

УДК 532.5

С.М. Дмитриев¹, О.Л. Крутякова², А.С. Козелков^{1,2}, А.А. Куркин¹,
В.В. Курулин², О.В. Денисова², Д.А. Уткин²

МИНИМАЛЬНЫЙ БАЗИС ЗАДАЧ ВАЛИДАЦИИ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕЧЕНИЙ С НИЗКИМИ ЧИСЛАМИ ПРАНДТЛЯ

Нижегородский государственный технический университет им. П. Е. Алексеева¹,
Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики –
Российский федеральный ядерный центр, г. Саров²

Процесс валидации, определяет степень точности, с которой модель отображает объективную реальность с точки зрения предполагаемого использования и является важным этапом на пути научно-промышленного внедрения разрабатываемых программ. В настоящей работе представлен минимальный базис задач валидации методов моделирования течений жидкометаллических теплоносителей, характеризующиеся низкими числами Прандтля. С точки зрения численного моделирования течений с низкими числами Прандтля основной проблемой является турбулентность. Наиболее распространенные RANS модели турбулентности основаны на идее использования турбулентной вязкости и турбулентной теплопроводности, причем турбулентная теплопроводность напрямую связывается с турбулентной вязкостью с помощью фиксированного значения турбулентного числа Прандтля. Базис задач включает внутренние течения в трубах и каналах различной формы, смешение разнотемпературных потоков, а также течение в пучке стрелой. Для каждой задачи приводится подробное описание постановки и имеющиеся для нее опорные данные. Представлены результаты численного моделирования рассматриваемых задач по пакету программ ЛОГОС в рамках RANS моделей турбулентности с применением корреляций для определения турбулентного числа Прандтля и уточнения полученного решения для задач с высокой молекулярной теплопроводностью.

Ключевые слова: численное моделирование, турбулентность, низкие числа Прандтля, турбулентный теплообмен, теплообмен в жидких металлах.

Введение

Процесс валидации выявляет границы применимости физико-математических моделей и численных схем, которые позволяют моделировать физическое явление, протекающее в естественных условиях до проведения численного эксперимента. Достоверность физико-математической модели, предназначенной для описания того или иного процесса, можно определить, оценив уровень, вносимый ею погрешности и неопределенности по сравнению с натурным экспериментом или расчетами по прямому численному моделированию. Степень точности, требуемая от результатов моделирования, зависит от предполагаемого их использования. Как правило, к каждой расчетной величине, будь то интегральная или абсолютная характеристика, предъявляются свои требования. Изложение основных принципов верификации и валидации методов CFD-моделирования представлены в [1, 2]. Процедура валидации, состоящая из стадии оценки сходимости итераций, стадии проверки решения на непротиворечивость, стадии сравнения с экспериментом, а также содержащая уровни классов задач представлена в [1, 3].

Одним из сложных и интересных классов задач вычислительной гидродинамики является моделирование турбулентного течения жидкометаллических теплоносителей (ЖМТ) [4, 5] с низкими числами Прандтля. Такие течения характеризуются зависимостью вязкости и теплопроводности от локальных свойств потока, что в существенной степени осложняет численное моделирование. Данный класс течений получил широкое применение в атомной энергетике. В настоящее время в России и за рубежом ведутся широкие исследования в области

проектирования реакторных установок на быстрых нейтронах с жидкометаллическими теплоносителями [6]. Для увеличения срока службы и повышения безопасности действующих и проектируемых реакторных установок требуется детальное исследование происходящих в них процессов тепломассопереноса. Экспериментальные исследования такого класса течений крайне затруднительны, в силу своей высокочувствительности, поэтому безальтернативным методом является применение численного моделирования [6, 7].

С точки зрения численного моделирования течений с низкими числами Прандтля основной особенностью является учет переноса тепла, как за счет конвективного перемешивания потока, так и за счет молекулярной теплопроводности самого теплоносителя. Интенсивное изменение температуры жидкости за счет большой теплопроводности может быть на том же уровне что и изменение температуры вследствие турбулентного перемешивания [8]. Этот факт определяет достаточно существенную долю тепла, переносимого за счет молекулярной теплопроводности, и обеспечивает лучшие теплоотводящие свойства жидких металлов. Вследствие чего встает вопрос правильного разрешения турбулентных характеристик [8-11].

Целью данной работы является создание валидационного базиса задач течения ЖМТ. Для относительной полноты валидационный базис должен включать задачи течения в каналах различной формы, имеющие надежные экспериментальные, либо численные данные. Существует достаточно много работ по задаче о течении в канале, ограниченном двумя плоскими поверхностями [12, 13]. В [12] представлены численные данные, полученные путем прямого численного моделирования о распределении безразмерной температуры по высоте канала. На данной задаче показано влияние применения корреляций для турбулентного числа Прандтля. Задачи о неравномерном охлаждении и нагревании труб с различного вида ЖМТ, имеющие экспериментальные данные или вычисленные аналитически, носят высокий прикладной характер [14, 15] и в достаточной степени анализируют турбулентный теплообмен в жидкометаллической среде. Представлены результаты численного моделирования эксперимента TEFLU [16], где рассматривается смешение разнотемпературных потоков натрия при различных режимах течения. На задаче перемешивания трех струй натриевого теплоносителя определяются нестационарные характеристики потока, результаты сравниваются с экспериментальными данными [17, 18]. Характерной особенностью атомных энергетических установок является теплообмен в пучках труб, в расчете эксперимента TEGENA рассматривается распределение температуры вблизи обогреваемых труб, обтекаемых потоком натриевого теплоносителя [19, 20]. Учет закрученности потока был рассмотрен в задаче о гидродинамике и теплообмене в потоке ртутного теплоносителя в кольцевом канале, имеющей экспериментальные данные [21, 22].

Для решения задач используется ЛОГОС – отечественный пакет программ инженерного анализа, предназначенный для решения сопряженных трехмерных задач конвективного тепломассопереноса, аэродинамики, гидродинамики и прочности на высокопараллельных ЭВМ. Он успешно прошел верификацию и показал достаточно хорошие результаты на серии различных гидродинамических задач [8, 9], включая распространение гравитационных волн на свободной поверхности (цунами) [28, 29] и промышленных задач [26]. Ускорение вычислений для проведения расчетов на высокопроизводительных супер-ЭВМ осуществляется многосеточным методом [27]. Для моделирования турбулентности используется модель турбулентности SST [24], а также модель турбулентности EARSM [9, 25], применяемая в случае анизотропных течений и течений вблизи двугранных углов. Для моделирования турбулентного теплообмена используется фиксированное значение турбулентного числа Прандтля. Такой подход основан на идее об аналогичности процесса переноса импульса и переноса тепла [4, 5], что вполне применимо для сред с числом Прандтля, близким к единице, но может приводить к некорректному результату для сред с низкими числами Прандтля. Значение турбулентного числа Прандтля выбиралось несколькими способами для задачи о течении в канале, где и показано его влияние. Было выбрано стандартное значение $Pr_t = 0.9$, а также турбулент-

ное число Прандтля, вычисленное с использованием существующих эмпирических корреляций Рейнольдса [10]. Результаты по остальным задачам базиса представлены с использованием корреляции Рейнольдса.

Базис задач валидации для течений жидкометаллических теплоносителей

Ключевым моментом моделирования ЖМТ является качественная и количественная оценка термодинамических параметров потока, а также учет физических свойств материалов, которые существенным образом зависят от температуры. Минимальный валидационный базис, применительно к течениям такого класса, содержит задачи, на основании решения которых описанные характеристики подтверждены эмпирически, имеют аналитическое или точное решение. Здесь следует подчеркнуть, что даже самый полный базис задач не претендует на окончательный, и на чем большем количестве задач будет проверен расчетный модуль, тем с большей уверенностью можно утверждать, что количество ошибок в нем сведено к минимуму. Для оценки физических характеристик предлагается использовать задачи валидации, представленные в табл. 1, которые примем за «минимальный» базис.

Описание задач базиса валидации

В данном разделе приводится детальное описание задач базиса валидации, представленных в табл. 1. Также здесь приводятся результаты валидации пакета программ ЛОГОС для данного класса задач. Полученное численное решение сравнивается с результатами экспериментальных и теоретических исследований.

Таблица 1

Таблица задач валидационного базиса

№	Название задачи	Оцениваемые параметры	Доступные данные
1	Развитое турбулентное течение с теплообменом в канале, ограниченном обогреваемыми параллельными плоскими пластинами	Распределение безразмерной скорости и температуры	Прямое численное моделирование [12, 13]
2	Течение ртути в трубе с неравномерным подогревом	Значение температуры в контрольных точках	Эксперимент [14];
3	Турбулентное течение натриевого теплоносителя в трубе с охлаждением	Значение температуры на выходе из трубы	Аналитическое решение [15]
4	Перемешивание разнотемпературных потоков натриевого теплоносителя на стенде TEFLU	Распределение скорости и температуры вдоль оси симметрии	Эксперимент [16];
5	Перемешивание трех разнотемпературных струй натриевого теплоносителя TripleJet	Среднее значение температуры в контрольных точках	Эксперимент [17]; Результаты численного моделирования [18]
6	Гидродинамика и теплообмен в потоке натриевого теплоносителя в пучке обогреваемых стержней (эксперимент TEGENA)	Распределение температуры между третьим и четвертым стержнями	Эксперимент [19, 20];
7	Гидродинамика и теплообмен в потоке ртутного теплоносителя в закрученном кольцевом канале	Распределение скорости и температуры в сечении зазора	Эксперимент [21, 22]

1. Развитое турбулентное течение с теплообменом в канале, ограниченном обогреваемыми параллельными плоскими пластинами

Задача о развитом турбулентном течении вязкой несжимаемой жидкости в канале, образованном двумя бесконечными параллельными плоскими пластинами, дает фундаментальное представление о природе течения и имеет подробные данные DNS-моделирования. Пластины обогреваются равномерным тепловым потоком и находятся на расстоянии h друг от друга. Число Рейнольдса, рассчитанное по средней динамической скорости u_τ и полувысоте канала $\delta = H/2$, составляет 395 и 640, что соответствует условиям DNS-расчетов [12, 13].

Расчетная область представляет собой прямоугольник толщиной в одну ячейку, высотой $h = 2$ м, длиной $L = 10$ м. Поскольку моделируется бесконечно длинный канал, на левой и правой границах задаются циклические граничные условия, со смещением на длину канала L . На боковых границах области задаются условия симметрии. Верхняя и нижняя границы расчетной области моделируются граничным условием стенки без проскальзывания. Чтобы получить возможность использовать периодические граничные условия при условии, что пластины обогреваются равномерным тепловым потоком q_w , выполняется переход к модифицированной температуре θ :

$$T = x \frac{\partial T_w}{\partial x} - \theta,$$

где T_w – температура стенки. Такая модификация позволяет обеспечить компенсацию роста температуры в направлении течения за счет равномерного теплового потока q_w продольным градиентом температуры стенки:

$$\frac{\partial T_w}{\partial x} = \frac{q_w}{\rho C_p U},$$

здесь U – средняя скорость в направлении течения.

Выполненные преобразования приводят к необходимости решения уравнения энергии относительно θ с источником энергии вида:

$$Q = \frac{2\rho C_p}{\text{Re}_\tau \text{Pr}}.$$

На стенках канала задается граничное условие постоянная температура $\theta = 0$.

Для того, чтобы обеспечить движение жидкости, в уравнение переноса продольной компоненты импульса вводится источник импульса, равный градиенту давления при установившемся течении в канале:

$$I_x = \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{2\rho u_\tau}{\delta}.$$

Теплофизические свойства жидкости заданы следующими: $\rho = 1$ кг/м³ – плотность, $C_p = 200$ Дж/(кг К) – удельная теплоёмкость, $\lambda = 40$ Вт/(м·К) коэффициент теплопроводности, $\mu = 0.005$ кг/(м·с) – коэффициент динамической вязкости, что обеспечивает значение числа $\text{Pr} = 0.025$. Данное значение числа Прандтля по порядку величины может соответствовать, например, сплаву свинец-висмут при температуре $\sim 250^\circ\text{C}$. В табл. 2 представлены значения источников импульса и энергии, которые задавались в тестовых расчетах для $\text{Re}_\tau = 395$ и $\text{Re}_\tau = 640$. Расчет выполнен на сетке, содержащей $64 \times 10 = 640$ (число ячеек по высоте и длине канала, соответственно). Сетки построены со сгущением к стенкам, размер ячеек от стенок изменялся по геометрической прогрессии с коэффициентом роста 1.15. Толщина пристеночной ячейки обеспечивает значение безразмерного расстояния до стенки $y^+ < 1$.

Таблица 2

Источники импульса и энергии

Re_τ	Источник импульса, I_x , Па/м	Источник энергии, Q , Вт/м ³
395	3,95	40,5
640	10,24	25

На рис. 1 представлены профили безразмерной температуры $\theta^+ = \frac{T_w - T}{T_\tau}$, где

$T_\tau = \frac{q_w}{\rho C_p u_\tau}$ – температура трения, полученные из расчетов по пакету программ ЛОГОС для

$Re_\tau = 395$ и $Re_\tau = 640$ с турбулентным числом Прандтля, рассчитанным по корреляции Рейнольдса:

$$Pr_t = \frac{1 + 100 Pe^{-0.5}}{1 + 120 Re^{-0.5}}, \quad (1)$$

которое составило $Pr_t = 3.145$ и стандартного его значения $Pr_t = 0.9$, в сравнении с данными DNS.

Из анализа представленных профилей видно, что стандартный подход с $Pr_t = 0.9$ неудовлетворительно предсказывает профиль температуры жидкости с гидродинамическим числом Прандтля $Pr = 0.025$. Безразмерная температура по высоте канала здесь существенно занижена, относительная погрешность по ее максимуму составила более 26 % для случая $Re_\tau = 395$ и 27% для случая $Re_\tau = 640$. При использовании корреляций Рейнольдса для режима течения с $Re_\tau = 395$, достигнуто хорошее согласие, погрешность около 1%, в сравнении с результатами DNS. Для режима $Re_\tau = 640$, профиль безразмерной температуры лежит чуть выше, несмотря на это, удалось снизить относительную погрешность, и она составила 7%.

2. Течение ртути в трубе с неравномерным подогревом

Задача о течении ртути в трубе с неравномерным подогревом является базовой для верификации CFD-кодов применительно к проблеме турбулентного теплообмена в жидкометаллической среде [14].

Расчетной областью является отрезок трубы длиной $1,75$ м ($92.1d$, где $d = 19$ мм – диаметр канала), при этом $50d$ – участок предварительной гидродинамической стабилизации, на котором обогрев отсутствует. Остальное расстояние $42,1d$ – обогреваемый постоянным тепловым потоком участок, на котором происходит термическая стабилизация уже при развитом турбулентном течении (рис. 2).

Рассматривается осесимметричная задача, модель представляет собой сектор с углом поворота 5° , на боковых стенках задано условие симметрии. Для расчета использовалась сеточная модель, с количеством ячеек $N_r \times N_x = 160 \times 400$ (количество ячеек в радиальном и осевом направлениях, соответственно) Размер первой пристеночной ячейки обеспечивал значение $y^+ < 1$ на участке стабилизированного течения.

Теплофизические свойства ртути заданы следующими: $\rho = 13491$ кг/м³ – плотность, $C_p = 139.07$ Дж/(кг К) – удельная теплоёмкость, $\lambda = 8.234$ Вт/(м·К) коэффициент теплопроводности, $\mu = 1.433 \cdot 10^{-3}$ Па. Режим течения соответствует числу $Pr = 0.0025$.

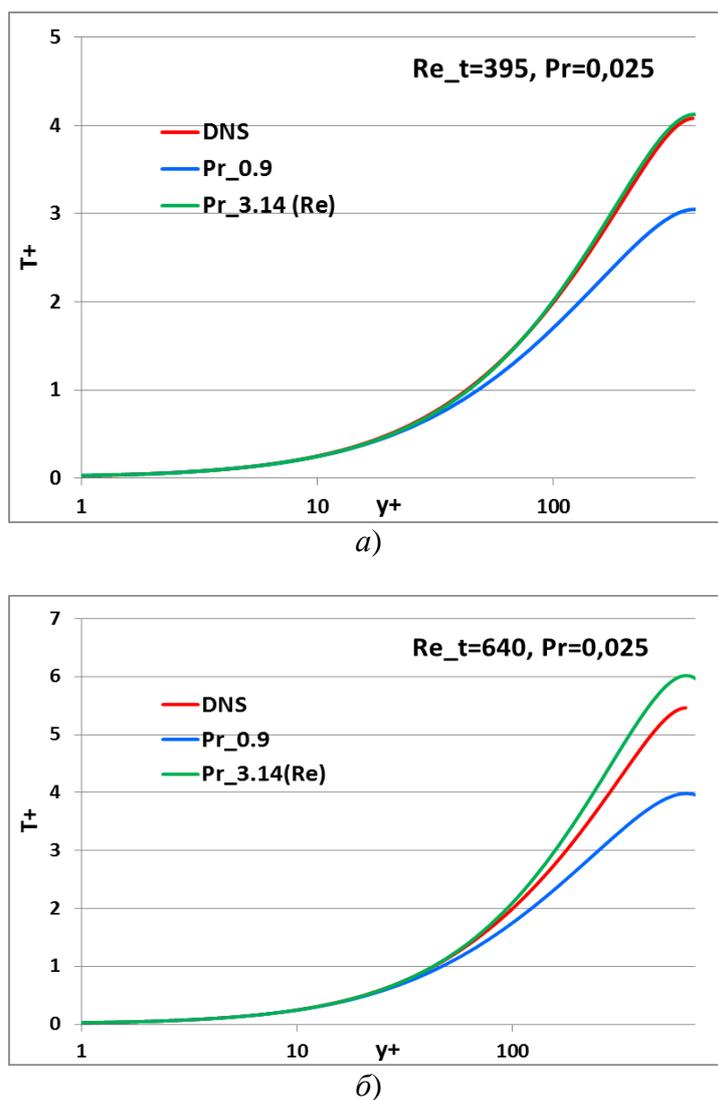


Рис. 1. Распределение безразмерной температуры для $Re = 395$ (а) и $Re = 640$ (б)

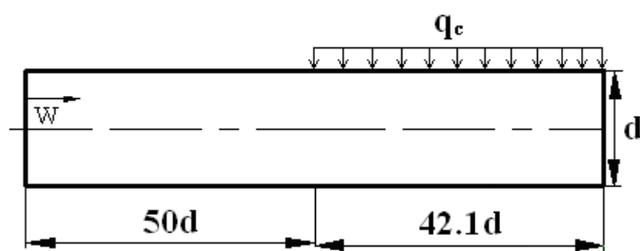


Рис. 2. Геометрия расчетной области

Во время эксперимента измерения в каждом из сечений проводились в различные моменты времени (ввиду необходимости перемещения термозонда), режимные параметры (температура, число Рейнольдса Re и тепловой поток q) соответствовали экспериментальным данным для различных сечений. На стенке задавались условия прилипания для скорости. Для температуры на обогреваемой части трубы установлено условие постоянной плотности теплового потока, остальная часть считалась адиабатической. Граничные условия на входе, а также величина плотности теплового потока заданы в соответствии с табл. 3.

Таблица 3

Параметры потока

x/d	2,0	9,0	15,0	35,0
Re	51440	49010	49180	49580
V , м/с	0,29781	0,27811	0,2782	0,2772
$T_{вх}$, К	306,46	306,05	305,52	306,22
Q , Вт/м ²	28700	28800	29500	28100

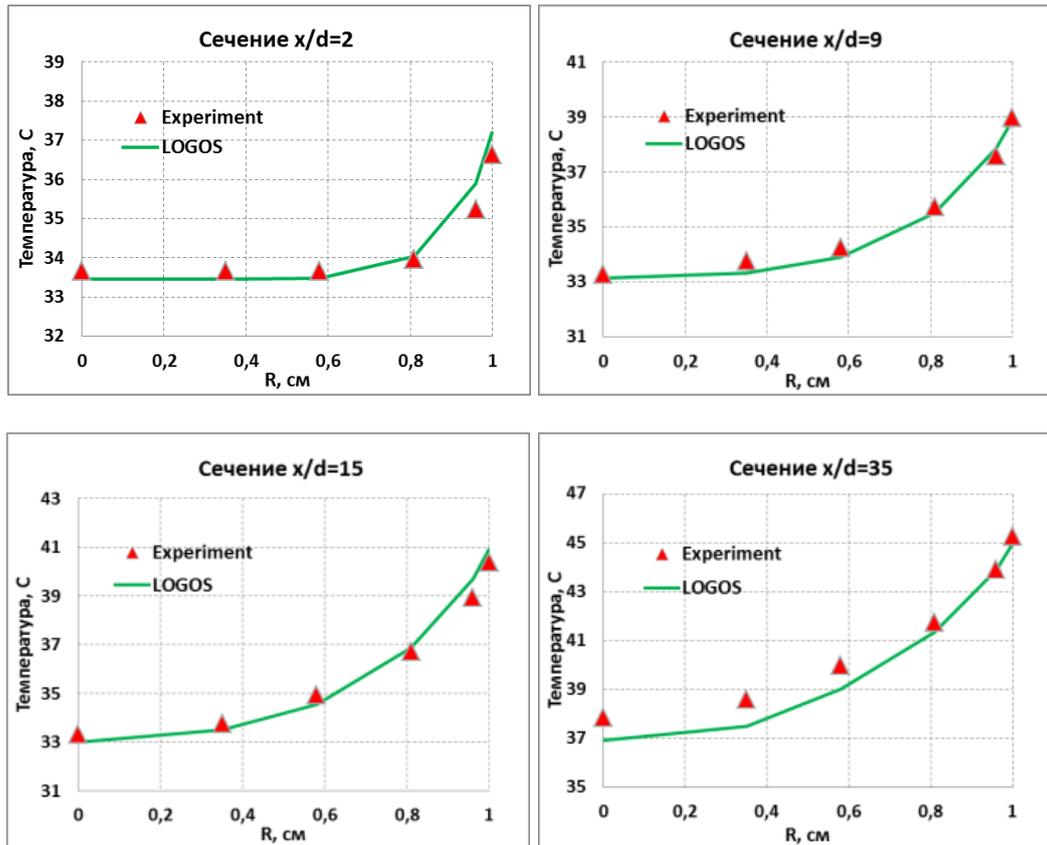


Рис. 3. Распределение температур по радиусу

Расчетная область представляет собой простую трубу постоянного сечения, поэтому для моделирования турбулентности была выбрана модель линейной вихревой вязкости SST. Турбулентное число Прандтля вычислялось с помощью корреляций Рейнольдса (1) и составило $Pr_t = 2,066$ для всех расчетных случаев. На рис. 3 приведено сопоставление данных расчета с экспериментом для четырех контрольных сечений с относительными координатами: $x/d = 2$, $x = 0,988$ м; $x/d = 9$, $x = 1,121$ м; $x/d = 15$, $x = 1,235$ м; $x/d = 35$, $x = 1,615$ м. Наибольшая разница расчетной и экспериментальной температуры видна для первых двух точек сечения $x/d = 35$, расчетные значения несколько занижены относительно экспериментальных. Максимальная относительная погрешность составила 3 %. В целом, результаты численного моделирования течения ртути в трубе с заданным потоком тепла на части поверхности в высокой степени согласуются с экспериментальными данными.

3. Турбулентное течение натриевого теплоносителя в трубе с охлаждением

Рассматривается развитое турбулентное течение натриевого теплоносителя в круглой трубе, постановка задачи и аналитическое решение описаны в [15]. Снаружи труба омывается средой с бесконечно большим расходом и бесконечно большим коэффициентом теплоотдачи.

В этом случае температуру наружной стенки трубы можно принять постоянной. В трубу подается теплоноситель с температурой T_{in} и расходом G (рис. 4). Расчетной областью является отрезок трубы длиной 2,5 м ($50d$, где $d = 0,05$ м – диаметр канала), при этом $40d$ – участок предварительной гидродинамической стабилизации, на котором обогрев отсутствует. Остальное расстояние – $10d$ – охлаждаемый участок, на котором происходит термическая стабилизация уже при развитом турбулентном течении.

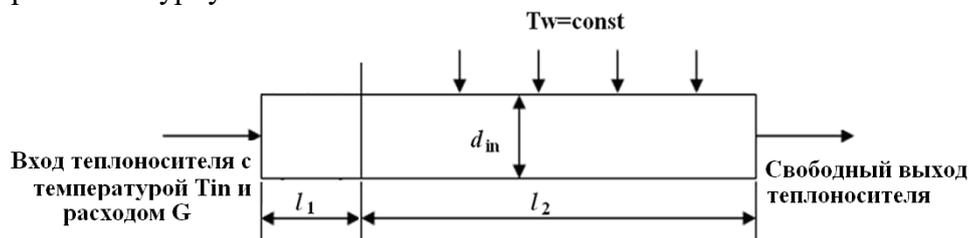


Рис. 4. Геометрия расчетной области

Расчетная модель представляет собой сектор с углом поворота 5° , на боковых стенках задано условие симметрии. Для расчета использовалась сеточная модель с количеством ячеек 32000, $N_r \times N_x = 80 \times 400$ (количество ячеек в радиальном и осевом направлениях, соответственно) Размер первой пристеночной ячейки обеспечивал значение $y^+ < 1$ на участке стабилизированного течения.

Теплофизические свойства натрия заданы следующими: $\rho = 820$ кг/м³ – плотность, $C_p = 1258$ Дж/(кг К) – удельная теплоёмкость, $\lambda = 67.3$ Вт(м·К) коэффициент теплопроводности, $\mu = 2,2 \cdot 10^{-4}$ Па – коэффициент динамической вязкости, число Прандтля $Pr = 0,0041$.

Граничные условия: на входе задана среднемассовая скорость и температура, в соответствии с табл. 4. На первом участке внешней поверхности трубы задается адиабатическое условие, это сделано для получения на входе во вторую часть стабилизированного распределения скорости потока. На охлаждаемой части трубы задается граничное условие первого рода $T = 423$ К. Рассматривается осесимметричная задача, модель представляет собой сектор с углом поворота 5 градусов, на боковых стенках задано условие симметрии.

Таблица 4

Режима расчета

№	Расход теплоносителя G^* , кг/с	Скорость на входе U , м/с	Pr_t
1	0,63	0,3913	4,7
2	1,26	0,7826	3,9
3	2,1	1,3043	3,4
4	3,151	1,9571	3
5	5,253	3,2626	2,6
6	7,353	4,5669	2,4
7	10,505	6,5246	2,2

Использовалась модель турбулентности: SST, Турбулентное число Прандтля, используемое в расчете, рассчитано с помощью корреляции Рейнольдса (1), приведено в табл. 4 в соответствии с режимом течения.

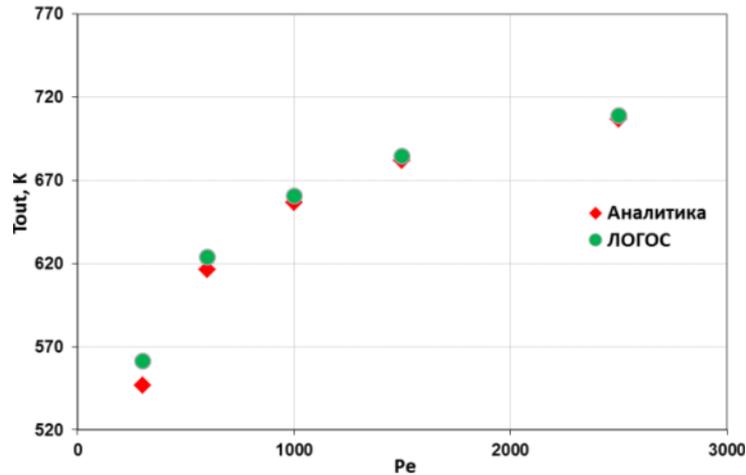


Рис. 4. Зависимость осредненной температуры на выходе от числа Пекле

Сравниваются расчетные значения температуры, усредненные по расходу на выходе из трубы с аналитическими данными (рис. 4). Результаты согласуются с аналитическим решением. Относительная погрешность уменьшается с увеличением числа Рейнольдса. Для первого расчетного случая она составила 2,7 %.

4. Перемешивание разнотемпературных потоков натриевого теплоносителя на стенде TEFLU

Стенд TEFLU [16] предназначен для моделирования процессов перемешивания разнотемпературных потоков натриевого теплоносителя. Натриевая экспериментальная установка (рис. 5) состоит из вертикальной трубы внутренним диаметром 110 мм и подвижной в продольном направлении решетки. Центральная труба является двустенной с разреженным (вакуум) кольцевым зазором. В центральное отверстие решетки подается натрий с заданным расходом и температурой. Основной поток циркулирующего в трубе натрия, проходя через решетку, смешивается со струей натрия, поступающего из центрального отверстия. Изменяя расход и температуру струй натрия, добиваются различных режимов течения.

Геометрическая модель представляет собой сектор трубы с углом 5° . Длина расчетной модели 400 мм, радиус 55 мм. Построена сетка с количеством ячеек 3200 (80×400 – количество ячеек в радиальном и осевом направлениях соответственно) с коэффициентом роста 1,15, для обеспечения требования $y^+ < 1$, с измельчением к центру трубы и ко входу. Теплофизические свойства натрия заданы зависящими от температуры [16].

Задача решается в режимах: вынужденная конвекция, переходный режим, свободная конвекция. Граничные условия: на входе задана среднемассовая скорость и температура для струи и для общего потока (табл. 5), на боковых стенках задано условие симметрии, на внешней поверхности трубы задается адиабатическое условие, стенка с прилипанием. На выходе градиенты всех величин предполагаются равными нулю. Использовалась модель турбулентности: SST, Турбулентное число Прандтля, используемое в расчете, рассчитано с помощью корреляции Рейнольдса, приведено в табл. 5 в соответствии с режимом течения, вычислено согласно (1). Сравниваются расчетные значения температуры и скорости по осевой линии трубы. На рис. 6, 7 представлены распределение скорости и температуры по оси симметрии для трех режимов течения. Расчетные профили температуры совпадают с экспериментальными значениями с высокой точностью. В распределении скорости есть отличия (в случае вынужденной конвекции), где ее разница между горячей и холодной струей максимальны, расчетные профили лежат ниже экспериментальных, погрешность составила 19%. Для переходного режима и режима свободной конвекции отличия менее заметны. Максимум относительной погрешности для распределения температуры составил 2%.

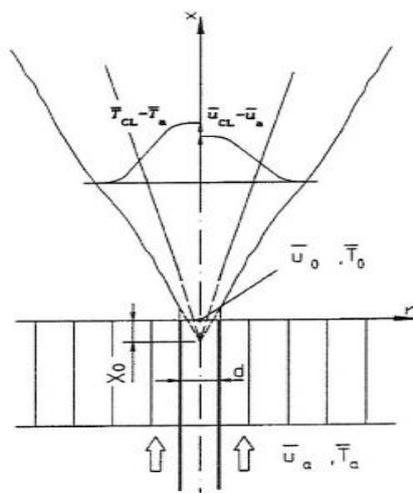


Рис. 5. Конструкция стенда TEFLU

Таблица 5

Параметры потока

Параметры потока (экспериментальный режим)	Вынужденная конвекция (forced)	Переходный режим (buoyant)	Свободная конвекция (plume)
Средняя скорость основного потока \bar{U}_α , м/с	0,05	0,1	0,1
Средняя температура основного потока \bar{T}_α , К	573	573	573
Разность скоростей между горячей и холодной струями, м/с	0,5	0,33	0,17
Разность температур между горячей и холодной струями, °С	30	25	75
Общий расход основного потока, кг/с	0,436	0,848	0,842
Турбулентное число Прандтля	6,5	6,9	7,6

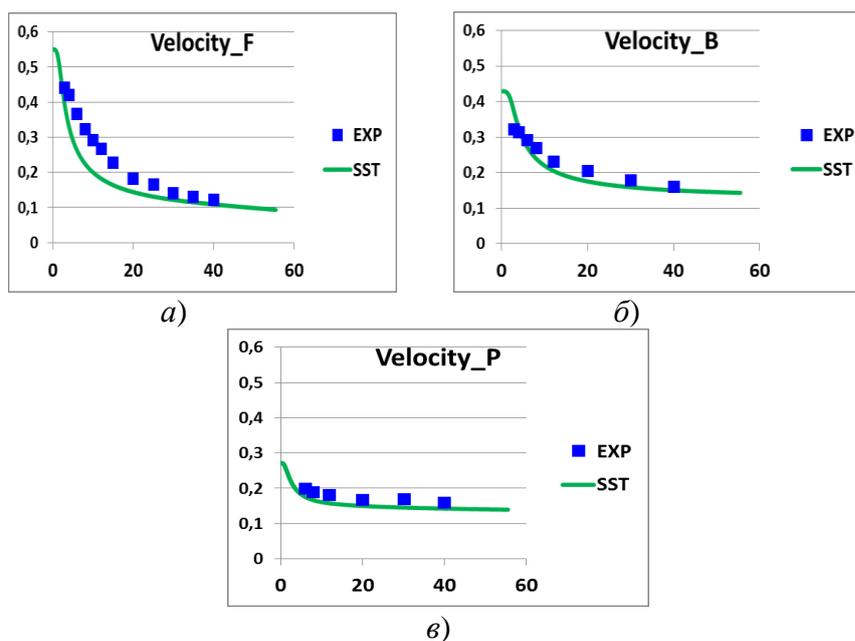


Рис. 6. Распределение скорости на оси трубы вынужденная конвекция (а), переходной режим (б) и свободная конвекция (в)

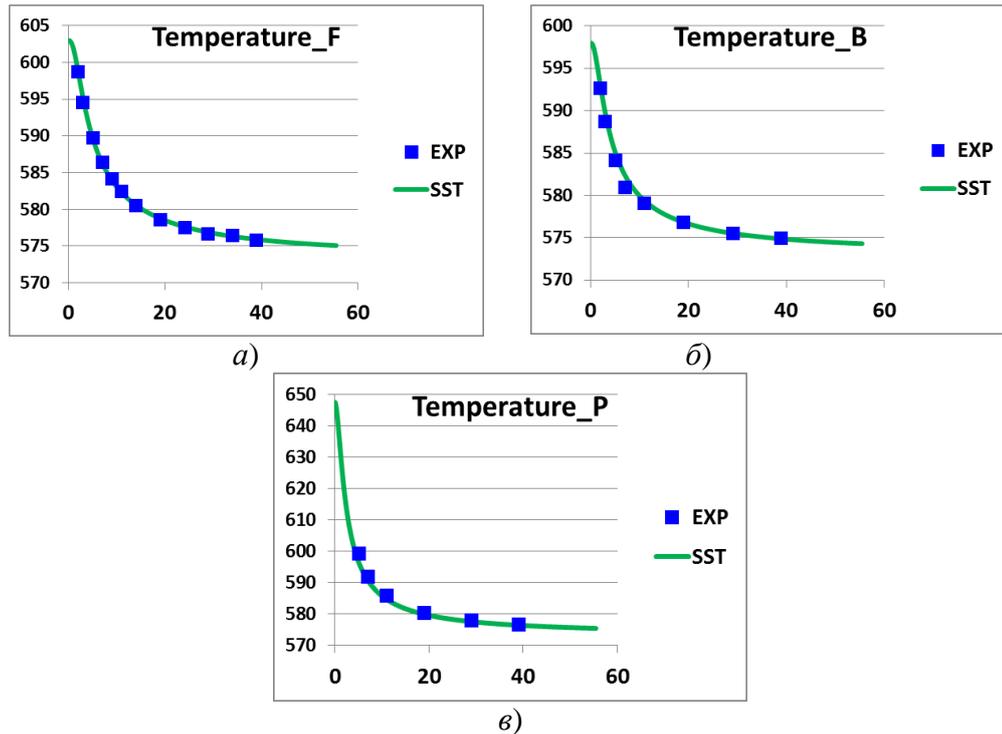


Рис. 7. Распределение температуры на оси трубы вынужденная конвекция (а), переходной режим (б) и свободная конвекция (в)

5. Перемешивание трех разнотемпературных струй натриевого теплоносителя

Задача моделирует проведение эксперимента смешения трех разнотемпературных струй натриевого теплоносителя [17, 18]. В ходе экспериментального исследования установлен турбулентный характер течения, определена амплитуда и частота температурных колебаний, определены средние значения нормированной температуры в контрольных точках.

Через три прямоугольных параллельных отверстия толщиной 20 мм и длиной 180 мм проходят разнотемпературные потоки натрия. Входные отверстия и область смешения потоков заключены между пластинами из нержавеющей стали толщиной 12 мм. На рис. 8 представлена геометрическая модель расчетной области, которая соответствует упрощенной конфигурации выхода из активной зоны реактора. Моделировалась симметричная половина области, ее высота составляла 400 мм.

Для расчета была построена неструктурированная сетка из усеченных шестигранников с характерным размером ячеек в области течения 1,2 мм, толщиной первого пристеночного слоя 0,01 мм и коэффициентом роста 1,25. Как выяснилось, сеточная модель очень сильно влияет как на характер колебаний, так и на среднее значение температуры в исследуемых точках. Известно, что свободно-струйные течения достаточно сложны и особую роль при их моделировании играет высокое сеточное разрешение вблизи входных отверстий. В данном случае были поставлены дополнительные блоки измельчения по направлению движения и смешения струй и в области пластины, характерный размер ячеек в этой области составил 0,3 мм, общее количество ячеек ~ 9.3 млн (рис. 8а). Решается задача сопряженного теплообмена, теплофизические свойства натрия заданы таблично [16], пластина, используемая в эксперименте, выполнена из нержавеющей стали, маркировкой JISSUS316, плотность $\rho = 8000$ (кг/м³), температуропроводность $\lambda = 15$ (Вт·м/К), теплоемкость $C_p = 500$ Дж/(кг·К).

Граничные условия: на входах задана среднemasсовая скорость и температура, в центре холодная струя (V_x, T_x), по бокам – горячие (V_z, T_z), табл. 6. На боковой границе установлено условие симметрии. На выходе градиенты всех величин предполагаются равными нулю.

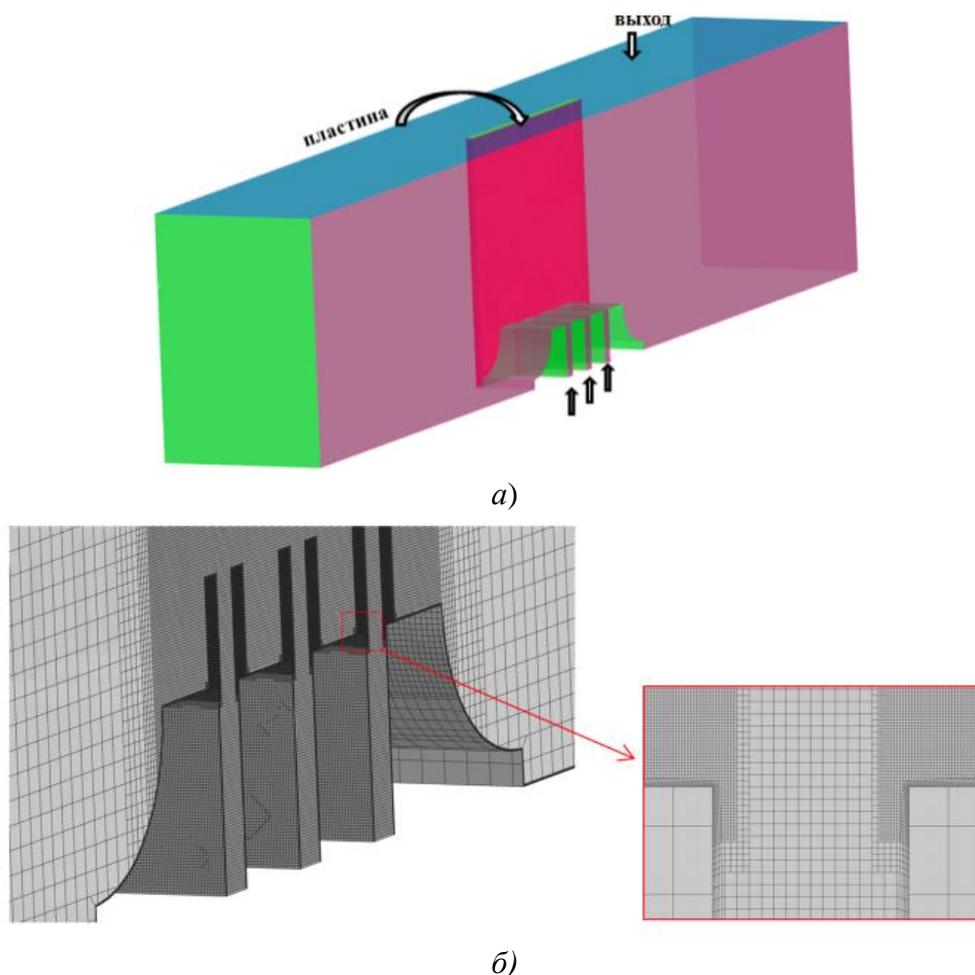


Рис. 8. Геометрия расчетной области (а) и фрагмент сеточной модели (б)

Таблица 6

Скорость и температура потока

Параметры горячего натрия		Параметры холодного натрия		ΔT , С
$V_{г}$, м/с	$T_{г}$, С	$V_{х}$, м/с	$T_{х}$, С	
0,51	347,7	0,51	304,5	43,2

Необходимо отметить, что данные о фоновой температуре отсутствуют, ее начальное значение установлено средним между температурой холодного и горячего потоков для всех расчетных вариантов. Во всех расчетах учитывалась естественно-конвективная составляющая течения, сила тяжести была направлена в противоположную сторону к направлению течений струй. Процесс перемешивания разнотемпературных струй является нестационарным. Расчет проводился с шагом по времени $\Delta t = 0.005$ с, что обеспечивало значение числа Куранта, равное 1. Для расчетной области характерно наличие двугранных углов в области истечения струй, поэтому для моделирования турбулентности была выбрана алгебраическая модель напряжений Рейнольдса EARSM. Турбулентное число Прандтля вычислялось с помощью корреляций Рейнольдса (1) и составило $Pr_t = 5.4$.

Исследуются временные зависимости температуры, а также проводится сравнение средней температуры в контрольных точках (КТ). Контрольная точка 1 располагается в центре расчетной области ($x = -15$ мм, $y = 90$ мм, $z = 100$ мм), КТ2 находится вблизи стальной пластины ($x = -15$ мм, $y = 0.5$ мм, $z = 100$ мм), ось z совпадает с плоскостью выхода струй из направляющих каналов. Сравнение проводится по величине безразмерной температуры, которая определяется по формуле из [1]:

$$T^* = \frac{T - T_x}{\Delta T}, \text{ где } \Delta T = T_z - T_x.$$

На рис. 9 представлены временные зависимости безразмерной температуры в контрольных точках в сравнении с экспериментальными колебаниями температуры. Как видно из рисунка, максимум амплитуды колебаний совпадает с экспериментальными значениями как для КТ1, так и для КТ2.

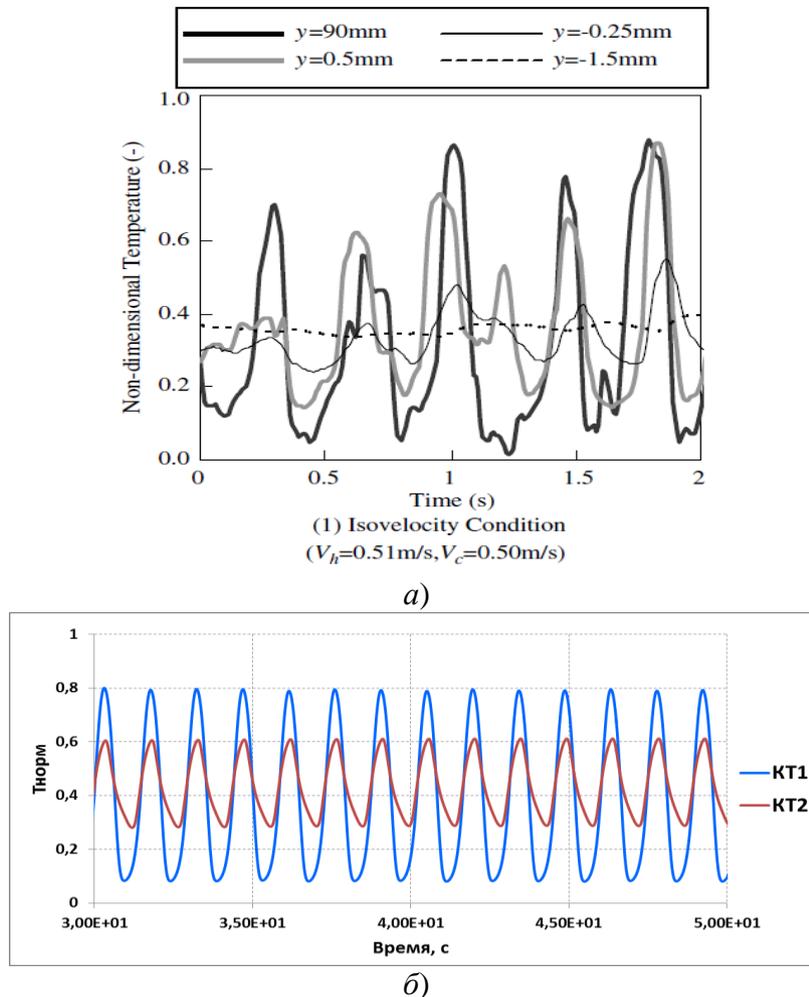


Рис. 9. Колебания температуры в контрольных точках, эксперимент (а) расчет (б)

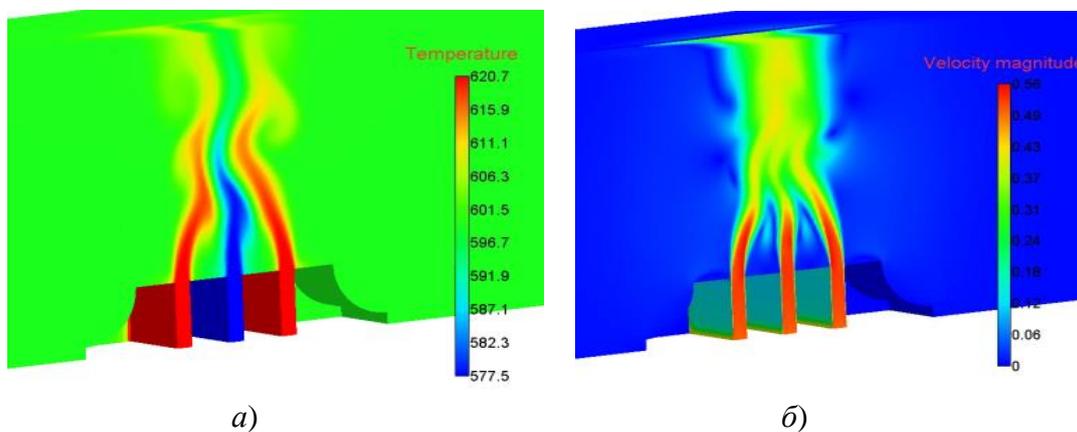


Рис. 10. Мгновенное поле температуры (а) и скорости (б)

На рис. 10 представлен процесс перемешивания трех разнотемпературных струй натриевого теплоносителя, истекающих с одинаковой скоростью, также изображены поля температуры (слева) и скорости (справа), виден нестационарный, волнообразный характер течения. В табл. 7 приведены средние значения нормированной температуры за момент времени, равный 0-60 с.

Таблица 7

Среднее значение температуры в сенсорах

	Среднее значение температуры		Относительная погрешность	
	$Y = 90$ мм	$Y = 0.5$ мм	$Y = 90$ мм	$Y = 0.5$ мм
Эксперимент	0.33	0.417	-	-
Расчет	0,34	0,422	3,4%	1 %

Максимальная относительная погрешность составила 3,5% для находящейся в центре контрольной точки, для КТ2 ее значение не превышает 1%.

6. Гидродинамика и теплообмен в потоке натриевого теплоносителя в пучке обогреваемых стержней (эксперимент TEGENA)

В эксперименте TEGENA [19, 20] исследуется температурное распределение при течении натрия вдоль четырех электрообогреваемых стержней, тем самым моделируется обтекание теплоносителем пучка стержней в атомных реакторах.

Стержни установлены вертикально в канале прямоугольной формы. Через каждые 550 мм расположена решетка с шагом 3,7 мм. Стержни имеют диаметр 25 мм. Длины обогреваемого и необогреваемого участков составляют 2456 мм и 1288 мм, соответственно, средний гидравлический диаметр составляет 201 мм. Необогреваемый участок необходим для предварительной гидродинамической стабилизации течения. Геометрия, используемая для моделирования эксперимента TEGENA, представлена на рис. 11а, там же отмечено положение термозонда, включающего термопары TE21-TE24, который использовался для измерения температуры около плоскости выхода. Расчетная модель представляет собой область с исключенными отверстиями для стержней, на стенках которых будут заданы соответствующие тепловые характеристики течения. Она включает в себя все 4 стержня без учета дистанционирующих решеток.

Расчетная сетка имеет блочную структуру и состоит из 9,8 млн. гексагональных элементов. Общий вид расчетной сетки представлен на рис. 11б.

На входе заданы постоянная скорость и температура, значение теплового потока на каждом из стержней имеют разную величину, приведены в табл. 8. Данные параметры соответствуют значению числа Пекле $Pe = 352.52$. Для инициализации на входе задается интенсивность турбулентности 5%. На выходной границе задается свободный выход. Все стенки приняты адиабатическими. Теплофизические свойства натрия определялись функциональными зависимостями от температуры [19].

Поскольку расчетная область, как и в прошлой задаче, содержит угловатые элементы, моделирование турбулентности производилось с помощью алгебраической модели напряжений Рейнольдса EARSM. Турбулентное число Прандтля, вычисленное с помощью корреляций Рейнольдса (1), составило $Prt = 4/3$.

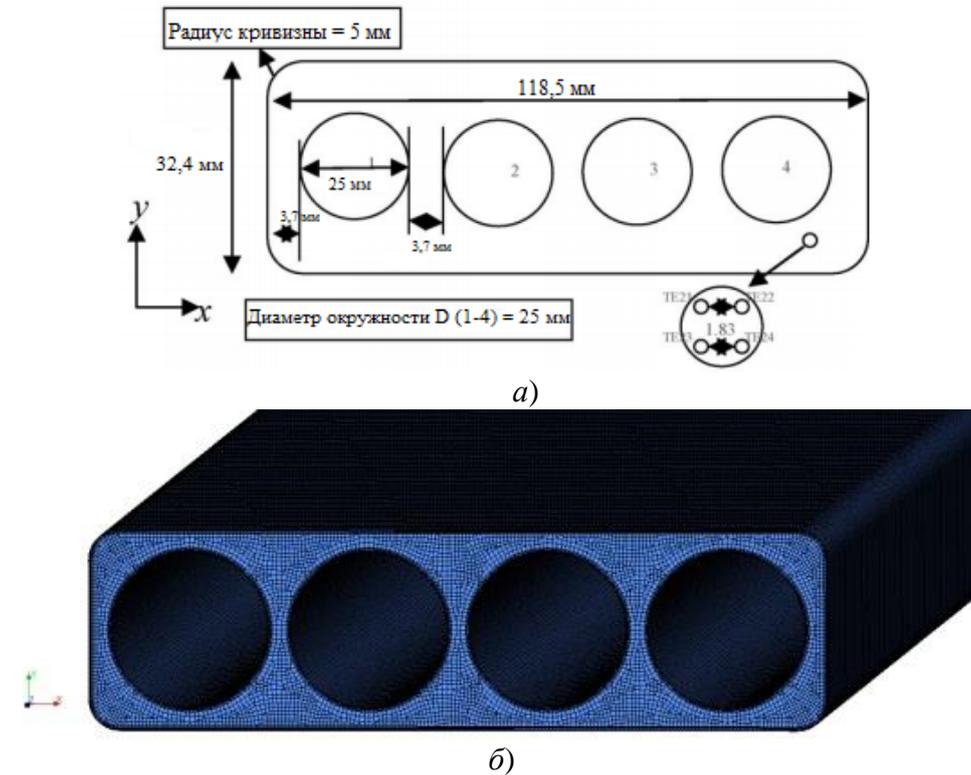


Рис. 11. Геометрия, используемая для моделирования эксперимента TEGENA, сечение с термопарами (а), сеточная модель (б)

Таблица 8

Параметры течения

Число Рейнольдса	Массовый поток, кг/с	Температура на входе, °С	Поток тепла на стержне 1, Вт/см ²	Поток тепла на стержне 2, Вт/см ²	Поток тепла на стержне 3, Вт/см ²	Поток тепла на стержне 4, Вт/см ²
60100	3,12	257,98	49,38	49	48,42	49,74

На рис. 12 приведен график сравнения распределения температуры между третьим и четвертым стержнем по высоте канала для двух экспериментов.

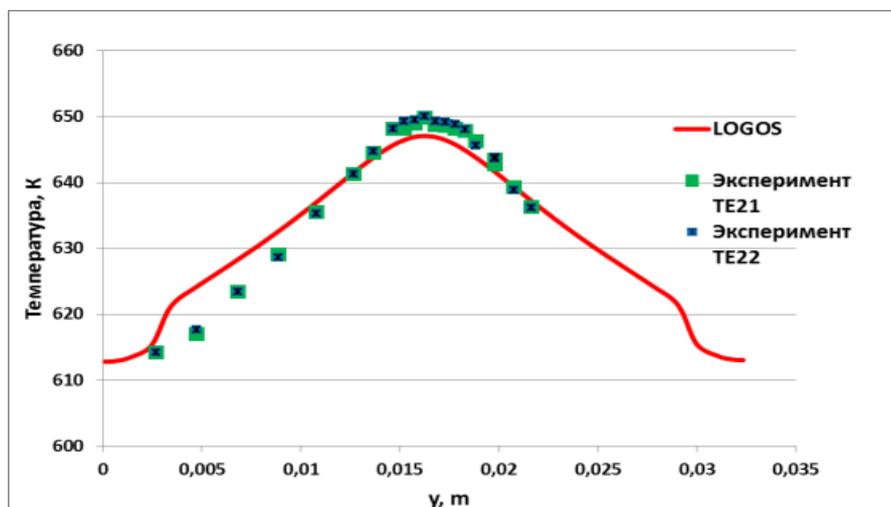


Рис. 12. Распределение температуры между третьим и четвертым стержнем

На рис. 12 представлено распределение температуры по высоте канала между третьим и четвертым стержнями в установке TEGENA. Отличие наблюдается вблизи одной из стенок, где происходит завышение температуры, с противоположной стороны экспериментальные данные отсутствуют. Температура по центру канала оказалась несколько занижена, относительная погрешность по ее максимуму не более 2%, данное значение входит в допустимый диапазон экспериментальных погрешностей и может быть ей обусловлена.

7. Гидродинамика и теплообмен в потоке ртутного теплоносителя в закрученном кольцевом канале

Экспериментальный стенд [21, 22] представляет собой герметизированный контур циркуляции теплоносителя. Рабочим участком является кольцевой канал, расположенный вертикально, образованный двумя трубами длиной 1000 мм. К наружной поверхности внутренней трубы приварено ребро. Во внутренней трубе располагается электрический нагреватель, изготовленный из нихромовой проволоки диаметром 1,0 мм. Теплоноситель поступает через входной патрубков в нижней камере, затем проходит через рабочий участок и выходит через выходной патрубков в верхней камере.

В качестве расчетной модели кольцевого канала рассматривается канал длиной 1000 мм, включающий в себя внутреннюю и наружную трубы, а также витое ребро, состоящие из стали. Основные геометрические характеристики кольцевого канала приведены в табл. 9.

Расчетная сетка имеет блочную структуру и состоит из гексагональных элементов. Общий вид расчетной сетки представлен на рис. 13б. Суммарное количество контрольных объемов расчетной сетки составило 3,9 млн. ячеек. Величина безразмерного расстояния до стенки $y^+ < 1$.

Теплофизические свойства ртути заданы следующими: $\rho = 13518.7 \text{ кг/м}^3$ – плотность, $C_p = 139.2 \text{ Дж/(кг К)}$ – удельная теплоёмкость, $\lambda = 8.59 \text{ Вт/(м·К)}$ коэффициент теплопроводности, $\mu = 0.0015 \text{ Па}$ – коэффициент динамической вязкости, для стали: $\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$ – плотность, $C_p = 420 \text{ Дж/(кг К)}$ – удельная теплоёмкость, $\lambda = 15.1 \text{ Вт/(м·К)}$ – коэффициент теплопроводности. Движение потока ртутного теплоносителя осуществляется снизу-вверх, задан учет силы тяжести.

Граничные условия: на входе задана среднемассовая скорость $V = 0.12 \text{ м/с}$ и температура $T = 290.15 \text{ К}$, на выходе градиенты всех величин предполагаются равными нулю. На твердой стенке (внутренний цилиндр) задан поверхностный тепловой поток, $q_w = 50465.38 \text{ Вт/м}^2$ (погрешность экспериментального определения энерговыделения составляет 5 %). На всех твердых, необогреваемых поверхностях задано адиабатическое условие.

Таблица 9

Геометрические характеристики канала

Параметр	Значение
Наружный диаметр внешней трубы, $D_{\text{нар.}}$, мм	30
Внутренний диаметр внешней трубы, $d_{\text{нар.}}$, мм	27
Наружный диаметр внутренней трубы, $D_{\text{внутр.}}$, мм	12
Внутренний диаметр внешней трубы, $d_{\text{внутр.}}$, мм	10
Высота ребра, h , мм	7,5
Толщина ребра, δ , мм	2,0
Гидравлический диаметр, d_z , мм	13,31
Шаг навивки ребра, t , мм	425,1
Длина канала, L , мм	1000

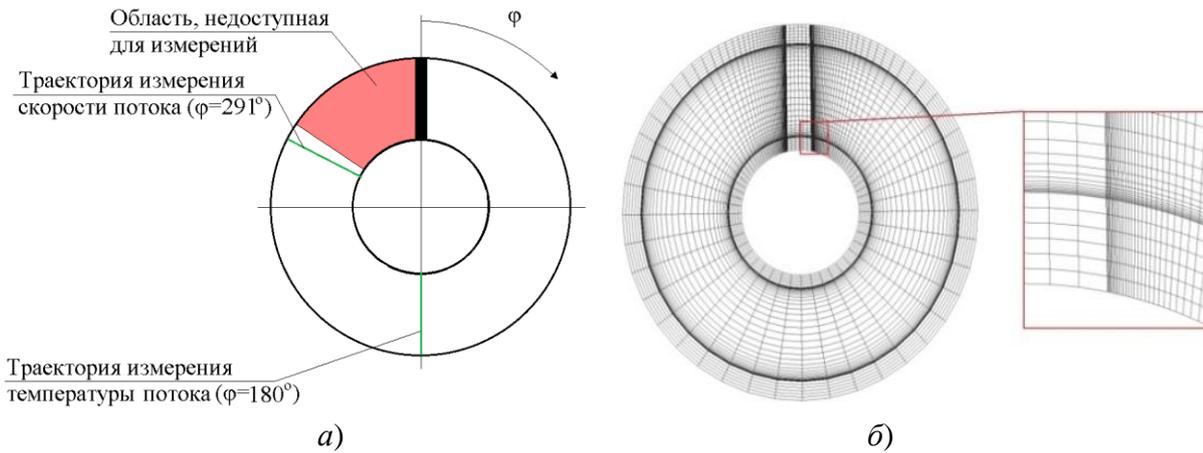


Рис. 13. Схема измерений параметров потока (а), сеточная модель (б)

Ввиду наличия закрутки потока имеет место несимметричность распределения скорости относительно ребра, поэтому моделирование турбулентности производилось с помощью алгебраической модели напряжений Рейнольдса EARSM. Турбулентное число Прандтля, вычисленное с помощью корреляций Рейнольдса (1), составило $Pr_t = 2.5$.

На рис. 14 представлены поля скорости и температуры в сечении $z = 900$ мм, недалеко от выхода из расчетной области. Наличие витого ребра, по аналогии с распределением скорости, приводит к деформации поля температуры потока теплоносителя в поперечном сечении модели. Температурный максимум на внутренней, обогреваемой трубе смещается в сторону направления тангенциальной компоненты скорости. Большие значения скорости наблюдаются по направлению навивки ребра. На рис. 15 показаны экспериментальное и расчетное распределения безразмерной температуры по радиусу кольцевого канала:

$$\theta = \frac{\lambda(T_w - T_{mn})}{q_w d_z},$$

где T_w и T_{mn} – температура стенки и теплоносителя, К, соответственно; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); d_z – гидравлический диаметр канала, м; q_w – поверхностный тепловой поток, Вт/м². Наибольшее отклонение наблюдается при измерении температуры в окрестности внутренней трубы и составляет порядка 13 %, допустимая погрешность измерений при проведении эксперимента 5%.

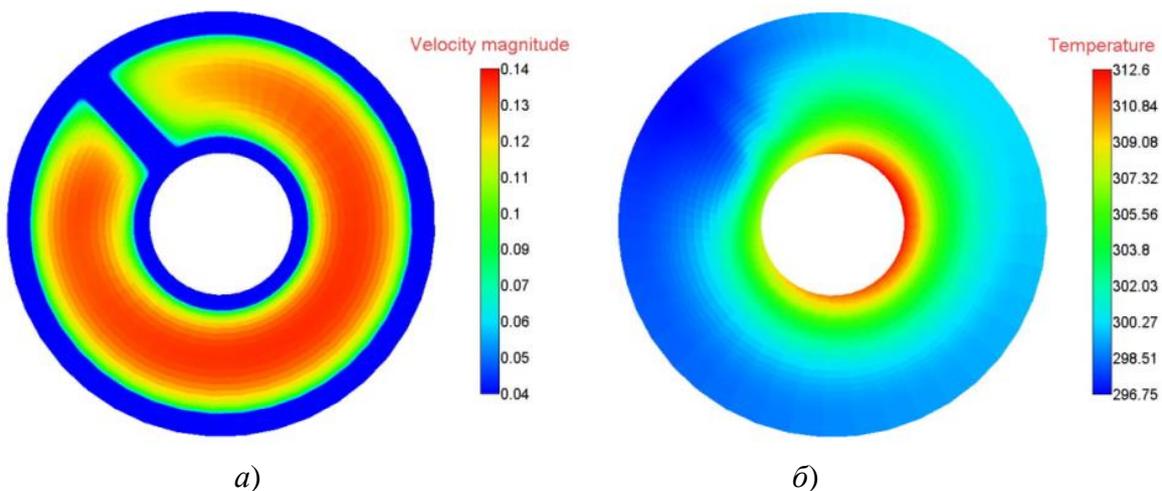


Рис. 14. Поля распределения амплитуды скорости (а) и температуры (б) в сечении $z = 900$ мм

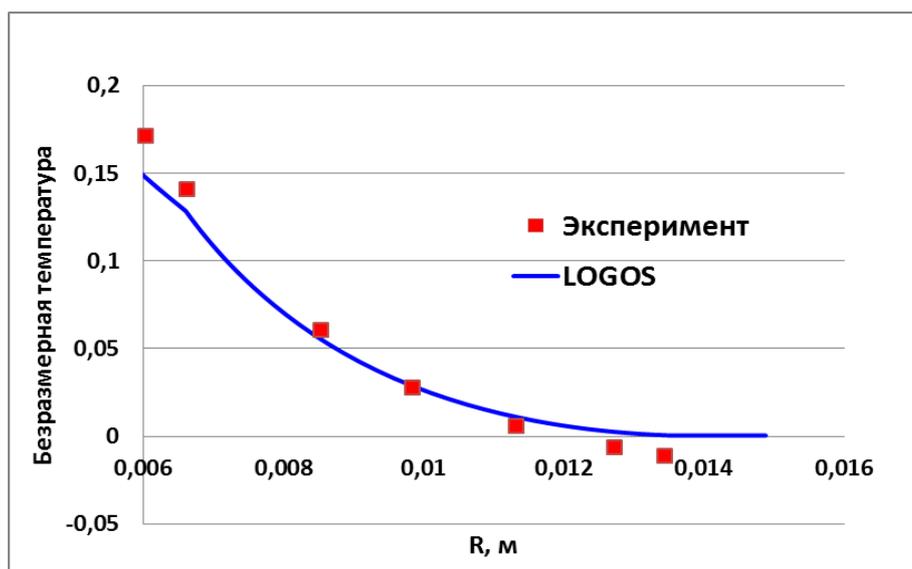


Рис. 15. Распределение безразмерной температуры по радиусу канала в сечении $z = 900$ мм, угол 291

Заключение

В статье был собран минимальный базис задач валидации методов моделирования течений жидкометаллических теплоносителей, характеризующихся низкими числами Прандтля. В базис задач вошли наиболее известные тесты, имеющие надежные экспериментальные либо численные данные. Были рассмотрены задачи о внутренних течениях в трубах и каналах различной формы, смешении разнотемпературных потоков, а также течениях в пучке стрелы. Для каждой задачи приведено подробное описание постановки и имеющиеся для нее опорные данные. Также представлены результаты численного моделирования рассматриваемых задач по пакету программ ЛОГОС в рамках RANS моделей турбулентности. Затронут вопрос об уточнении решения путем использования корреляций для определения турбулентного числа Прандтля.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов Президента Российской Федерации по государственной поддержке научных исследований молодых российских ученых-докторов наук МД-4874.2018.9 и государственной поддержке ведущих научных школ Российской Федерации НШ-2685.2018.5, а также при частичной финансовой поддержке РФФИ – проект № 16-01-00267.

Библиографический список

1. **Козелков, А.С.** Минимальный базис задач для валидации методов численного моделирования турбулентных течений вязкой несжимаемой жидкости / А.С. Козелков, Ю.Н. Дерюгин, Ю.А. Циберева, А.В. Корнев [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2014. – № 4. – С. 21-69.
2. AIAA, Guide for the Verification and Validation of Computational Fluid Dynamics Simulations // AIAA, 1998, G-077.
3. **Deryugin, Yu.** Validation results for the LOGOS multifunction software package in solving problems of aerodynamics and gas dynamics for the lift-off and injection of launch vehicles / Yu. Deryugin, R. Zhuchkov, D. Zelenskiy, A. Kozelkov [et al.] // Mathematical Models and Computer Simulations. – 2015. – Vol. 7, Issue 2. – P. 144–153.
4. **Menghini, F.** Advanced Computational Fluid Dynamics models for liquid metal flows / F. Menghini // Esame finale anno accademico, 2014-2015. – P. 218.

5. **Grotzbach, G.** Challenges in simulation and modeling of heat transfer in low-Prandtl number fluids / G. Grotzbach // The 14 th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, NURETH-14, 2011, Toronto, Canada. – P. 33.
6. Best Practice Guidelines for the Use of CFD in Nuclear Reactor Safety Applications // Revision. Nuclear Safety NEA/CSNI/R, (2014)11, 2015.
7. Assessment of CFD Codes for Nuclear Reactor Safety Problems, Revision 2, Nuclear Safety NEA/CSNI/R (2014)12, 2015.
8. **Козелков, А.С.** Исследование применения RANS моделей турбулентности для расчета неизотермических течений с низкими числами Прандтля / А.С. Козелков, А.А. Куркин, В.В. Курулин [и др.] // Известия РАН. Механика жидкости и газа. – 2015. – № 4. – С. 44-58.
9. **Козелков, А.С.** RANS–LES подход на основе алгебраической модели рейнольдсовых напряжений / А.С. Козелков, А.А. Куркин, О.Л. Крутякова [и др.] // Известия РАН. Механика жидкости и газа. – 2015. – № 5. – С. 24-33.
10. **Bricteux, L.** Numerical prediction of turbulent heat transfer at low Prandtl number / L. Bricteux, M. Duponcheel, M. Manconi, Y. Bartosiewicz // Proc. 6th European Thermal Sciences Conference (Eurotherm 2012), France, 2012.
11. **Vodret, S.** Numerical simulation of turbulent forced convection in liquid metals / S. Vodret, D. Vitale Di Maio, G. Caruso // 32nd UIT (Italian Union of Thermo-fluid-dynamics) Heat Transfer Conference, Journal of Physics: Conference, 2014, Series 547.
12. **Abe, H.** A study of turbulence thermal structure in a channel flow through DNS up to $Re_{\tau} = 640$ with $Pr = 0.025$ and 0.71 / H. Abe, H. Kawamura // Proc. of 9th European Turbulence Conference, 2002. – P. 399-402.
13. **Abe, H.** DNS of turbulent heat transfer in a channel flow up to $Re_{\tau}=640$ (With respect to Reynolds- and Prandtl-number effects) / H. Abe, H. Kawamura // Transactions of the JSME (B), Japan. – 2003. Vol. 69. – P. 2291-2298.
14. **Ковалев, С.И.** Влияние продольного магнитного поля и термогравитационной конвекции на теплоотдачу при течении жидкого металла: (Эксперимент и расчет. рекомендации): дис... канд. тех. наук / Сергей Иванович Ковалев. – М., 1988.
15. **Исаченко, В.П.** Теплопередача / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – М.: Энергоиздат, 1981.
16. **Carteciano, L.** Validation of turbulence models in the computer code FLUTAN for a free hot sodium jet in different buoyancy flow regimes / L. Carteciano, G. Grotzbach // FZKA 6600, 2003.
17. **Kimura, N.** Experimental investigation on transfer characteristics of temperature fluctuation from liquid sodium to wall in parallel triple-jet / N. Kimura, H. Miyakoshi, H. Kamide // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2007. – Vol. 50. – P. 2024-2036.
18. **Рогожкин, С.А.** Использование URANS подхода для определения пульсаций температуры при перемешивании трех разнотемпературных струй натрия / С.А. Рогожкин, А.А. Аксёнов, С.В. Жлуктов [и др.] // Компьютерные исследования и моделирование. – 2014. – № 6. – С. 923–935.
19. **Möller, R.** TEGENA: Detaillierte experimentelle untersuchungen der temperatur- und geschwindigkeitsverteilungen in stabbündel-geometrien mit turbulenter natriumströmung / R. Möller // KfK 4491, Karlsruhe, Germany, 1989.
20. **Laltu, C.** CFD analyses of liquid metal flow in sub-channels for Gen IV reactors / C. Laltu, R. Ferry // Nuclear Engineering and Design. – 2011. – Vol. 241. – P. 4391-4403.
21. **Генин, Л.Г.** Исследование полей скорости и температуры при турбулентном течении ртути в кольцевом канале с закрученной лентой / Л.Г. Генин, А.Г. Захаров, С.Г. Крылов, Я.И. Листратов // Тезисы доклада XV Минского международного форума по теплообмену. Т. 1. – Минск, 2016. – С. 52-55.
22. **Генин, Л.Г.** Исследование полей скорости и температуры в кольцевом канале с винтовым оребрением применительно к созданию тепловыделяющей сборки реактора БРЕСТ-ОД-300 / Л.Г. Генин, С.Г. Крылов, Я.И. Листратов, А.Г. Захаров // Инновации в атомной энергетике. Сб. докладов конференции молодых специалистов. – М.: Изд-во АО «НИКИЭТ», 2015. – С. 300-311.
23. **Козелков, А.С.** Исследование потенциала суперкомпьютеров для масштабируемого численного моделирования задач гидродинамики в промышленных приложениях / А.С. Козелков, Р.М. Шагалиев, В.В. Курулин [и др.] // Вычислительная математика и математическая физика. – 2016. – Т. 56, № 8. – С. 1524-1535.

24. **Козелков, А.С.** Применение численных схем с выделением пограничного слоя для расчета турбулентных течений с использованием вихреразрешающих подходов на неструктурированных расчетных сетках / А.С. Козелков, О.Л. Крутякова, В.В. Курулин [и др.] // Вычислительная математика и математическая физика. – 2017. – Т. 57, № 6. – С. 1048-1060.
25. **Козелков, А.С.** Моделирование турбулентных течений с использованием алгебраической модели рейнольдсовых напряжений с универсальными пристеночными функциями / А.С. Козелков, В.В. Курулин, О.Л. Пучкова, С.В. Лашкин // Вычислительная механика сплошных сред. – 2014. – Т. 7, № 1. – С. 40-51.
26. **Погосян, М.А.** Использование отечественных суперкомпьютерных технологий при проектировании новых образцов авиационной техники / М.А. Погосян, Е.П. Савельевских, Д.Ю. Стрелец [и др.] // Авиационная промышленность. – 2013. – № 3. – С. 3-7.
27. **Волков, К.Н.** Методы ускорения газодинамических расчетов на неструктурированных сетках / К.Н. Волков, Ю.Н. Дерюгин, В.Н. Емельянов [и др.]. – М.: Физматлит, 2013. – С. 536 с.
28. **Козелков, А.С.** Моделирование возмущений в озере Чебаркуль при падении метеорита в 2013 году / А.С. Козелков, А.А. Куркин, Е.Н. Пелиновский [и др.] // Известия РАН Механика жидкости и газа. – 2015. – № 6. – С. 134-143.
29. **Козелков, А.С.** Методика численного моделирования цунами оползневой типа на основе уравнений Навье-Стокса / А.С. Козелков // Вычислительная механика сплошных сред. – 2016. – Т. 9, № 2. – С. 218-236.

*Дата поступления
в редакцию: 02.10.2018*

**S.M. Dmitriev¹, O.L. Krutyakova², A.S. Kozelkov^{1,2}, A.A. Kurkin¹,
V.V. Kurulin², O.V. Denisova², D.A. Utkin²**

MINIMUM BASIS OF TASKS OF THE VALIDATION OF METHODS OF FLOW MODELING WITH LOW PRANDT NUMBERS

Nizhniy Novgorod State Technical University n.a. R. Alekseev¹,
Russian federal nuclear center – All-Russian research institute of experimental physics,
Sarov, Nizhny Novgorod region²

Purpose: development of a minimum basis of tasks of the validation of modeling methods of liquid metal coolants flows, characterized by low Prandtl numbers.

Design/methodology/approach: in the studied flows, heat transfer occurs both due to convective mixing of the flow, and due to the molecular thermal conductivity of the heat transfer agents itself, which has a much better thermal conductivity of this type compared to other heat transfer agents. An intensive change in the temperature of the liquid due to the high thermal conductivity can be at the same level as the change in temperature due to turbulent mixing. Turbulence is the main problem of the numerical modeling of flows with low Prandtl numbers. The most common RANS models of turbulence are based on the idea of using turbulent viscosity and turbulent thermal conductivity, and the turbulent thermal conductivity is directly related to the turbulent viscosity using a fixed value of the turbulent Prandtl number.

Findings: the basis of tasks includes internal flows in pipes and channels of different forms, mixing of different-temperature flows, as well as flow in a bundle of rods. A detailed description of the statement and the available reference data for each task are provided.

Research limitations/implications: the results of numerical modeling of the considered problems on the LOGOS software package in the framework of the RANS turbulence models using correlations for determining of the turbulent Prandtl number and refine the resulting solution for tasks with high molecular thermal conductivity are presented.

Key words: numerical simulation, turbulence, low Prandtl numbers, turbulent heat transfer, heat transfer in liquid metals.