

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЫРАВНИВАЮЩИХ РЕШЕТОК ДЛЯ УМЕНЬШЕНИЯ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ПОТОКА В МАКЕТЕ АКТИВНОЙ ЗОНЫ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

А.С. Кислов

kas17ea225@student.bmstu.ru

П.В. Марков

markov.pv@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Исследовано влияние конструкции выравнивающей решетки на гидродинамику потока подводящего участка аэродинамического макета активной зоны ядерного реактора. Приведены результаты численного моделирования гидродинамики потока с использованием стационарных осредненных уравнений Рейнольдса, замыкаемых двухпараметрической k - ϵ -моделью турбулентности. Определены значения коэффициента гидравлического сопротивления выравнивающей решетки и локальные значения статического давления на периферии модели в окрестности выравнивающей решетки при различных режимах течения. Показано влияние выравнивающей решетки на неравномерность скорости потока, сформированной конструкцией подводящего тракта аэродинамического макета. Приведена оценка эффективности выравнивания профиля осевой скорости. Проанализированы течение и локальные эффекты неравномерности распределения статического давления в окрестности выравнивающей решетки. Показаны влияние конструкции выравнивающей решетки на формирование течения, распределение статического давления на периферии и среднего статического давления в сечениях перед решеткой и после нее для различных режимов течения. Проведена валидация расчетной методики по справочным и экспериментальным данным, полученным на аэродинамическом стенде. Отклонение результатов моделирования от справочных и экспериментальных данных не более 10 %

Ключевые слова

Выравнивающая решетка, аэродинамический эксперимент, вычислительная гидродинамика, ядерный реактор

Поступила 20.08.2025

Принята 02.12.2025

© Автор(ы), 2026

Введение. Физическое моделирование объектов использования атомной энергии применительно к получению экспериментальных данных о гидродинамике трактов течения теплоносителей и их гидравлическом сопротивлении связано с разработкой и эксплуатацией гидравлических и аэродинамических стендов [1–5]. Макеты трактов конструируют при условии обеспечения геометрического подобия натурным объектам, при этом допускается их масштабирование или упрощение. Физическое подобие процессов в макетах и натуре реализуется в условиях равенства критериев подобия — безразмерных комплексов, составленных из определяющих процессы величин.

Кроме геометрического и физического подобия на гидродинамику потоков в макетах влияют условия подвода модельной среды. Тракты подвода среды к макетам могут создавать существенные скоростные, температурные неравномерности в потоке, индуцировать крупные вихри, влияющие на течение и тепло- и массообмен в макетах [1, 6–9]. Способом выравнивания скоростных неравномерностей и исключения переноса крупных вихрей в область моделирования является установка перфорированных выравнивающих решеток [1, 10–13]. Пористость выравнивающих решеток определяет их гидравлическое сопротивление, а размер отверстий — масштаб турбулентности за ними. При малом гидравлическом сопротивлении уменьшение скоростной неравномерности в потоке при прохождении решетки мало, при большом — возможно «опрокидывание» профиля скорости, связанное с перестройкой потока и оттоком массы потока из области больших скоростей в область малых скоростей.

В настоящей работе рассмотрено численное моделирование гидродинамики потока на входе в макет активной зоны ядерного реактора с выравнивающей решеткой, установленной в тракт подвода воздуха, показано ее влияние на уменьшение скоростной неравномерности и проведена валидация расчетной методики по данным физических экспериментов.

Цель настоящей работы — исследование влияния конструкции выравнивающей решетки на гидродинамику потока.

Объект исследования. Рассмотрим тракт макета канальной активной зоны ядерного реактора (рис. 1), выполненный в виде цилиндрической обечайки с внутренним диаметром 623 мм и уплощением $H/D = 1$, на входе из которой установлена перфорированная плита 1, создающая струйное течение, аналогичное течению, формируемому каналами активной зоны. Плита содержит 241 цилиндрическое отверстие диаметром 25 мм, размещенное в узлах правильной треугольной упаковки с относительным

шагом $x = s/d = 1,2$. Поток подается к макету через четыре патрубка подвода 3 с относительными диаметрами $D_0/D = 0,15$. На входе в макет установлена выравнивающая решетка 2 для уменьшения неравномерности скорости, созданной патрубками подвода. Выравнивающая решетка имеет цилиндрические проливные отверстия диаметром $d_0 = 10$ мм, выполненные по квадратной упаковке с относительным шагом $x_0 = s_0/d_0 = 1,25$, что обеспечивает пористость 50 % в области перфорации. Поток из перфорированной плиты выходит в кольцевой зазор, имитирующий тракт течения в окрестностях биологической защиты.

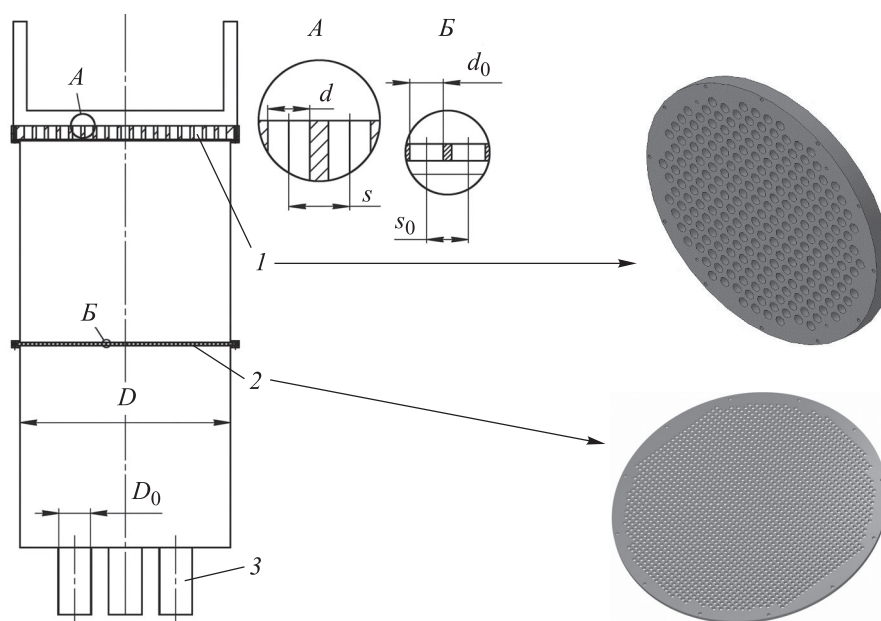


Рис. 1. Схема тракта макета канальной активной зоны ядерного реактора

Расчетная методика. Рассмотрим расчетную область — 1/4 часть тракта течения потока воздуха (рис. 2), ограниченную взаимно перпендикулярными плоскостями симметрии. В расчетной области моделируется движение несжимаемого потока воздуха (локальные скорости потока не превышают 34 м/с, что соответствует значению числа Маха $M \approx 0,1$). Воздух подается через патрубок подвода по прямолинейному цилиндрическому каналу длиной $L/D_0 = 7,5$. На входе в участок задается постоянство профиля скорости; интенсивность и масштаб турбулентности приняты равными 0,01 и 0,01 м. На выходе принимается постоянство статического давления, дополненное интегральным уравнением баланса массы. Все твердые поверхности моделируются гидравлически гладкими при реализации условия прилипания.

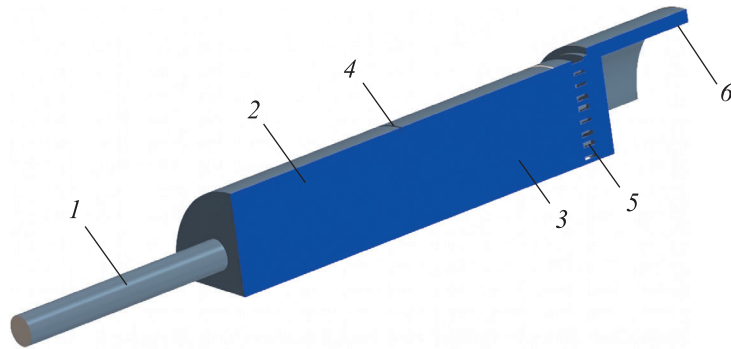


Рис. 2. Расчетная область — 1/4 часть тракта течения потока воздуха:
1, 6 — участки подвода и выхода; 2, 3 — участки перед и за выравнивающей решеткой;
4, 5 — перфорированная выравнивающая решетка и плита

Модель базируется на стационарных осредненных уравнениях движения сплошной среды (RANS [14, 15]), замыкаемых двухпараметрической моделью турбулентной вязкости:

$$\sum_j \frac{\partial \bar{V}_j}{\partial x_j} = 0$$

— уравнение неразрывности;

$$\rho \sum_j \bar{V}_j \frac{\partial \bar{V}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \sum_j \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{V}_i}{\partial x_j} - \rho \overline{V'_i V'_j} \right)$$

— уравнение сохранения количества движения. Здесь ρ — плотность; $\bar{V}_i$ — осредненная по времени проекция вектора скорости в направлении x_i ; $\bar{P}$ — осредненное давление; μ — вязкость.

Турбулентные напряжения можно записать как

$$-\rho \overline{V'_i V'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{V}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{V}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij},$$

где μ_t — коэффициент турбулентной динамической вязкости; $k = (\overline{V_x'^2} + \overline{V_y'^2} + \overline{V_z'^2})/2$ — кинетическая энергия турбулентности на единицу массы потока (полусумма осредненных квадратов пульсационных составляющих проекций вектора скорости); δ_{ij} — оператор Кронекера, равный единице для диагональных компонент тензора напряжений и нулю для недиагональных компонент.

Турбулентная вязкость определяется через кинетическую энергию турбулентности k и скорость ее диссипации ε (k - ε -модель):

$$\mu_T = \frac{C_\mu \rho k^2}{\varepsilon}.$$

В стандартной k - ε -модели уравнения сохранения k и ε имеют вид [6]:

$$\begin{aligned} \rho \sum_j \bar{V}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} &= \sum_j \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_T) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \mu_T \sum_i \sum_j \frac{\partial \bar{V}_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \bar{V}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{V}_j}{\partial x_i} \right) - \rho \varepsilon; \\ \rho \sum_j \bar{V}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} &= \sum_j \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \\ &+ \frac{\varepsilon}{k} C_{\varepsilon 1} \mu_T \sum_i \sum_j \frac{\partial \bar{V}_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \bar{V}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{V}_j}{\partial x_i} \right) - \rho C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k}. \end{aligned}$$

Эмпирические коэффициенты стандартной модели следующие: $\sigma_\varepsilon = 1,3$; $C_{\varepsilon 1} = 1,44$; $C_{\varepsilon 2} = 1,92$; $C_\mu = 0,09$.

Подобная математическая модель, применительно к реакторостроению, приведена в [16–18]. Моделирование расчетной области проводилось с помощью ПК Star-CCM+. На основании предварительных расчетов по исследованию сеточной сходимости выбрана схема дискретизации расчетной области, состоящая из призматических контрольных объемов [19] с характерным размером 2,5 мм.

Результаты расчета. Линии тока в расчетной области при циркуляции воздуха с массовым расходом 0,266 кг/с (через патрубок) приведены на рис. 3. Резкое расширение проходного сечения при выходе потока из патрубков подвода приводит к отрыву потока, образованию крупных

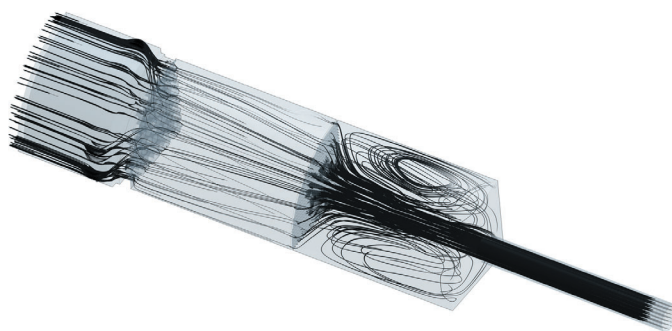


Рис. 3. Линии тока в расчетной области при циркуляции воздуха с массовым расходом 0,266 кг/с (через патрубок)

вихрей в окрестности цилиндрической обечайки. Профиль осевой скорости вдоль радиальной линии, проходящей через ось патрубка подвода, перед и за выравнивающей решеткой приведен на рис. 4. Наблюдается эффективное выравнивание решеткой поля скорости потока на входном участке: максимальное значение скорости, отнесенное к среднему расходу, уменьшается с 12,1 до 1,1.

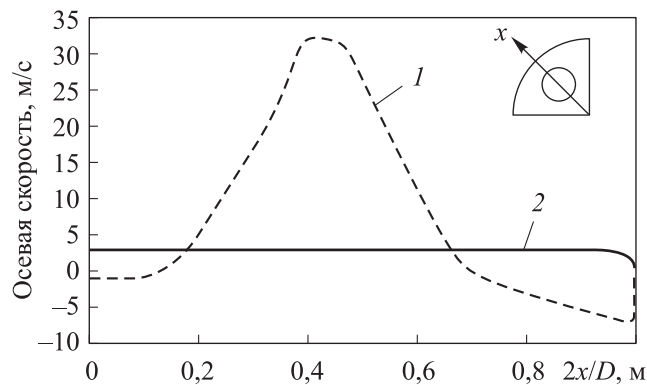


Рис. 4. Профиль осевой скорости вдоль радиальной линии (оси x), проходящей через ось патрубка подвода, перед (1) и за (2) выравнивающей решеткой

Валидация результатов расчета. Валидацию проводили по коэффициенту гидравлического сопротивления (КГС) перфорированных выравнивающих решеток и мембран (справочные данные) и по локальным значениям статического давления (экспериментальные данные).

В справочной литературе предполагается зависимость КГС перфорированных выравнивающих решеток и мембран от их пористости f (отношение площади проходного сечения проливных отверстий к площади проходного сечения канала, в котором установлена выравнивающая решетка). Справочные данные получены в условиях стабилизированного течения перед выравнивающими решетками, когда распределение скорости в ядре потока близко к равномерному для турбулентного режима течения. В справочнике И.Е. Идельчика¹ приведена зависимость

$$\zeta = \left[\left(1 + \frac{0,707}{\sqrt{1-f}} \right) \left(\frac{1}{f} - 1 \right) \right]^2. \quad (1)$$

¹ Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М., Машиностроение, 1992.

В справочнике П.Л. Кириллова² приведена зависимость, которая без учета трения в отверстиях, вклад которого в местное сопротивление мал, из-за малой толщины решетки δ , имеет вид:

$$\zeta = \frac{0,5(1-f)^{0,75} + \tau(1-f)^{1,375} + (1-f)^2}{f^2}; \quad (2)$$

$$\tau = (2,4 - \delta/d_0)^{-\varphi(\delta/d_0)};$$

$$\varphi(\delta/d_0) = 0,25 + 0,535 \frac{(\delta/d_0)^8}{(0,05 + \delta/d_0)}.$$

Расчетные значения КГС получены в условиях существенно неравномерного распределения скорости перед выравнивающей решеткой для диапазона расхода через расчетную область 0,081...0,266 кг/с, что соответствует значению числа Рейнольдса $(5,81-1,72) \cdot 10^5$, рассчитанного по среднерасходной скорости перед выравнивающей решеткой и внутреннему диаметру D цилиндрической обечайки (см. рис. 4). Коэффициент гидравлического сопротивления определялся по формуле

$$\zeta = \frac{\overline{\Delta P_{\text{полн}}}}{\rho V^2 / 2},$$

где $\overline{\Delta P_{\text{полн}}}$ — разность осредненных по площади полных напоров, определяемых как сумма статического давления и скоростного напора, в сечениях, отстоящих от выравнивающей решетки на расстояниях 110 мм (перед решеткой) и 505 мм (за решеткой); $\rho V^2 / 2$ — скоростной напор перед решеткой.

Результаты сравнения расчетных и справочных значений КГС приведены в табл. 1, данные которой иллюстрируют хорошее соответствие результатов численного моделирования КГС справочным данным: расчетные значения КГС лежат в области неопределенности справочных формул и отличаются от них не более чем на 10 %. Отметим, что полученный результат демонстрирует слабое влияние распределения скорости перед выравнивающей решеткой на ее гидравлическое сопротивление.

² Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П. Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы). М., Энергоатомиздат, 1990.

Таблица 1

Сравнение расчетных и справочных значений КГС

Расход, кг/с	Re	КГС		
		расчетный	справочный по формуле	
			(1)	(2)
0,266	$5,81 \cdot 10^5$	4,31	4,64	4,06
0,240	$5,08 \cdot 10^5$	4,38		
0,204	$4,29 \cdot 10^5$	4,41		
0,164	$3,47 \cdot 10^5$	4,43		
0,081	$1,72 \cdot 10^5$	4,39		

Экспериментальные данные о локальных значениях статического давления на поверхности цилиндрической обечайки получены на аэродинамическом стенде АД-1 кафедры «Ядерные реакторы и установки» МГТУ им. Н.Э. Баумана [2, 20]. В эксперименте фиксировалось статическое давление на обечайке в двух точках: перед выравнивающей решеткой на удалении 110 мм, за решеткой на расстоянии 505 мм. Поперечное сечение стенда в месте отбора P_1 перед выравнивающей решеткой в периферийных областях 1–6 приведено на рис. 5. Конструкция решетки определяет распределение статического давления на поверхности обечайки в окрестности выравнивающей решетки: в периферийных областях, где отсутствует перфорация (см. рис. 5, области 1–4), происходят торможение потока и локальное возрастание статического давления по сравнению со статическим давлением в ядре потока в центральной части выравнивающей решетки; в периферийных областях с перфорацией (см. рис. 5, области 5, 6) подобного увеличения давления не происходит. Такое течение приводит к немонотонному изменению статического давления по периметру обечайки в сечениях перед выравнивающей решеткой.

Расчетные распределения давления, избыточного относительно среднего давления, по периметру обечайки в сечении размещения отбора перед выравнивающей решеткой, отнесенные к скоростному напору, приведены на рис. 6, а. Области избыточного давления и разрежения коррелируют с местами прилегания перфорации к обечайке (см. рис. 5, 6, а). Таким образом, отборы статического давления, выполненные на обечайке в окрестности выравнивающей решетки, фиксируют значения статического давления, отличные от среднего по сечению, что характерно для нестабилизированных течений.

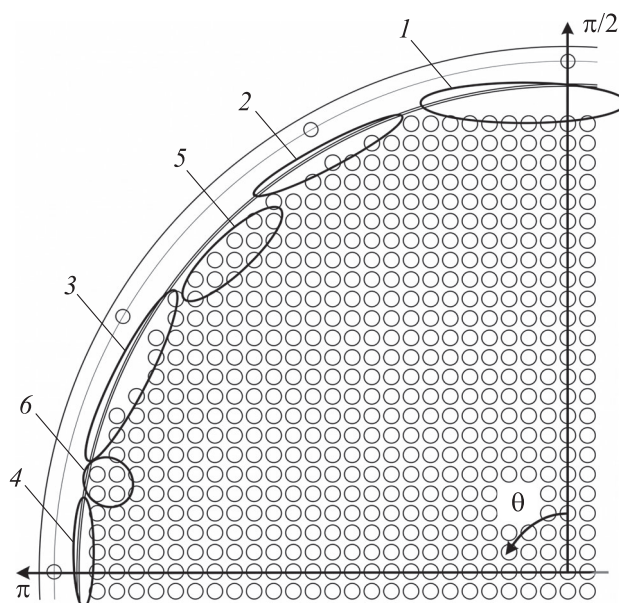


Рис. 5. Поперечное сечение стенда в месте отбора P_1 перед выравнивающей решеткой в периферийных областях 1–6

За выравнивающей решеткой поток в областях без перфорации ускоряется за счет притока массы из расширяющихся струй, выходящих из проливных отверстий. Области разрежения и избыточного давления смещаются относительно их расположения перед выравнивающей решеткой (рис. 6, б). При этом отличие локальных значений статического давления по периметру обечайки в области расположения отбора слабо отличается от среднего по сечению давления (по сравнению с областью расположения отбора перед выравнивающей решеткой).

Сравнение расчетных и экспериментальных данных приведено в табл. 2.

В экспериментах зафиксировано отрицательное значение перепада давления ΔP_{12} , измеренного как разность давлений P_1 и P_2 в отборах перед и за выравнивающей решеткой. Этот результат объясняется следующими причинами:

- существенная скоростная неравномерность перед выравнивающей решеткой индуцирует существенную неравномерность распределения статического давления, которая характеризуется областью разрежения в струе; эта область вносит существенный вклад в результат осреднения статического давления по площади, таким образом, что среднее по сечению статическое давление перед выравнивающей решеткой оказывается меньше среднего по сечению статического давления за выравнивающей

решеткой, где профиль скорости близок к равномерному, при сохранении положительного значения перепада полных давлений (см. табл. 2);

– отбор статического давления перед выравнивающей решеткой располагается в области, где статическое давление по периметру обечайки оказывается меньше среднего по сечению (см. рис. 6, а);

– при сравнении расчетных и экспериментальных данных (см. табл. 2) отклонение составляет не более 7 %.

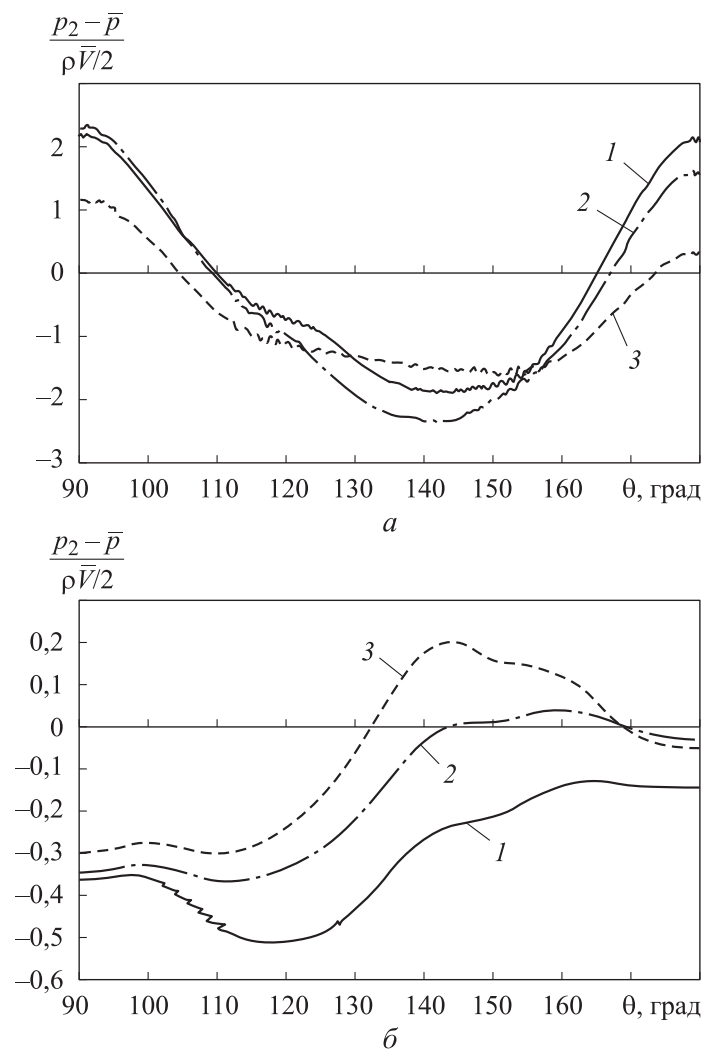


Рис. 6. Расчетные распределения давления, избыточного относительно среднего давления, по периметру обечайки в сечении размещения отбора перед (а) и после (б) выравнивающей решетки для $Re = 5,81 \cdot 10^5$ (1), $5,08 \cdot 10^5$ (2), $4,29 \cdot 10^5$ (3)

Расчетные и экспериментальные значения перепада статического давления

Расход, кг/с	Re	ΔP_{12} , Па	
		расчет	эксперимент
0,266	$5,81 \cdot 10^5$	-60	-64
0,240	$5,08 \cdot 10^5$	-48	-47
0,204	$4,29 \cdot 10^5$	-36	-38

Закключение. Выполнено численное моделирование течения в макете активной зоны ядерного реактора. Показано влияние выравнивающей решетки на скоростную неравномерность потока, сформированного трактом подвода.

Продемонстрирована высокая эффективность выравнивающей решетки с 50%-ной пористостью, которая обеспечивает снижение в 11 раз скоростной неравномерности, сформированной трактом подвода.

Проведена валидация расчетной методики по справочным и экспериментальным данным. Отклонение расчетных значений КГС выравнивающей решетки от справочных данных составляет не более 10 %.

Показано, что на КГС, определяемый как разность полных напоров, отнесенная к скоростному напору, слабо влияет распределение скорости перед выравнивающей решеткой. При этом существенная скоростная неравномерность может заметно влиять на значение среднего по сечению статического давления.

Проанализированы локальные эффекты, индуцирующие неравномерность распределения статического давления в периферийной области в окрестности выравнивающей решетки, связанные с ее конструкцией. Значение неравномерности зависит от распределения скорости потока в сечении и конструкции выравнивающей решетки.

Проведено сравнение данных о перепаде статического давления в точках измерения на обечайке макета, полученных в результате расчета и эксперимента, проведенных на аэродинамическом стенде кафедры «Ядерные реакторы и установки» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Отклонение расчетных и экспериментальных данных не превышает 7 %.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Логвинов С.А., Безруков Ю.А., Драгунов Ю.Г. Экспериментальное обоснование теплогидравлической надежности реакторов ВВЭР. М., Академкнига, 2004.

- [2] Першуков В.А., Архангельский Н.В., Кононов О.Е. и др. Теплофизическая стендовая база атомной энергетики России и Казахстана. Саров, РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2016.
- [3] Крапивцев В.Г., Солонин В.И. Модельные исследования гидродинамики потока теплоносителя на входе в активную зону ВВЭР-1000. *Атомная энергия*, 2021, т. 130, № 1, с. 14–20. EDN: KRTCHT
- [4] Крапивцев В.Г., Солонин В.И. Модельные исследования межпетлевого перемешивания теплоносителя во внутриреакторном напорном тракте ВВЭР-1000. *Атомная энергия*, 2018, т. 125, № 5, с. 271–277. EDN: YPLNED
- [5] Крапивцев В.Г. Модельные исследования гидродинамики течения теплоносителя во внутриреакторном напорном тракте ВВЭР-1000. *Атомная энергия*, 2017, т. 122, № 5, с. 253–257. EDN: YREFJP
- [6] Getya S.I., Krapivtsev V.G., Markov P.V., et al. Modeling temperature nonuniformities in a fuel-element bundle of a VVER-1000 fuel-assembly. *At. Energy*, 2013, vol. 114, no. 1, pp. 69–72. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-013-9673-3>
- [7] Перевезенцев В.В. Особенности формирования гидродинамических нагрузок на твэлы в зависимости от структуры течения теплоносителя на входе в ТВС ВВЭР. *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерно-реакторные константы*, 2021, № 3, с. 136–142. EDN: XLKIGB
- [8] Перевезенцев В.В., Солонин В.И. Экспериментальное исследование гидродинамического возбуждения вибраций твэлов в ТВС ВВЭР-440. *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерно-реакторные константы*, 2022, № 2, с. 141–147. EDN: EIJKGI
- [9] Перевезенцев В.В. Сравнительный анализ вибрационной активности пучков твэлов ТВС ВВЭР в турбулентном потоке теплоносителя. *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерно-реакторные константы*, 2025, № 1, с. 194–201. EDN: JPCEXF
- [10] Повх И.Л. Аэродинамический эксперимент в машиностроении. Л., Машиностроение, 1974.
- [11] Дмитриев С.М., Демкина Т.Д., Доброва А.А. и др. Исследования особенностей течения теплоносителя на входе в тепловыделяющую сборку кассетного типа реактора РИТМ-200 атомной станции малой мощности. *Инженерно-физический журнал*, 2025, т. 98, № 2, с. 394–403. EDN: IHXBVK
- [12] Дмитриев С.М., Демкина Т.Д., Доброва А.А. и др. Исследование влияния элементов конструкции входного участка тепловыделяющей сборки реактора РИТМ на гидродинамику теплоносителя в пучке тепловыделяющих элементов. *Теплоэнергетика*, 2025, № 8, с. 5–18. DOI: <https://doi.org/10.56304/S0040363625700894>
- [13] Дмитриев С.М., Доронков Д.В., Хробостов А.Е. и др. Гидродинамика теплоносителя в активной зоне реактора ВВЭР с ТВСА-Т. Н. Новгород, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2023.
- [14] Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М., Наука, 1974.
- [15] Авраменко М.И. О k - ε -модели турбулентности. Снежинск, Изд-во РФЯЦ-ВНИИТФ, 2010.

- [16] Марков П.В., Солонин В.И. Вторичные течения и поперечный перенос в пучках цилиндрических тепловыделяющих элементов. *Проблемы машиностроения и автоматизации*, 2023, № 3, с. 79–85. EDN: DVKLXP
- [17] Алексеев Д.И., Марков П.В. Валидация численного метода решения задачи смешения потока в области кольцевого зазора водо-водяного энергетического реактора. *Проблемы машиностроения и автоматизации*, 2022, № 4, с. 137–143. DOI: https://doi.org/10.52261/02346206_2022_4_137
- [18] Марков П.В. Интенсификация перемешивания в ТВС водоохлаждаемых реакторов сотовыми перемешивающими решетками. *Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика*, 2012, № 1, с. 117–125. EDN: OWYDCJ
- [19] Патанкар С.В. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М., Энергоатомиздат, 1984.
- [20] Драгунов Ю.Г., Лемехов В.В., Солонин В.И. и др. Моделирование распределения расхода теплоносителя по элементам активной зоны реакторной установки БРЕСТ-ОД-300. *Атомная энергия*, 2022, т. 133, № 1, с. 21–29. EDN: VKXNAF

Кислов Александр Сергеевич — аспирант кафедры «Ядерные реакторы и установки» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Марков Павел Владимирович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Ядерные реакторы и установки» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Кислов А.С., Марков П.В. Использование выравнивающих решеток для уменьшения неравномерности потока в макете активной зоны ядерного реактора. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2026, № 2 (157), с. 121–136. EDN: QCJCUY

**USING EQUALIZING GRIDS TO REDUCE FLOW UNEVENNESS
IN THE LAYOUT OF THE ACTIVE ZONE OF A NUCLEAR REACTOR**

A.S. Kislov
P.V. Markov

kas17ea225@student.bmstu.ru
markov.pv@bmstu.ru

BMSTU, Moscow, Russian Federation

Abstract

The article examines the effect of the equalizing grille design on the hydrodynamics of the flow in the inlet section of the aerodynamic layout of the nuclear reactor core. The results of numerical simulation of flow hydrodynamics using stationary averaged Reynolds

Keywords

Equalizing grid, aerodynamic experiment, computational fluid dynamics

equations, which are closed by a two-parameter k - ε turbulence model, are presented. As a result of the simulation, the values of the hydraulic resistance coefficient of the leveling grid and the local values of static pressure on the periphery of the model in the vicinity of the leveling grid under different flow conditions were determined. The effect of the grating on the magnitude of the flow velocity unevenness formed by the design of the supply path of the aerodynamic layout is shown, and an assessment of the effectiveness of axial velocity profile alignment is presented. The analysis of the flow and local effects of uneven static pressure distribution in the vicinity of the leveling grid is carried out. The effects of the design of the leveling grid on the formation of the flow, the distribution of static pressure at the periphery, and the value of the average static pressure in the sections before and after the grid for various flow modes are shown. The calculation method is validated using reference and experimental data obtained on an aerodynamic model. The deviation of the simulation results from the reference data and physical experiments does not exceed 10 %

Received 20.08.2025

Accepted 02.12.2025

© Author(s), 2026

REFERENCES

- [1] Logvinov S.A., Bezrukov Yu.A., Dragunov Yu.G. Eksperimentalnoe obosnovanie teplogidravlicheskoy nadezhnosti reaktorov VVER [Experimental justification of the thermal-hydraulic reliability of VVER reactors]. Moscow, Akademkniga Publ., 2004.
- [2] Pershukov V.A., Arkhangelskiy N.V., Kononov O.E., et al. Teplofizicheskaya stendovaya baza atomnoy energetiki Rossii i Kazakhstana [Thermophysical test bench base of the nuclear power industry of Russia and Kazakhstan]. Sarov, RFYaTs-VNIIEF Publ., 2016.
- [3] Krapivtsev V.G., Solonin V.I. Model studies of coolant flow hydrodynamics at VVER-1000 core entry. *At. Energy*, 2021, vol. 130, no. 1, pp. 13–19.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-021-00766-z>
- [4] Krapivtsev V.G., Solonin V.I. Model studies of interloop coolant mixing in VVER-1000 in-reactor pressure channel. *At. Energy*, 2019, vol. 125, no. 5, pp. 307–313.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-019-00486-5>
- [5] Krapivtsev V.G. Model studies of coolant flow hydrodynamics in VVER-1000 in-reactor pressure channel. *At. Energy*, 2017, vol. 122, no. 5, pp. 304–310.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-017-0271-6>
- [6] Getya S.I., Krapivtsev V.G., Markov P.V., et al. Modeling temperature nonuniformities in a fuel-element bundle of a VVER-1000 fuel-assembly. *At. Energy*, 2013, vol. 114, no. 1, pp. 69–72 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-013-9673-3>

- [7] Perevezentsev V.V. Features of the formation of hydrodynamic loads on the fuel rods depending on the structure of the coolant flow at the entrance to the fuel assembly VVER. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Ser. Yaderno-reaktornye konstanty* [Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Nuclear and Reactor Constants], 2021, no. 3, pp. 136–142 (in Russ.). EDN: XLKIGB
- [8] Perevezentsev V.V., Solonin V.I. Experimental study of hydrodynamic excitation of fuel rods vibrations in fuel assembly of VVER-440. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Ser. Yaderno-reaktornye konstanty* [Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Nuclear and Reactor Constants], 2022, no. 2, pp. 141–147 (in Russ.). EDN: EIJKGI
- [9] Perevezentsev V.V. Sravnitelnyy analiz vibratsionnoy aktivnosti puchkov tvelov TVS VVER v turbulentnom potoke teplonositya. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Ser. Yaderno-reaktornye konstanty* [Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Nuclear and Reactor Constants], 2025, no. 1, pp. 194–201 (in Russ.). EDN: JPCEXF
- [10] Povkh I.L. Aerodinamicheskiy eksperiment v mashinostroenii [Aerodynamic experiment in mechanical engineering]. Leningrad, Mashinostroyeniye Publ., 1974.
- [11] Dmitriev S.M., Demkina T.D., Dobrova A.A., et al. Investigations of characteristic properties of the coolant flow at the inlet to a cassette fuel assembly of a RITM-200 reactor of a low-power nuclear plant. *J. Eng. Phys. Thermophy.*, 2025, vol. 98, no. 2, pp. 398–408. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10891-025-03113-2>
- [12] Dmitriev S.M., Demkina T.D., Dobrova A.A., et al. Investigation into the effect of structural elements of the entrance section of a fuel assembly in the RITM reactor on the coolant hydrodynamics in a fuel-rod bundle. *Therm. Eng.*, 2025, vol. 72, no. 8, pp. 617–628. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0040601525700211>
- [13] Dmitriev S.M., Doronkov D.V., Khrobostov A.E., et al. Gidrodinamika teplonositya v aktivnoy zone reaktora VVER s TVSA-T [Hydrodynamics of the coolant in the core of the VVER reactor with TVSA-T]. N. Novgorod, NGTU im. R.E. Alekseeva Publ., 2023.
- [14] Schlichting H. Grenzschicht-Theorie. Karlsruhe, G. Braun, 1951.
- [15] Avramenko M.I. O k - ε -modeli turbulentnosti [On k - ε -models of turbulence]. Snezhinsk, RFYaTs–VNIITF Publ., 2010.
- [16] Markov P.V., Solonin V.I. Secondary flows and transverse exchange in cylindrical fuel element bundles. *J. Mach. Manuf. Reliab.*, 2023, vol. 52, no. S2, pp. S180–S186. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1052618823100096>
- [17] Alekseev D.I., Markov P.V. Validation of the numerical method for solving the flow mixing problem in the annular gap of a water–water energetic reactor. *J. Mach. Manuf. Reliab.*, 2023, vol. 52, no. 7, pp. 726–732. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1052618823070038>
- [18] Markov P.V. The intensification of mass transfer in LWR rods bundles by cellular numerical heat transfer and fluid flow. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Yadernaya energetika*, 2012, no. 1, pp. 117–125 (in Russ.). EDN: OWYDCJ

- [19] Patankar S.V. Numerical heat transfer and fluid flow. New York, Hemisphere, 1980.
- [20] Dragunov Yu.G., Lemekhov V.V., Solonin V.I., et al. Modeling of the coolant flow distribution over the elements of a BREST-OD-300 reactor core. *At. Energy*, 2022, vol. 133, no. 1, pp. 20–29. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-023-00967-8>

Kislov A.S. — Post-Graduate Student, Department of Nuclear Reactors and Installations, BMSTU (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Markov P.V. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Nuclear Reactors and Installations, BMSTU (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Kislov A.S., Markov P.V. Using equalizing grids to reduce flow unevenness in the layout of the active zone of a nuclear reactor. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2026, no. 2 (157), pp. 121–136 (in Russ.).

EDN: QCJCUY