

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУЙНОГО СМЕШЕНИЯ В УПРОЩЕННОЙ ГЕОМЕТРИИ НИЖНЕГО СОБИРАЮЩЕГО КОЛЛЕКТОРА ВТГР

Д.Д. Курицин

ORCID: 0000-0001-9384-6950 e-mail: d.d.kuritsin@yandex.ru

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

А.А. Добров

ORCID: 0000-0001-7363-8791 e-mail: dobrov@nntu.ru

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

Д.В. Доронков

ORCID: 0000-0003-0668-4215 e-mail: nevid000@mail.ru

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

А.А. Маринин

ORCID: 0009-0000-7166-067X e-mail: marini.01@mail.ru

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

Д.С. Николаев

ORCID: 0000-0003-2244-4780 e-mail: nikolaevdanil_ft@mail.ru

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

А.В. Рязанов

ORCID: 0000-0002-4951-8930 e-mail: a_v_ryazanov@mail.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

Представлены расчетно-экспериментальные исследования смешения параллельных струй в упрощенной модели нижнего собирающего коллектора высокотемпературного газоохлаждаемого реактора (ВТГР). Проведена валидация RANS-моделей турбулентности с использованием экспериментальных данных, полученных методом лазерной доплеровской анемометрии на модели с пятью подводящими каналами. Численное моделирование выполнено в ANSYS CFX при стационарной постановке с применением четырех моделей турбулентности: SST, SSG, BSL RSM и BSL EARSM. Расчетная сетка создавалась автоматически из тетраэдрических элементов с локальным сгущением в областях высокого градиента скорости и вихревого течения, что обеспечило необходимое разрешение потоковых структур. Экспериментальные данные позволили построить картограммы скоростей и провести сравнение с численными результатами. Модели BSL EARSM и BSL RSM продемонстри-

ровали наилучшее совпадение с экспериментом по величине и структуре вертикальных и горизонтальных компонент скорости, обеспечив относительную погрешность менее 20 %. Модели SST и SSG показали значимые отклонения в ряде зон.

Полученные результаты подтверждают высокую прогностическую способность моделей BSL EARSM и BSL RSM при воспроизведении структур смешения и рециркуляции струй в нижнем коллекторе ВТГР и могут быть рекомендованы для дальнейшего применения в численных расчетах.

Ключевые слова: высокотемпературный газоохлаждаемый реактор; нижний собирающий коллектор; струйное смешение; численное моделирование; валидация; модель турбулентности; лазерная доплеровская анемометрия.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Курицин, Д.Д. Расчетно-экспериментальные исследования струйного смешения в упрощенной геометрии нижнего собирающего коллектора ВТГР / Д.Д. Курицин, А.А. Добров, Д.В. Доронков, А.А. Маринин, Д.С. Николаев, А.В. Рязанов, М.А. Легчанов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2025. № 4. С. 68-78. DOI: 10.46960/1816-210X_2025_4_68 EDN: VRSEJT

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF JET MIXING IN SIMPLIFIED GEOMETRY OF HIGH-TEMPERATURE GAS-COOLED REACTOR

D.D. Kuritsin

ORCID: **0000-0001-9384-6950** e-mail: **fomius.kisik@gmail.com**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

A.A. Dobrov

ORCID: **0000-0001-7363-8791** e-mail: **dobrov@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: **nevid000@mail.ru**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

A.A. Marinin

ORCID: **0009-0000-7166-067X** e-mail: **marini.01@mail.ru**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

D.S. Nikolaev

ORCID: **0000-0003-2244-4780** e-mail: **nikolaevdaniel_ft@mail.ru**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

A.V. Ryazanov

ORCID: **0000-0002-4951-8930** e-mail: **a_v_ryazanov@mail.ru**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

M.A. LegchanovORCID: **0000-0002-6195-3804** e-mail: legchanov@nntu.ru

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The paper presents numerical and experimental investigations of parallel jet mixing in a simplified model of the lower plenum of a high-temperature gas-cooled reactor (HTGR). The aim of the study was to verify RANS turbulence models using experimental data obtained by laser Doppler anemometry on a physical model with five inlet channels. Numerical simulations were performed in ANSYS CFX under steady-state conditions using four turbulence models: SST, SSG, BSL RSM and BSL EARSM. The computational grid was generated automatically using tetrahedral elements with local refinement in regions of high velocity gradients and vortex structures to ensure sufficient resolution of flow features. Experimental data enabled the construction of velocity maps and comparison with numerical results. The BSL EARSM and BSL RSM models demonstrated the best agreement with experimental data in both magnitude and structure of vertical and horizontal velocity components, providing relative errors below 20%. The SST and SSG models showed significant deviations in several zones.

The results confirm the high predictive capability of the BSL EARSM and BSL RSM models in reproducing mixing and recirculation structures in the HTGR lower plenum and support their application in further CFD studies.

Key words: high-temperature gas-cooled reactor; lower plenum; jet mixing; numerical modeling; validation; turbulence model; laser Doppler anemometry.

FOR CITATION: D.D. Kuritsin, A.A. Dobrov, D.V. Doronkov, A.A. Marinin, D.S. Nikolaev, A.V. Ryazanov, and M.A. Legchanov. Numerical and experimental investigation of jet mixing in simplified geometry of high-temperature gas-cooled reactor. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2025. № 4. Pp. 68-78.

DOI: 10.46960/1816-210X_2025_4_68 EDN: VRSEJT

Введение

Высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы (ВТГР) все чаще рассматриваются как универсальный источник тепла для задач, выходящих за рамки традиционной электроэнергетики. Благодаря возможности работы при температурах свыше 800 °C, такие установки подходят для промышленных процессов, включая водородное производство и тепловое обеспечение химических циклов [1-2].

Одной из приоритетных задач при создании проекта ВТГР является расчетно-экспериментальное обоснование теплотехнической надежности и ресурсных характеристик конструктивных элементов реакторной установки [3]. Особое внимание при этом необходимо уделять нижнему собирающему коллектору, в котором происходит смешение потоков гелиевого теплоносителя, выходящих из активной зоны.

В типовой схеме ВТГР теплоноситель перемещается сверху вниз: из верхней камеры через активную зону, образованную призматическими графитовыми тепловыделяющими сборками (ТВС), и далее в нижний собирающий коллектор, откуда поступает в главный газоход [4]. Неравномерность энерговыделения по радиусу приводит к тому, что в коллектор поступают струи гелия с различной температурой. При ограниченном объеме и времени перемешивания в нижнем собирающем коллекторе формируется тепловая стратификация – температурная неравномерность, способная вызывать термические напряжения и снижать ресурс элементов конструкции. Для прогнозирования гидродинамической картины в подобных условиях широкое распространение получил метод вычислительной гидродинамики (CFD), позволяющий численно моделировать течения в реакторных системах. Основанный на численном решении уравнений Навье-Стокса, метод CFD позволяет получить гидродинамическую картину течения в моделируемой области.

Точность и достоверность CFD-моделирования во многом зависят от комплекса расчетных параметров, среди которых критическую роль играет выбор модели турбулентности. Поскольку каждая модель ориентирована на описание определенного класса течений, ее применение в условиях сложного струйного взаимодействия, характерного для нижнего со-

бирающего коллектора, требует обоснования. Для этого необходима валидация на основе экспериментальных данных, позволяющая оценить степень соответствия численных результатов реальной картине течения.

Эффективным подходом в данном случае является использование упрощенной геометрии – она позволяет локализовать исследуемый эффект и исключить влияние побочных факторов, что облегчает интерпретацию данных и сопоставление результатов [5-6].

Таким образом, целью данной работы является валидация моделей турбулентности в условиях струйного смешения, характерного для нижнего собирающего коллектора ВТГР, на основе сопоставления результатов численного моделирования с экспериментальными данными, полученными на упрощенной масштабной модели.

Геометрическая модель объекта исследования

Объектом исследования в настоящей работе является область нижнего собирающего коллектора ВТГР. С целью упрощения была модифицирована исходная геометрия: сокращено число подводящих вертикальных каналов до пяти, исключены опорные элементы активной зоны, а также уменьшена глубина модели до 40 мм, что допустимо с учетом плоской постановки экспериментов. Исключение опорных колонн на данном этапе позволяет провести валидацию модели турбулентного течения, минимизировав влияние локальных зон отрыва потока и дополнительной турбулизации, генерируемых конструкционными элементами. После успешной валидации базовой физики следующим этапом является переход к модели повышенной сложности с включением опорных колонн для оценки их специфического влияния.

Модифицированная геометрия модели имеет следующие габариты: высота – 505 мм, длина – 850 мм. Пять подводящих каналов выполнены с внешним диаметром 54 мм и равномерно расположены с межосевым шагом 72 мм (рис. 1). Конфигурация обеспечивала устойчивое формирование параллельных струй, поступающих в общий объем, что позволяло воспроизвести основные характеристики струйного взаимодействия, характерного для нижнего собирающего коллектора ВТГР.

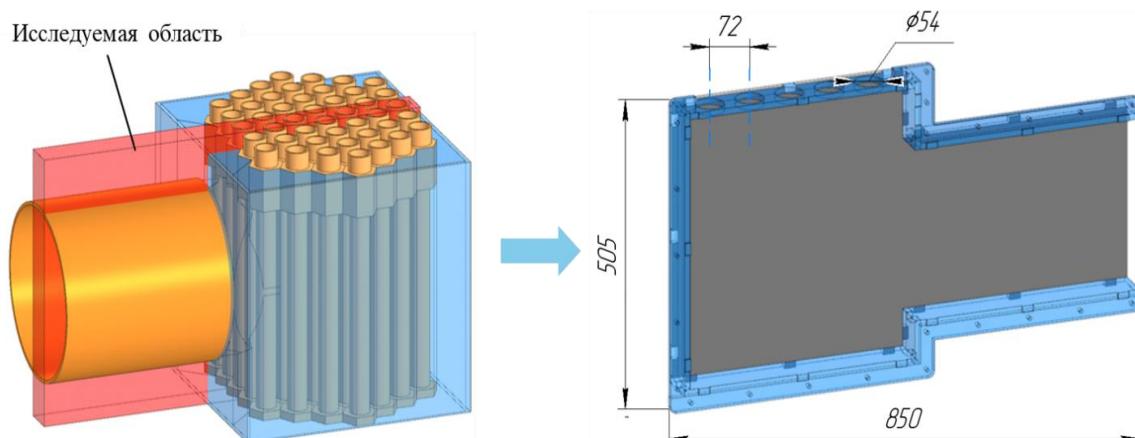


Рис. 1. Геометрическая модель объекта исследования

Fig. 1. Geometric model of the research object

Геометрия данной модели использовалась как в численном моделировании, так и в физическом эксперименте, что обеспечивает корректное сопоставление результатов и достоверность валидации.

Описание методики численного моделирования

Численное исследование процессов струйного взаимодействия в упрощенной модели нижнего собирающего коллектора ВТГР выполнено с использованием программного комплекса ANSYS CFX. Расчеты проводились в трехмерной постановке на стационарной расчетной сетке. Основное внимание было уделено анализу влияния выбора модели турбулентности на воспроизведение структуры течения и оценку возможности сопоставления с экспериментальными данными. В рамках работы рассмотрены широко применяемые модели турбулентности, основанные на уравнениях, усредненных по Рейнольдсу (RANS): SST (Shear-Stress Transport), SSG, BSL RSM и BSL EARSM. Каждая из моделей использует различные физико-математические подходы к описанию турбулентного потока, что обуславливает вариативность результатов моделирования.

Для расчетного моделирования были выбраны четыре модели турбулентности, различающиеся по сложности и учету анизотропии турбулентного течения. SST-модель основана на гибридизации подходов $k-\epsilon$ и $k-\omega$ и предполагает изотропное перемешивание (гипотеза Буссинеска), что ограничивает ее применимость в зонах рециркуляции, однако обеспечивает стабильность расчета и невысокую вычислительную нагрузку. Модели BSL RSM и BSL EARSM относятся к классу RANS-моделей с расчетом тензора Рейнольдсовых напряжений, что позволяет описывать анизотропные эффекты, характерные для зон взаимодействия струй. В BSL EARSM применяется алгебраическая аппроксимация, тогда как BSL RSM решает полный набор уравнений, обеспечивая более высокую точность. SSG-модель аналогична BSL RSM, но дополнительно включает уточненное моделирование давления-деформации, что повышает точность в условиях сильных градиентов, однако требует больших ресурсов и аккуратного выбора расчетных параметров.

Генерация расчетной сетки выполнена автоматизированным методом с использованием тетраэдрических элементов. По результатам предварительных расчетов были выделены области с интенсивными градиентами скорости и вихревыми структурами, в которых впоследствии была произведена локальная детализация расчетной сетки. Основные характеристики итоговой расчетной сетки приведены в табл. 1.

Таблица 1.
Параметры расчетной сетки

Table 1.
Computational grid parameters

Характеристика	Величина
Базовый размер элементарной ячейки, м	$4 \cdot 10^{-3}$
Толщина первого призматического слоя, м	$2 \cdot 10^{-5}$
Максимально число призматических слоев	15
Коэффициент роста толщины по слоям	1,2
Базовый размер элементарной ячейки в области измельчения, м	$1,8 \cdot 10^{-3}$
Суммарное количество расчетных узлов	3131086
Суммарное количество расчетных элементов	10009412

Серия CFD-расчетов была выполнена в стационарной постановке без учета нагрева рабочей среды по мере ее прохождения через экспериментальную модель. Параметры воздуха были взяты при температуре 22°C и атмосферном давлении ($\rho = 1,195 \text{ кг}/\text{м}^3$; $\mu = 1,831 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$).

Описание исследовательского стенда и методики экспериментальных исследований

Для валидации численной модели использовались экспериментальные данные, полученные на лабораторной установке (рис. 2). В качестве рабочей среды использовался воздух.

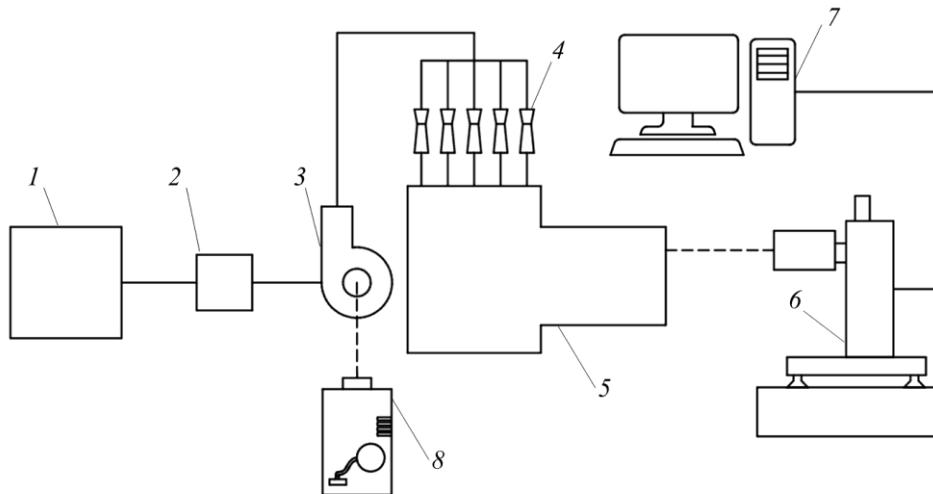


Рис. 2. Схема исследовательского стенда для изучения смешения параллельных струй с выходом в общий коллектор:
 1 – источник трехфазной сети; 2 – преобразователь частоты; 3 – вентилятор;
 4 – трубы Вентури; 5 – экспериментальная модель;
 6 – лазерная доплеровская измерительная система; 7 – ЭВМ; 8 – генератор дыма

Fig. 2. Schematic diagram of a research facility for studying the mixing of parallel jets with an outlet into a common plenum:
 1 – three-phase source; 2 – frequency converter; 3 – fan; 4 – Venturi tubes; 5 – experimental model;
 6 – laser Doppler measurement system; 7 – computer; 8 – smoke generator

Контроль расхода в подводящих каналах осуществлялся с помощью расходомеров, сконструированных по принципу трубы Вентури. Измерительные элементы были изготовлены методом послойной FDM-печати и прошли индивидуальную тарировку. Конструкция включала входной участок, сужающуюся горловину с отбором статического давления и диффузор, обеспечивающий восстановление потока с минимальными потерями. Сравнение результатов, полученных с использованием поверенного анемометрического расходомера VA 520 CS INSTRUMENTS и трубок Вентури, показало расхождение, не превышающее 3 %.

Для получения данных о гидродинамической структуре струйного взаимодействия в области перемешивания применялась лазерная доплеровская измерительная система (ЛДИС) «ЛАД-08А», обеспечивающая бесконтактные измерения локальных компонент скорости с высокой точностью. Метод основан на регистрации доплеровского сдвига частоты света, рассеянного частицами-трассерами в зоне пересечения когерентных лазерных пучков. Засев потока трассирующими частицами осуществлялся с использованием генератора аэрозольного дыма, установленного на входе вентилятора. В качестве трассеров использовались частицы диаметром до 5 мкм, формируемые из глицеринсодержащей жидкости.

Для исследования процесса смешения струй рабочей среды в упрощенной модели нижнего собирающего коллектора была разработана сетка измерительных точек, расположенных в плоскости симметрии экспериментальной модели. Каждая точка предусматривала измерение двух компонент скорости. Шаг расположения точек измерения составил 10 мм, что обеспечило возможность фиксации вихревых структур, формирующихся при взаимодействии потоков. Для оптимизации обработки экспериментальных данных точки были сгруппированы в ячейки трех типов с различной конфигурацией: 10×10, 10×13 и 10×7. Общее ко-

личество ячеек достигло 25, а суммарное число измерительных точек – 2720. Такое разделение позволило систематизировать данные без потери детализации, сохранив информацию о пространственном распределении скорости.

Сопоставление численных и экспериментальных результатов

В качестве определяющего критерия подобия при выборе расхода использовалось число Фруда. Численные и экспериментальные исследования выполнялись при одинаковой среднерасходной скорости 13,4 м/с, заданной во всех пяти подводящих каналах модели.

По результатам экспериментальных и численных исследований были построены картограммы распределения вертикальной и горизонтальной проекции скорости потока рабочей среды в среднем сечении модели (рис. 3-4).

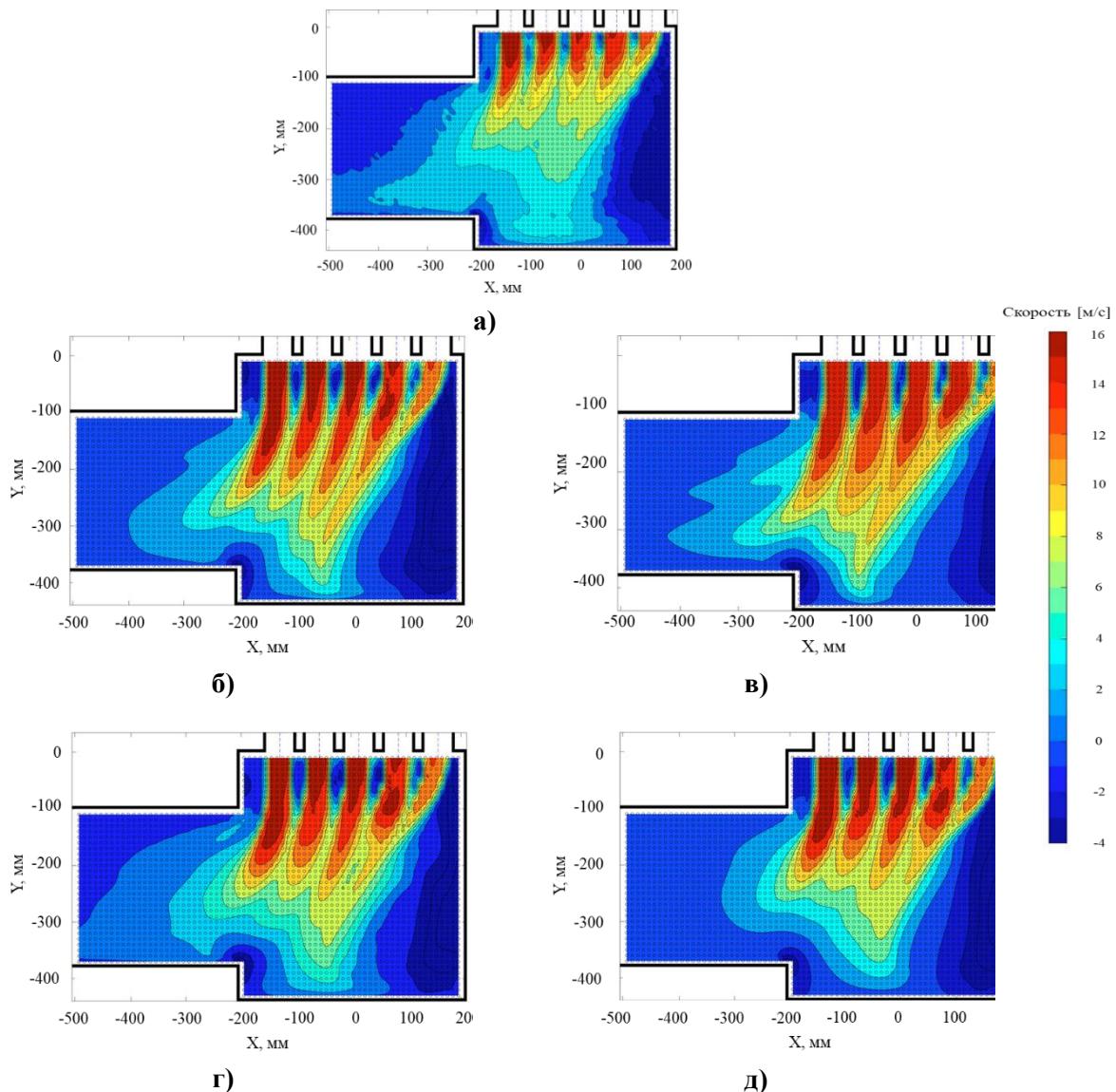


Рис. 3. Распределение вертикальной проекции скорости:
а) эксперимент; б) SST-модель; в) SSG-модель; г) BSL RSM-модель; д) BSL EARSIM-модель

Fig. 3. Distribution of the vertical projection of velocity:
a) experiment; б) SST model; в) SSG model; г) BSL RSM model; д) BSL EARSIM model

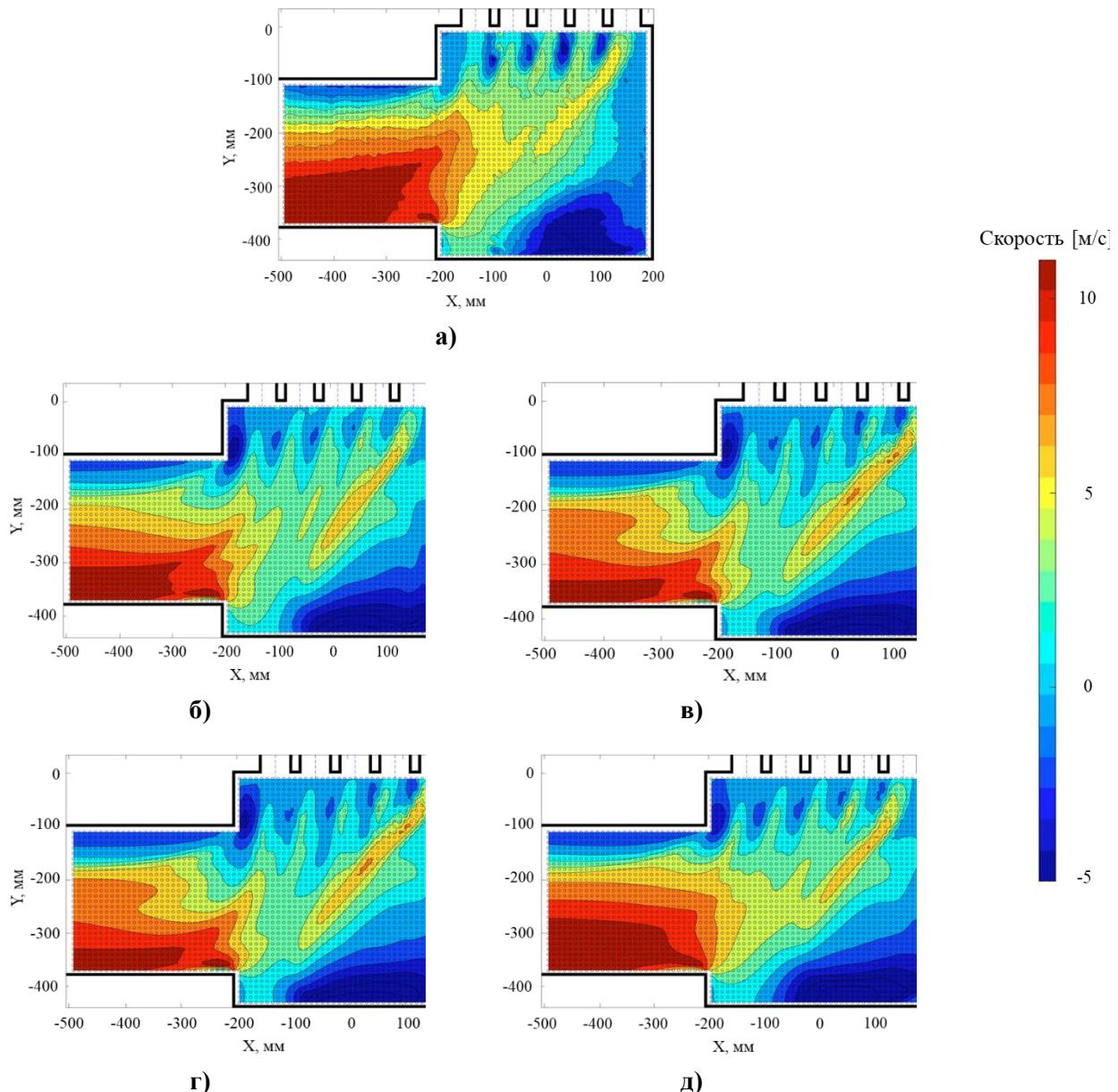


Рис. 4. Распределение горизонтальной проекции скорости:
 а) эксперимент; б) SST-модель; в) SSG-модель; г) BSL RSM-модель; д) BSL EARSM-модель

Fig. 4. Distribution of the horizontal projection of velocity:

a) experiment; б) SST model; в) SSG model; г) BSL RSM model; д) BSL EARSM model

Полученные картограммы скорости позволяют проследить явно выраженный вихрь, расположенный в нижней части коллектора. Вихревая структура в данной зоне имеет форму деформированного эллипса. Верхняя часть коллектора смешения имеет завихрения произвольной формы между осями подводящих трубопроводов. Область газохода имеет явно выраженный вихрь, расположенный в верхней его части.

Сравнение расчетных и экспериментальных данных показало, что модели BSL EARSM и BSL RSM обеспечивают наилучшее совпадение как по форме, так и по величинам вертикальной и горизонтальной компонент скорости. В области взаимодействия струй вертикальная составляющая в эксперименте составляет 6-10 м/с, тогда как расчеты с использованием указанных моделей дают значения в пределах 6-12 м/с. В нижней части коллектора, где скорость направлена против основного потока, расхождения также минимальны (до ± 2 м/с).

В горизонтальной плоскости точность численного воспроизведения распределения скорости варьируется в зависимости от зоны: вблизи стенок на входе в коллектор расчетные модели переоценивают значения скорости, тогда как в центральной области наблюдается хорошее соответствие с экспериментальными данными. Наилучшее совпадение с экспериментом демонстрируют модели BSL EARSM и SST. В газоходе расчетные данные в целом соответствуют эксперименту. Все модели правильно описывают нисходящий градиент скорости, однако наилучшее количественное соответствие по вертикальной и горизонтальной компонентам достигается при использовании BSL RSM. Для количественной оценки точности численного моделирования проведен сопоставительный анализ значений результирующей скорости, определенной на основе горизонтальной и вертикальной составляющих потока, в ряде контрольных точек, определенных по характерным зонам течения (рис. 5).

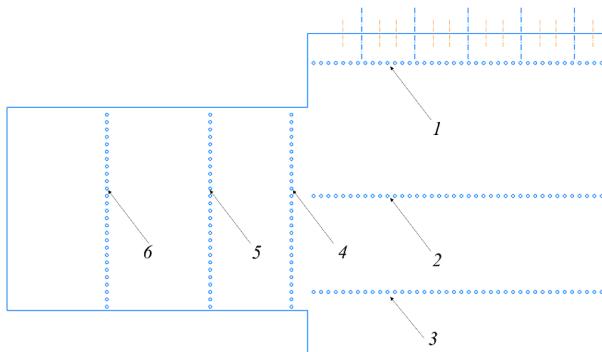


Рис. 5. Контрольные точки сравнения значений результирующей скорости:

- 1) область входа струй в коллектор;
- 2) область смешения струй;
- 3) область нижней части коллектора;
- 4) область входа потока в газоход;
- 5) область середины газохода;
- 6) область выхода потока из газохода

Fig. 5. Control points for comparison of resulting velocity values:

- 1) area of jet entry into the plenum;
- 2) jet mixing area;
- 3) lower part of the plenum area;
- 4) flow entry area into the gas duct;
- 5) gas duct middle area;
- 6) gas duct outlet area

В зоне ввода струй (рис 6 а) расчетные значения скорости, как правило, хорошо согласуются с экспериментальными вдоль осей подводящих каналов. При этом в межструйных областях большинство моделей, особенно SST и SSG, демонстрируют систематическое занижение результирующих скоростей. В зоне активного смешения (рис. 6 б) наименьшие отклонения от экспериментальных данных показали модели BSL EARSM и BSL RSM. В рециркуляционных областях (например, в диапазоне координат $X = 150\text{--}200$ мм) все модели завышают значения результирующей скорости, что указывает на ограниченность их способности точно воспроизводить вихревую структуру течения.

В нижней части коллектора (рис. 6 в) наблюдаются наибольшие расхождения между экспериментом и расчетами. Все модели демонстрируют завышенные значения скорости, однако наименьшие отклонения вновь отмечены при использовании моделей BSL EARSM и BSL RSM. В зоне газохода (рис. 6 г-е) расчетные данные в целом достоверно описывают структуру потока. Наиболее точное воспроизведение входной области газохода обеспечивается моделью BSL EARSM. В средней и выходной частях газохода адекватное согласование с экспериментом демонстрируют все модели, за исключением SSG, которая показала наибольшее среднеквадратичное отклонение.

Среднее относительное отклонение по всем расчетным точкам составило 16,72 % для модели BSL EARSM и 19,64 % для BSL RSM. Для моделей SST и SSG оно оказалось выше – 20,92 и 22,17 % соответственно. Полученные результаты свидетельствуют о более высокой прогностической способности моделей BSL EARSM и BSL RSM при численном моделировании струйного смешения и рециркуляционных течений, характерных для нижнего собирающего коллектора ВТГР.

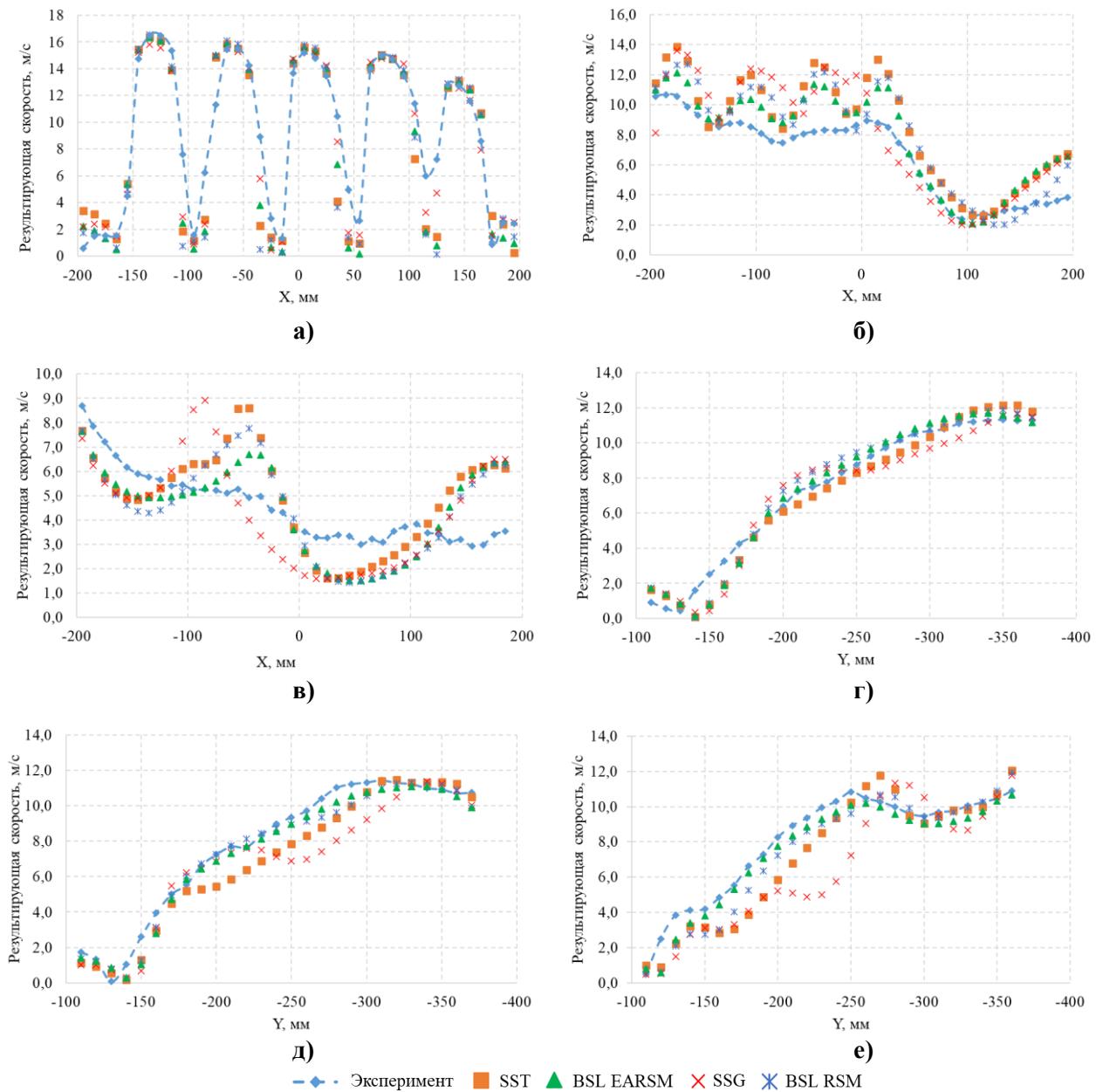


Рис. 6. Значения результирующей скорости по характерным областям:

- a) область входа струй в коллектор; б) область смешения струй
- в) область нижней части коллектора; г) область входа потока в газоход;
- д) область середины газохода; е) область выхода потока из газохода

Fig. 6. Values of the resulting velocity for characteristic areas:
 a) area of jet entry into the plenum; б) jet mixing area; в) lower part of the plenum area;
 г) gas duct entry area; д) gas duct middle area; е) gas duct outlet area

Заключение

Полученные результаты подтверждают применимость моделей BSL EARSM и BSL RSM для воспроизведения характерных особенностей струйного взаимодействия в нижнем собирающем коллекторе ВТГР, включая формирование вихревых структур и областей со встречным движением потока. Представленные данные могут быть использованы проектными и расчетными подразделениями АО «ОКБМ Африкантов» при моделировании теплогид-

равлических процессов в элементах активной зоны и нижнего собирающего коллектора ВТГР.

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

Библиографический список

1. Головко, В.Ф. Выбор конфигурации ядерного энергоисточника на основе ВТГР для технологического применения / В.Ф. Головко, И.В. Дмитриева, А.В. Рязанов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2022. – № 2 (137). – С. 44 -57.
2. Гребенник, В.Н. Высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы – инновационное направление развития атомной энергетики / В.Н. Гребенник, Н.Е. Кухаркин, Н.Н. Пономарев-Степной – М.: Атомэнергоиздат, 2008. – 135 с.
3. Фатеев, С.А. Развитие технологий атомно-водородной энергетики в Госкорпорации «Росатом» / С.А. Фатеев, В.В. Петрунин, Г.Н. Кодочигов [и др.] // Атомная энергия. – 2022. – Т. 133. Вып. 5-6. – С. 243-250.
4. Петрунин, В.В. Ядерные энергетические установки с высокотемпературными модульными газоохлаждаемыми реакторами. В 2-х т. Под общей ред. Н.Н. Пономарева-Степного / В.В. Петрунин, Н.Г. Кодочигов, С.М. Дмитриев [и др.]. – Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2018. – 745 с.
5. Landfried, D.T. Design of a Unit Cell Facility for Studies of the Prismatic VHTR Lower Plenum / D.T. Landfried [et al.] // Department of Mechanical Engineering and Material Science. – 2015. – P. 13.
6. Hugh, M. Measurement of Flow Phenomena in a Lower Plenum Model of a Prismatic Gas-Cooled Reactor / M. Hugh, Jr. McIlroy [et al.] // Proceedings of the 16th International Conference on Nuclear Engineering. – Idaho National Laboratory, Idaho. – 2008. – Pp. 10.

References

1. Golovko V.F., Dmitrieva I.V. and Riazanov A.V. 2022. “Vybor konfiguratsii iadernogo energoistochnika na osnove VTGR dlja tekhnicheskogo primeneniia” [Selection of a Nuclear Power Source Configuration Based on HTGR for Technological Application]. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva* [Proceedings of Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University], no. 2 (137): 44-57.
2. Grebennik V.N., Kukharkin N.E. and Ponomarev-Stepnoi N.N. 2008. *Vysokotemperaturnye gazookhlazhdemye reaktory – innovatsionnoe napravlenie razvitiia atomnoi energetiki* [High-Temperature Gas-Cooled Reactors – An Innovative Direction for Nuclear Power Development]. Moscow: Atomenergoizdat.
3. Fateev S.A., Petrunin V.V., Kodochigov G.N. [et al.]. 2022. “Razvitiie tekhnologii atomno-vodorodnoi energetiki v Goskorporatsii “Rosatom”” [Development of Nuclear-Hydrogen Energy Technologies in the State Corporation “Rosatom”]. *Atomnaia Energiia* [Atomic Energy] 133 (5–6): 243-250.
4. Petrunin, V. V., Kodochigov, N. G., Dmitriev S. M. [et al.], eds. 2018. *Iadernye energeticheskie ustanovki s vysokotemperaturnymi modul'nymi gazookhlazhdemyimi reaktorami* [Nuclear Power Plants with High-Temperature Modular Gas-Cooled Reactors]. 2 vols. Nizhnii Novgorod: NGTU im. R.E. Alekseeva.
5. Landfried, D.T. [et al.]. 2015. “Design of a Unit Cell Facility for Studies of the Prismatic VHTR Lower Plenum”. *Department of Mechanical Engineering and Material Science*, 13.
6. McIlroy, Hugh M., Jr. [et al.]. 2008. “Measurement of Flow Phenomena in a Lower Plenum Model of a Prismatic Gas-Cooled Reactor”. In *Proceedings of the 16th International Conference on Nuclear Engineering*, 10. Idaho National Laboratory, Idaho.

**Дата поступления
в редакцию: 24.07.2025**

**Дата принятия
к публикации: 27.09.2025**