения параметров и коэффициентов, входящих в данные модели.

На следующем этапе целесообразны экспериментальные исследования на полномасштабной модели топливной колонны с фиксированным межблочным зазором. Это позволит провести полноценную валидацию расчетного кода с использованием моделей SST и BSL RSM, показавших наилучшее согласие с экспериментом в настоящей работе, и подтвердить масштабируемость полученных результатов на геометрию штатной топливной сборки. Также представляется важным исследовать влияние ширины радиальных межблочных зазоров на перераспределение расхода теплоносителя в диапазоне от 2 до 6 мм, что соответствует различному напряженно-деформированному состоянию элементов активной зоны в различные моменты топливной кампании реактора.

Для повышения точности воспроизведения байпасного течения также рекомендуется проведение комплекса дополнительных экспериментальных исследований, включающего детальное изучение структуры потока в межблочных радиальных зазорах с учетом реальной геометрии, в том числе, наличия ромбовидного стыка между торцевыми гранями призматических блоков.

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

Библиографический список

1. **Фатеев, С.А.** Развитие технологий атомно-водородной энергетики в госкорпорации «Росатом» / С.А. Фатеев, В.В. Петрунин, Г.Н. Кодочигов, И.В. Маров // Атомная энергия. – 2022. – Т. 133, вып. 5-6. – С. 243-250.
2. **Панюков, С.В.** Теория радиационно-индуцированного формоизменения графита / С.В. Панюков, А.В. Субботин // Атомная энергия. – 2008. – Т. 105, вып. 1. – С. 25-32.
3. **Петрунин, В.В.** Ядерные энергетические установки с высокотемпературными модульными газоохлаждаемыми реакторами: в 2 т. / В.В. Петрунин, Н.Г. Кодочигов, С.М. Дмитриев [и др.]; под общ. ред. Н. Н. Пономарева-Степного. – Нижний Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2017. – 745 с.
4. **Olson, H.G.** The Fort St. Vrain high temperature gas-cooled reactor: X. Core temperature fluctuations / H.G. Olson, H.L. Brey, D.W. Waremburg // Nuclear Engineering and Design. – 1982. – Т. 72, № 2. – С. 125-137.
5. **Sato, H.** Computational fluid dynamic analysis of core bypass flow phenomena in a prismatic VHTR / H. Sato, R. Johnson, R. Schultz // Annals of Nuclear Energy. — 2010. — Т. 37, № 11. – С. 1172-1185.
6. **Tung, Y.-H.** Effects of graphite surface roughness on bypass flow computations for an HTGR / Y.-H. Tung, R. W. Johnson, H. Sato // Nuclear Engineering and Design. – 2012. – Т. 252. – С. 78-87.
7. **Yoon, S.-J.** Study on the flow distribution in prismatic VHTR core with a multi-block experiment and CFD analysis / S.-J. Yoon, C.-Y. Jin, J.-H. Lee, M.-H. Kim, G.-C. Park // Nuclear Engineering and Design. – 2011. – Т. 241, вып. 12. – С. 5174-5182.
8. **Yoon, S.-J.** The effects of crossflow gap and axial bypass gap distribution on the flow characteristics in prismatic VHTR core / S.-J. Yoon, J.-H. Lee, M.-H. Kim, G.-C. Park // Nuclear Engineering and Design. – 2012. – Т. 250. – С. 648-655.

9. **Johnson, R.W.** Pre-Test CFD Calculations for a Bypass Flow Standard Problem. Proceedings of the ASME 2011 International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE 2011), Denver, Colorado, USA, November 11–17, 2011. – New York: ASME, 2011. – Т. 10: Heat and Mass Transport Processes. – С. 1179–1187.
10. **Kanjanakijkasem, W.** Experimental and CFD studies of the bypass flow in a prismatic core of VHTR using a small-scale model / W. Kanjanakijkasem, H. Wang, E. Dominguez-Ontiveros, Y.A. Hassan // Progress in Nuclear Energy. – 2016. – Т. 91. – С. 223–235.
11. **Диденко, Д.В.** Кросс-верификационные расчеты теплогидравлических характеристик активной зоны высокотемпературного газоохлаждаемого реактора / Д.В. Диденко, Д.Е. Балугев, О.Л. Никаноров, С.А. Рогожкин, А.С. Лубина, А.А. Седов, А.А. Фролов // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2025. – № 4. – С. 250–259.
12. **Фомичев, М.С.** Экспериментальная гидродинамика ЯЭУ / М.С. Фомичев. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 248 с.
13. **Курицин, Д.Д.** Расчетно-экспериментальные исследования струйного смешения в упрощенной геометрии нижнего собирающего коллектора ВТГР / Д.Д. Курицин, А.А. Добров, Д.В. Доронков [и др.] // Труды НГТУ им. П. Е. Алексеева. – 2025. – № 4 (151). – С. 68–78.
14. **Рахманов, В.В.** Подходы к улучшению качества оптического сигнала в гидродинамическом эксперименте при использовании ЛДА с МКП-ФЭУ / В.В. Рахманов, М.В. Кашкарова, В.Г. Меледин, И.К. Кабардин // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2024. – Т. 8, № 1. – С. 165–172.
15. **Menter, F.R.** Best Practice: RANS Turbulence Modeling in Ansys CFD. Version 1.0 / F.R. Menter, R. Lechner, A. Matyushenko. – ANSYS, Inc., 2021. – 95 с.
16. **Petersen, H.** The properties of helium: Density, specific heats, viscosity, and thermal conductivity at pressures from 1 to 100 bar and from room temperature to about 1800 K. – Roskilde: Risø National Laboratory, 1970. – 42 с. – (Denmark. Forskningscenter Risoe. Risoe-R; № 224).

References

1. Fateev, S.A., Petrunin, V.V., Kodochigov, N.G., Marov, I.V. Development of Nuclear-Hydrogen Power Technologies in the Rosatom State Corporation. Atomnaya Energiya, 2022, vol. 133, iss. 5-6, pp. 243–250. (In Russian)
2. Panyukov, S.V., Subbotin, A.V. Theory of Radiation-Induced Dimensional Changes in Graphite. Atomnaya Energiya, 2008, vol. 105, iss. 1, pp. 25–32. (In Russian)
3. Petrunin, V.V., Kodochigov, N.G., Dmitriev, S.M. et al. Yadernye energeticheskie ustanovki s vysokotemperaturnymi modul'nymi gazookhlazhdaemymi reaktorami: v 2 t. [Nuclear Power Plants with High-Temperature Modular Gas-Cooled Reactors: in 2 vols.]. Ed. by N.N. Ponomarev-Stepnoy. Nizhny Novgorod: Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev Publ., 2017, 745 p. (In Russian)
4. Olson, H.G., Brey, H.L., Waremburg, D.W. The Fort St. Vrain High Temperature Gas-Cooled Reactor: X. Core Temperature Fluctuations. Nuclear Engineering and Design, 1982, vol. 72, no. 2, pp. 125–137.
5. Sato, H., Johnson, R., Schultz, R. Computational Fluid Dynamic Analysis of Core Bypass Flow Phenomena in a Prismatic VHTR. Annals of Nuclear Energy, 2010, vol. 37, no. 11, pp. 1172–1185.
6. Tung, Y.-H., Johnson, R.W., Sato, H. Effects of Graphite Surface Roughness on Bypass Flow Computations for an HTGR. Nuclear Engineering and Design, 2012, vol. 252, pp. 78–87.
7. Yoon, S.-J., Jin, C.-Y., Lee, J.-H., Kim, M.-H., Park, G.-C. Study on the Flow Distribution in Prismatic VHTR Core with a Multi-Block Experiment and CFD Analysis. Nuclear Engineering and Design, 2011, vol. 241, iss. 12, pp. 5174–5182.
8. Yoon, S.-J., Lee, J.-H., Kim, M.-H., Park, G.-C. The Effects of Crossflow Gap and Axial Bypass Gap Distribution on the Flow Characteristics in Prismatic VHTR Core. Nuclear Engineering and Design, 2012, vol. 250, pp. 648–655.
9. Johnson, R.W. Pre-Test CFD Calculations for a Bypass Flow Standard Problem. Proceedings of the ASME 2011 International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE 2011), Denver, Colorado, USA, November 11–17, 2011. New York: ASME, 2011, vol. 10: Heat and Mass Transport Processes, pp. 1179–1187.
10. Kanjanakijkasem, W., Wang, H., Dominguez-Ontiveros, E., Hassan, Y.A. Experimental and CFD Studies of the Bypass Flow in a Prismatic Core of VHTR Using a Small-Scale Model. Progress in Nuclear Energy, 2016, vol. 91, pp. 223–235.

11. Didenko, D.V., Baluev, D.E., Nikanorov, O.L., Rogozhkin, S.A., Lubina, A.S., Sedov, A.A., Frolov, A.A. Cross-Verification Calculations of Thermal-Hydraulic Characteristics of the Core of a High-Temperature Gas-Cooled Reactor. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Seriya: Yaderno-reaktornye konstanty*, 2025, no. 4, pp. 250–259. (In Russian)
12. Fomichev, M.S. *Eksperimental'naya gidrodinamika YaEU* [Experimental Hydrodynamics of Nuclear Power Plants]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1989, 248 p. (In Russian)
13. Kuritsin, D.D., Dobrov, A.A., Doronkov, D.V. et al. Computational and Experimental Studies of Jet Mixing in a Simplified Geometry of the Lower Plenum of a HTGR. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva*, 2025, no. 4 (151), pp. 68–78. (In Russian)
14. Rakhmanov, V.V., Kashkarova, M.V., Meledin, V.G., Kabardin, I.K. Approaches to Improving the Quality of the Optical Signal in a Hydrodynamic Experiment Using LDA with MCP-PMT. *Interexpo Geo-Sibir'*, 2024, vol. 8, no. 1, pp. 165–172. (In Russian)
15. Menter, F.R., Lechner, R., Matyushenko, A. *Best Practice: RANS Turbulence Modeling in Ansys CFD. Version 1.0*. ANSYS, Inc., 2021, 95 p.
16. Petersen, H. *The Properties of Helium: Density, Specific Heats, Viscosity, and Thermal Conductivity at Pressures from 1 to 100 bar and from Room Temperature to about 1800 K*. Roskilde: Risø National Laboratory, 1970, 42 p. (Denmark. Forskningscenter Risoe. Risoe-R; no. 224).

*Дата поступления
в редакцию: 14.04.2026*

*Дата принятия
к публикации: 18.05.2026*