

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И АТОМНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.039.52.034.3

DOI 10.46960/1816-210X_2026_1_43

EDN BUAPKZ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАСШТАБА
МОДЕЛИ И ЧИСЛА РЕЙНОЛЬДСА НА ПРОЦЕССЫ
ГИДРОДИНАМИКИ И НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ
ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ НА ВЫХОДЕ ИЗ КОЛОННЫ ТВС
ПРИЗМАТИЧЕСКОЙ АКТИВНОЙ ЗОНЫ ВТГР****С.М. Дмитриев**

ORCID: 0000-0003-0637-7004 e-mail: dmitriev@nntu.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***М.А. Легчанов**

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

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***М.А. Игонин**

ORCID: 0000-0002-6706-061X e-mail: igonin_ma@okbm.nnov.ru

АО «ОКБМ Африкантов»
Нижний Новгород, Россия

Анализируется проблема неравномерности энерговыделения и нагрева теплоносителя в активной зоне высокотемпературного газоохлаждаемого реактора (ВТГР), играющая важную роль при обосновании его теплотехнической надежности. Для исследования влияния масштаба экспериментальной модели на распределение локальных гидродинамических величин и коэффициент гидравлического сопротивления созданы две модели опорной колонны тепловыделяющей сборки (ТВС), выполненные в масштабах 80 и 40 % от натурального размера. Исследования влияния уменьшения числа Рейнольдса на процесс неизотермического смещения потоков проводились на модели двух смежных опорных колонн ТВС масштабом 40 % от натурального размера. Снижение числа Рейнольдса до 35 % от натурального значения не оказывает существенного влияния на распределения локальных относительных скоростей в моделях, а также не приводит к изменению коэффициента гидравлического сопротивления, что может свидетельствовать об области автомодельного течения для рассмотренной конструкции. Для модели двух опорных колонн влияние числа Рейнольдса из диапазона 30 ÷ 55 % от натурального значения на распределение локальной температуры в области смещения оказывается незначительным. Поля относительной температуры остаются подобными, а степень перемешивания практически не меняется.

Работа выполнена в рамках комплексного Инвестиционного проекта АО «Концерн Росэнергоатом».

Ключевые слова: реакторная установка; высокотемпературный газоохлаждаемый реактор; атомная энерготехнологическая станция; атомно-водородная энергетика; гидродинамика; перемешивание; моделирование; подобие; тепловыделяющая сборка.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Дмитриев, С.М. Исследование влияния масштаба модели и числа Рейнольдса на процессы гидродинамики и неизотермического перемешивания теплоносителя на выходе из колонны ТВС призма-

тической активной зоны ВТГР / Дмитриев С.М., Добров А.А., Легчанов М.А., Игонин М.А // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2026. № 1. С. 43-51. DOI: 10.46960/1816-210X_2026_1_43 EDN: BUAPKZ

STUDY OF MODEL SCALE AND REYNOLDS NUMBER INFLUENCE ON COOLANT HYDRODYNAMICS AND NON-ISOTHERMAL MIXING AT FUEL ASSEMBLY COLUMN OUTLET OF HTGR PRISMATIC CORE

S.M. Dmitriev

ORCID: **0000-0002-4037-861X** e-mail: **dmitriev@nntu.ru**
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

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

M.A. Igonin

ORCID: **0000-0002-6706-061X** e-mail: **igonin_ma@okbm.nnov.ru**
JSC «OKBM Afrikantov»
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The article considers the problem of uneven energy release and heating of the coolant in the high-temperature gas-cooled reactor (HTGR) core, which plays an important role in substantiating its thermal engineering reliability. Two models of a fuel assembly (FA) support column were created to study the effect of experimental model scale on the distribution of local hydrodynamic quantities and the hydraulic resistance coefficient. The models were constructed at scales of 80 % and 40 % of the actual size. Studies of the effect of the decrease in the Reynolds number on the process of non-isothermal mixing of flows were carried out on a model of two adjacent FA support columns at a scale of 40 % of the actual size. Reducing the Reynolds number to 35 % of the natural value does not have a significant effect on the distribution of local relative velocities in the models, and does not lead to a change in the hydraulic resistance coefficient, which may indicate a region of self-similar flow for the considered design. The influence of the Reynolds number from the range of 30 ÷ 55% of the natural value has a weak effect on the distribution of local temperature in the mixing region for the model of two support columns. The fields of relative temperature remain similar and the mixing degree remains virtually unchanged.

This study is done in the frames of the complex Investment project of Rosenergoatom JSC.

Keywords: reactor; high-temperature gas-cooled reactor; nuclear power plant; atomic-hydrogen energy; hydrodynamics, mixing; modeling; similarity; fuel assembly.

FOR CITATION: S.M. Dmitriev, A.A. Dobrov, M.A. Legchanov and M.A. Igonin. Study of model scale and Reynolds number influence on coolant hydrodynamics and non-isothermal mixing at fuel assembly column outlet of HTGR prismatic core. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2026. № 1. Pp. 43-51.
DOI: 10.46960/1816-210X_2026_1_43 EDN: BUAPKZ

Введение

В качестве источника высокопотенциального тепла для атомной энерготехнологической станции (АЭТС), создаваемой в рамках комплексного Инвестиционного проекта АО «Концерн Росэнергоатом», рассматривается высокотемпературный газоохлаждаемый реактор (ВТГР) [1]. При его разработке одним из ключевых вопросов является обоснование теплотехнической надежности реактора в целом и его элементов в частности [2]. Центральной

проблемой является неравномерность энерговыделения и нагрева теплоносителя в активной зоне реактора, в результате чего в нижний собирающий коллектор из отдельных тепловыделяющих сборок (ТВС) поступают потоки с различной температурой. Для обоснования и обеспечения требуемого ресурса теплообменного оборудования первого контура необходимо исследование уровня температурной неравномерности потоков теплоносителя на выходе из активной зоны в собирающем коллекторе ВТГР и горячем газоходе. Для решения этой задачи в НГТУ создан исследовательский стенд ФТ-А1 с атмосферным воздухом в качестве рабочей среды. В работе [3] проведен обзор мирового опыта по экспериментальному решению подобной задачи и выполнен анализ подобия с определением критериев подобия, важных для исследуемого процесса. На основе проведенного анализа сформулированы основные требования к исследовательской установке.

Однако из-за технических и физических ограничений невозможно воспроизвести исследуемый процесс неизотермического перемешивания с одновременным соблюдением всех определяющих критериев подобия. Эти ограничения приводят к необходимости уменьшения масштаба экспериментальной модели и снижению расхода рабочей среды относительно требуемого для точного соблюдения критерия Рейнольдса. Отличия от натурного режима течения потребовали проведения дополнительных экспериментальных исследований по обоснованию масштаба экспериментальной модели и значения критерия Рейнольдса.

Исследование локальных гидродинамических характеристик в моделях одиночной опорной колонны

Для исследования влияния масштаба экспериментальной модели на распределение локальных гидродинамических величин и коэффициент гидравлического сопротивления был создан аэродинамический экспериментальный стенд (рис. 1а).

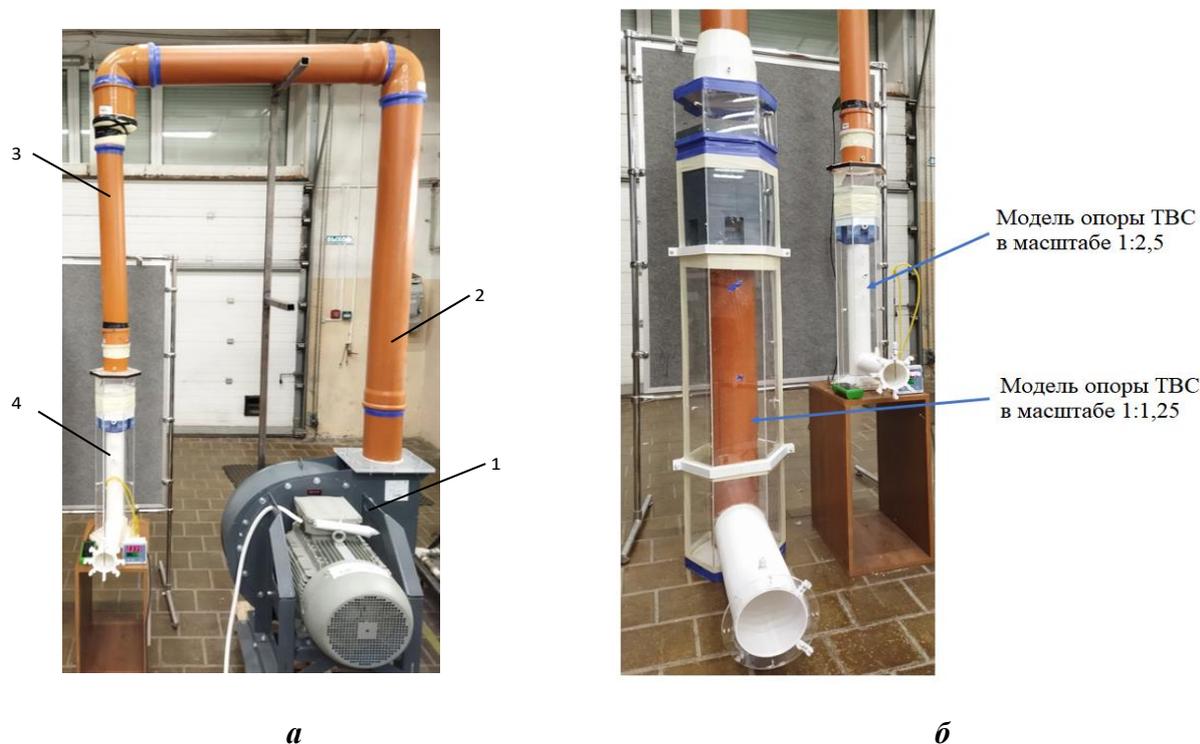


Рис. 1. Общий вид экспериментального стенда и моделей опорной колонны ТВС:

а – общий вид аэродинамического стенда;

б – общий вид разномасштабных экспериментальных моделей опорной колонны ТВС

Fig. 1. General view of the experimental bench and models of the fuel assembly support column:

a – aerodynamic bench; б – multi-scale experimental models of the fuel assembly support column

Он состоит из разомкнутого контура с вентилятором высокого давления, преобразователя частоты, соединительного трубопровода, разномасштабных экспериментальных моделей (ЭМ) одиночной опорной колонны ТВС, заключенной в шестигранный чехол и имеющей выходной патрубок с диаметром, равным диаметру колонны.

Модели отличались геометрическим масштабом. Модель № 1 имела масштаб 1:1,25 (80 % от натурального размера), модель № 2 – 1:2,5 (40 % от натурального размера). Общий вид масштабных моделей представлен на рис. 1б, их схема – на рис. 2. Каждая модель состояла из входного патрубка 1, камеры 2, служащей переходом с круглого сечения входного патрубка на шестигранное, имитатора нижнего блока ТВС 3, имитатора опорной колонны 4, шестигранного чехла 5 с внутренним размером, равным размеру под ключ ТВС (с учетом масштаба модели), нижнего шестигранного элемента опоры 6, выходного патрубка 7.

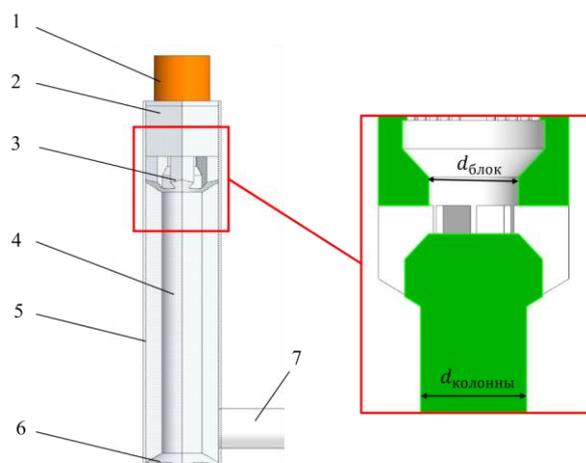


Рис. 2. Схема экспериментальной модели

Fig. 2. Scheme of the experimental model

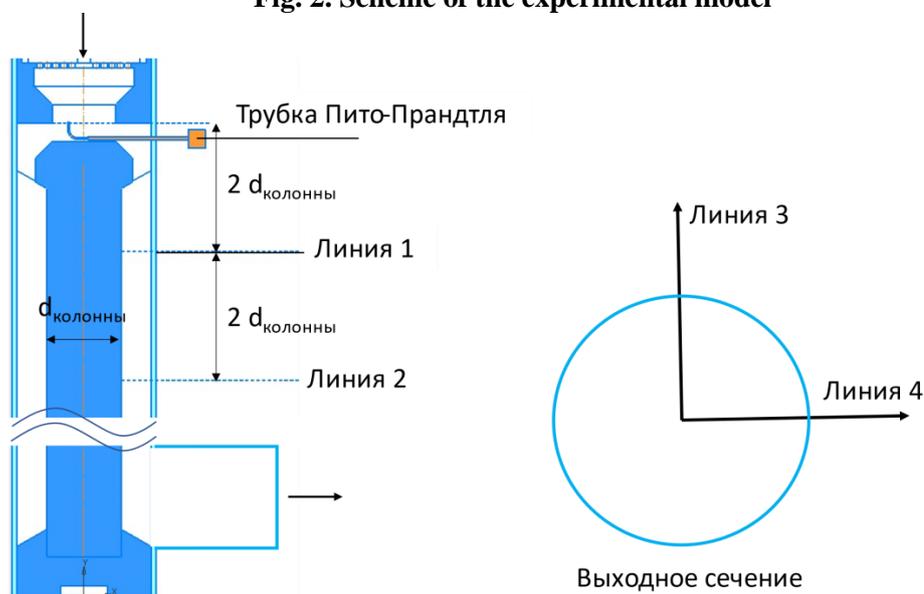


Рис. 3. Схема линий измерения локальной скорости

Fig. 3. Scheme of local velocity measurement line

Методика проведения исследований заключалась в определении локальных значений скорости воздушного потока в характерных сходственных точках экспериментальных моделей, приведении полученных значений к безразмерному виду и их сравнении для двух моделей. Схема расположения четырех линий, вдоль которых производилось измерение скорости,

показана на рис. 3. Результаты измерений сравнивались для нескольких режимов течения, характеризуемых числом Рейнольдса Re , которое определялось по формуле:

$$Re = \frac{W \cdot d_{\text{колонны}}}{\nu} \quad (1)$$

где W – среднерасходная скорость воздуха в выходном отверстии собирающего блока, м/с; $d_{\text{колонны}}$ – диаметр опорной колонны, м; ν – коэффициент кинематической вязкости воздуха, м²/с.

Среднерасходная скорость рабочей среды W определялась как отношение измеряемого на стенде объемного расхода Q к площади круглого отверстия собирающего блока по формуле:

$$W = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d_{\text{блок}}^2}, \quad (2)$$

где $d_{\text{блок}}$ – диаметр выходного отверстия собирающего блока, м.

В номинальном режиме работы натурного реактора ВТГР, по данным теплогидравлического расчета, определенное по вышеописанным формулам число Рейнольдса на выходе из колонн ТВС составит 280000–350000 в зависимости от типа ТВС (под рабочий орган СУЗ или стандартной) и расхода через нее. В экспериментальном исследовании распределения безразмерной скорости диапазон чисел Рейнольдса снизу был ограничен возможностями измерения малых значений локальной скорости пневмометрической трубкой Пито-Прандтля, а сверху – производительностью вентилятора для модели 1:1,25 или максимальной скоростью на выходе из отверстий собирающего блока 50 м/с для модели 1:2,5. Такое ограничение скорости в наименьшем по площади сечении связано с обеспечением малого числа Маха в модели, чтобы воздух можно было считать несжимаемой средой.

В ходе исследования были проведены три серии экспериментов: на модели 1:1,25 при числе Рейнольдса 258700, на модели 1:2,5 при числах Рейнольдса 117700 и 228700. Результаты измерения локальных значений скорости приводились к безразмерному виду:

$$W^* = \frac{W_{\text{лок}}}{W}, \quad (3)$$

где $W_{\text{лок}}$ – локально измеренная скорость потока в модели, м/с.

Результаты распределения локальных значений безразмерной скорости вдоль характерных линий представлены на рис. 4. Полученные данные свидетельствуют о весьма малой зависимости распределения безразмерной скорости от выбранного масштаба. Кроме того, снижение числа Рейнольдса до 40 % от номинального также практически не сказывается на распределении безразмерной скорости на разных участках модели, что может свидетельствовать об автомодельности течения по отношению к критерию Рейнольдса в рассмотренном диапазоне его значений. В ходе эксперимента определялась величина коэффициента гидравлического сопротивления ξ (КГС) в зависимости от числа Рейнольдса в обеих моделях:

$$\xi = \frac{2 \cdot \Delta P_{\text{полн}}}{\rho \cdot W^2}, \quad (4)$$

где $\Delta P_{\text{полн}}$ – перепад полного давления между входным и выходным сечениями, Па; ρ – плотность воздуха, кг/м³.

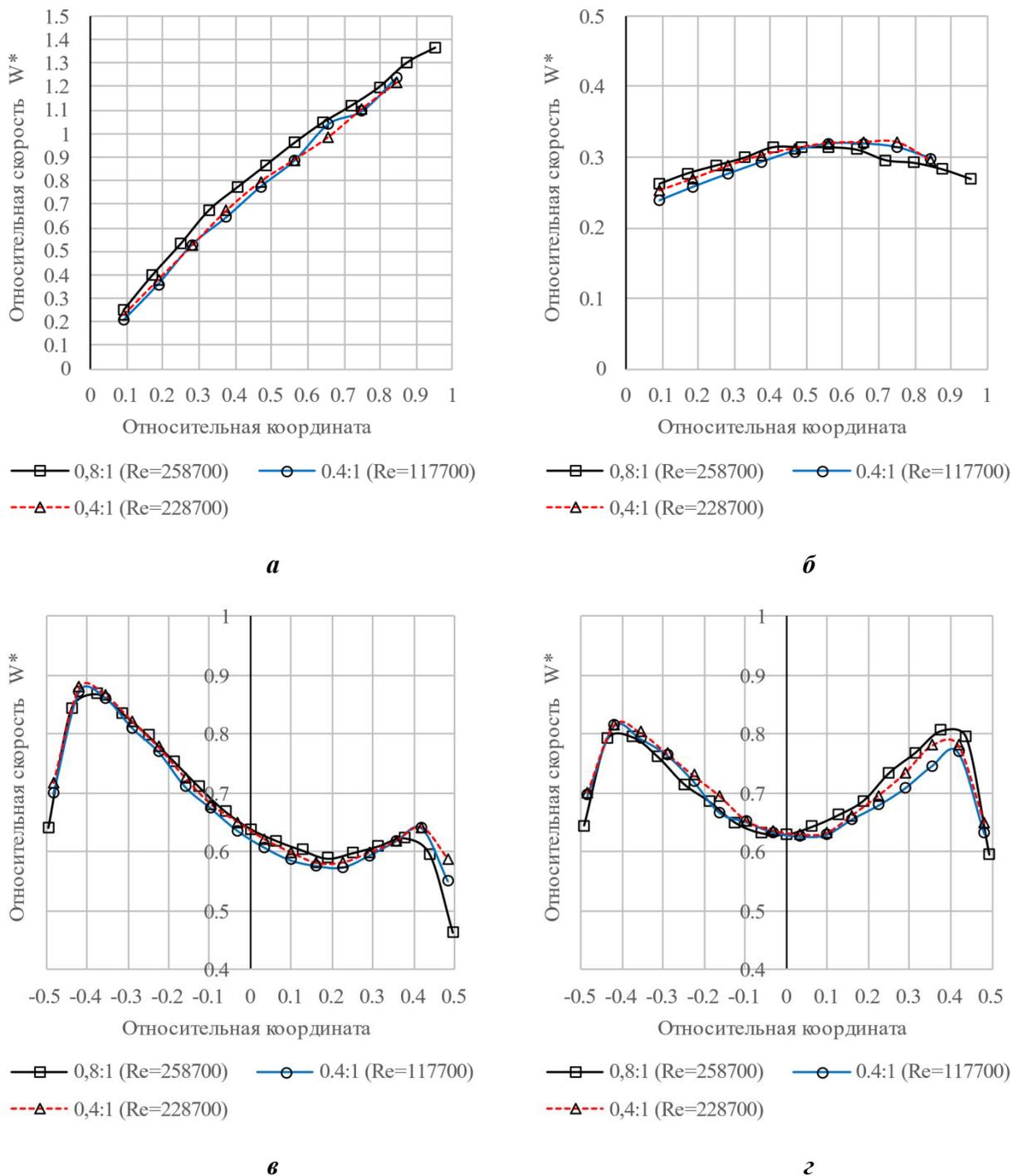


Рис. 4. Распределение относительной скорости в выходном сечении экспериментальной модели:
а – линия 1; *б* – линия 2; *в* – линия 3; *г* – линия 4

Fig. 4. Distribution of relative velocity in the outlet section of the experimental model:
a – line 1; *б* – line 2; *в* – line 3; *г* – line 4

На рис. 5 представлены результаты определения КГС для двух ЭМ, отличающихся масштабом. В рассмотренном диапазоне чисел Рейнольдса КГС остается практически постоянным, что также может свидетельствовать об области автомодельного течения для данной геометрии относительно числа Рейнольдса.

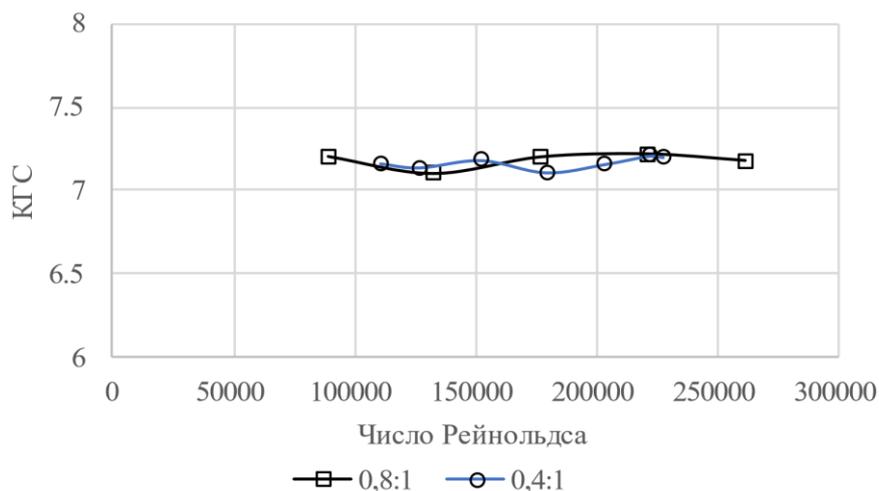


Рис. 5. Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления от числа Рейнольдса для двух ЭМ

Fig. 5. Dependence of the hydraulic resistance coefficient on the Reynolds number for two experimental models

Исследование неизотермического перемешивания теплоносителя в модели двух опорных колонн

Для исследования влияния уменьшения числа Рейнольдса на процесс неизотермического смешения потоков была изготовлена модель двух смежных опорных колонн ТВС. Масштаб модели составил 40 % от натурального размера опорных колонн. В один имитатор выходного блока ТВС подавался холодный воздух с массовым расходом $G_{\text{хол}}$ и температурой $T_{\text{хол}}$, в другой горячий с расходом $G_{\text{гор}}$ и температурой $T_{\text{гор}}$. Модель в нижней части была снабжена выходным патрубком, расположенным перпендикулярно опорным колоннам по плоскости симметрии. Схема модели показана на рис. 6.

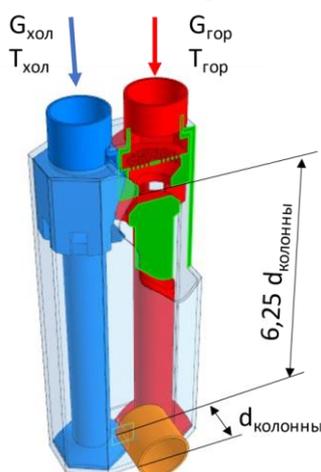


Рис. 6. Схема экспериментальной модели двух смежных опорных колонн

Fig. 6. Scheme of the experimental model of two adjacent support columns

В ходе исследований были рассмотрены три режима, отличающиеся числами Рейнольдса, определенными по диаметру колонны и скорости во входном сечении (аналогично экспериментам с одиночной колонной). Массовые расходы воздуха по обоим каналам модели выставлялись одинаковыми. Были рассмотрены режимы, характеристики которых приведены в табл. 1.

Таблица 1.
Параметры экспериментальных режимов

Table 1.
Parameters of experimental modes

№ режима	Температура на входе в холодный канал модели, °С	Температура на входе в горячий канал модели, °С	Число Рейнольдса в холодном канале	Число Рейнольдса в горячем канале
1	27,11	60,96	70416	59450
2	28,78	50,08	111600	99500
3	30,81	44,11	174280	162150

Для всех режимов производилась запись значений температуры в 33 точках выходного сечения. Для каждой из них были записаны по 1000 значений температуры с частотой 3 измерения в секунду, после чего данные усреднялись. Безразмерным параметром, к которому приводились результаты измерений, была безразмерная температура T^* :

$$T^* = \frac{T - T_{\text{хол}}}{T_{\text{гор}} - T_{\text{хол}}}, \quad (5)$$

T – локальное значение температуры теплоносителя, °С.

Также определялся интегральный параметр – степень перемешивания φ , которая характеризует интенсивность перемешивания неизотермических потоков и зависит от максимальной разности температуры потока в выходном сечении модели ΔT и исходной (входной) неравномерности температуры теплоносителя:

$$\varphi = \left(1 - \frac{\Delta T}{T_{\text{гор}} - T_{\text{хол}}}\right) \cdot 100\% \quad (6)$$

По результатам измерений были построены картограммы распределения безразмерной температуры в выходном сечении модели для трех режимов (рис. 7).

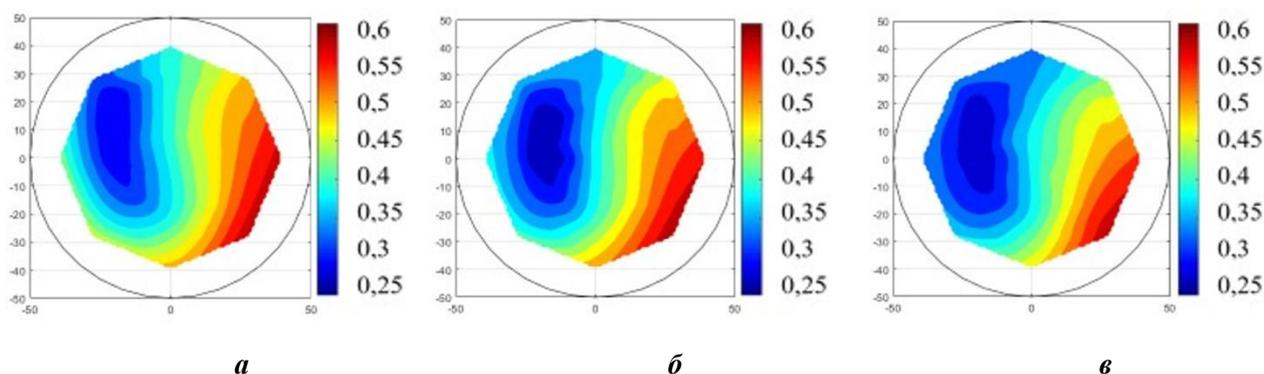


Рис. 7. Распределение безразмерной температуры в выходном сечении модели:
а – режим № 1; б – режим № 2; в – режим № 3

Fig. 7. Distribution of dimensionless temperature in the outlet section of the model:
a – mode № 1; б – mode № 2; в – mode № 3

Анализ картограмм показал, что полного перемешивания в области опорных колонн не происходит ни в одном из трех режимов. Картограммы практически не отличаются ни качественно, ни количественно, что говорит об относительно малом влиянии числа Рейнольдса на исследуемый процесс в рассмотренном диапазоне значений. Значения степени перемешивания составили 66,5, 65,9 и 65,8 % соответственно для трех экспериментальных режимов.

Выводы

По результатам проведенных исследований было получено три результата.

1. Влияние масштаба модели на результаты распределения локальных гидродинамических характеристик потока рабочей среды оказалось пренебрежимо малым (в пределах погрешности измерения и позиционирования пневмометрического зонда).

2. Снижение числа Рейнольдса до 35 % от натурального значения не оказывает существенного влияния на распределения локальных относительных скоростей в моделях, а также не приводит к изменению коэффициента гидравлического сопротивления, что может свидетельствовать об области автомодельного течения для рассмотренной конструкции.

3. При исследовании модели двух опорных колонн влияние числа Рейнольдса из диапазона 30 ÷ 55 % от натурального значения на распределение локальной температуры в области смешения оказывается незначительным, при этом полного перемешивания в области опорных колонн не происходит во всех рассмотренных режимах, а поля относительной температуры остаются подобными.

Оптимальным для исследования процесса неизотермического смешения теплоносителя в модели всего нижнего собирающего коллектора ВТГР выбран масштаб 40 % от натурального. Уменьшение числа Рейнольдса допустимо до значений 30 ÷ 35 % без влияния на распределение локальных значений безразмерных скоростей и температуры, что снижает требования к оборудованию для прокачки рабочей среды через экспериментальную модель и позволяет уменьшить число Маха в аэродинамической модели до 0,15 во всех характерных сечениях, рассматривая воздух как несжимаемую среду.

Библиографический список

1. **Фатеев, С.А.**, Развитие технологий атомно-водородной энергетики в Госкорпорации «Росатом» / С.А. Фатеев, В.В. Петрунин [и др.] // Атомная энергия. – 2022. – Т. 133. № 5-6. – С. 243-250.
2. **Диденко, Д.В.** Расчетное моделирование теплофизических процессов в высокотемпературном газоохлаждаемом реакторе / Д. В. Диденко, Д. Е. Балуюев, И. В. Маров [и др.] // Компьютерные исследования и моделирование. – 2023. – Т. 15. № 4. – С. 895-906.
3. **Добров, А.А.** Обоснование на основе чисел подобия и методов вычислительной гидродинамики аэродинамической модели для исследования перемешивания теплоносителя в нижнем собирающем коллекторе ВТГР / А.А. Добров, С.М. Дмитриев, Д.В. Доронков [и др.] // Атомная энергия. – 2024. – Т. 137. Вып. 5-6. – С. 247-253.

References

1. Fateev S.A., Petrunin V.V., et al. Razvitie tekhnologiy atomno-vodorodnoy energetiki v Goskorporatsii «Rosatom» [Development of atomic-hydrogen energy technologies at the State Atomic Energy Corporation Rosatom]. Atomnaya energiya [Atomic Energy]. 2022;133(5-6):243-250 (in Russian).
2. Didenko D.V., Baluev D.E., Marov I.V., et al. Raschetnoe modelirovanie teplofizicheskikh protsessov v vysokotemperaturnom gazookhlazhdaemom reaktore [Computational modeling of thermophysical processes in a high-temperature gas-cooled reactor]. Komp'yuternye issledovaniya i modelirovanie [Computer Research and Modeling]. 2023;15(4):895-906 (in Russian).
3. Dobrov A.A., Dmitriev S.M., Doronkov D.V., et al. Obosnovanie na osnove chisel podobiya i metodov vychislitel'noy gidrodinamiki aerodinamicheskoy modeli dlya issledovaniya peremeshivaniya teplonositelya v nizhnem sobirayushchem kollektore VTGR [Justification based on similarity numbers and computational fluid dynamics methods for an aerodynamic model to study coolant mixing in the lower plenum of a HTGR]. Atomnaya energiya [Atomic Energy]. 2024;137(5-6):247-253 (in Russian).

*Дата поступления
в редакцию: 10.09.2025*

*Дата принятия
к публикации: 22.01.2026*