



МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

DOI: 10.5862/JPM.230.2

УДК 536.25

*А.Г. Абрамов¹, А.М. Левченя¹,
Е.М. Смирнов¹, П.Е. Смирнов²*

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Российская Федерация;

² Компания ANSYS Germany GmbH, г. Дармштадт,
Федеративная Республика Германия

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕПЛООБМЕНА В КОРИДОРНОМ ПУЧКЕ ТРУБ, ПОПЕРЕЧНО ОБТЕКАЕМОМ ЖИДКИМ МЕТАЛЛОМ

Представлены результаты численного моделирования турбулентного теплообмена в поперечно обтекаемых жидким металлом коридорных пучках гладких круглых труб. Расчеты выполнены с использованием CFD-пакета ANSYS Fluent в двумерной нестационарной постановке методом URANS с применением SST-модели турбулентности Ментера и в предположении постоянства физических свойств среды, с числом Прандтля, равным 0,023. Число Рейнольдса изменялось в диапазоне от 26200 до 52400. Проведен анализ мгновенных и осредненных во времени полей скорости и температуры, полученных для пучков различной плотности, при варьировании ширины пучка (числа трубных рядов в поперечном направлении). Интегральные характеристики теплоотдачи сравниваются с экспериментальными данными.

ТРУБНЫЙ ПУЧОК, ЖИДКИЙ МЕТАЛЛ, ТУРБУЛЕНТНОСТЬ, ТЕПЛООБМЕН, ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, URANS.

Введение

Углубленные и достоверные знания об особенностях турбулентных течений и процессов теплообмена в жидких металлах важны для решения многих актуальных проблем в области ядерной энергетики, среди которых особое место занимают задачи, возникающие на этапе проектирования реакторных блоков на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем. Геометрические конфигурации реакторов содержат конструкционные компоненты цилиндрической формы (трубчатые теплообменники, насосы, элементы системы управления и др.), частично или полностью погруженные в объем циркулирующего жидкого металла.

Задача о течении и теплообмене в поперечно обтекаемых пучках труб входит в число важных для практики «канонических» постановок [1, 2] по проблеме термодинамики жидкометаллических теплоносителей. Интенсивные экспериментальные исследования данной задачи велись в 1950 – 1960-е гг. в лабораториях Центрального котлотурбинного института им. И.И. Ползунова (ЦКТИ) [1, 3] и Физико-энергетического института им. А.И. Лейпунского (ФЭИ) [2, 4]. Изучались интенсивности локальной и средней теплоотдачи при поперечном обтекании коридорных и шахматных пучков труб различной конфигурации, а также при обтекании одиночных цилиндров тяжелыми и щелочными



жидкими металлами в широком диапазоне изменения числа Пекле. Отрабатывались методики измерений, исследовалось влияние на процессы теплообмена различных факторов, в частности режимных параметров, количества рядов труб в поперечном направлении, конфигурации пучков и пр.

В последнее десятилетие интерес к исследованиям в этом направлении возобновился, и прежде всего, в связи с масштабными задачами по созданию атомных электростанций с реакторами нового поколения на быстрых нейтронах, обеспечивающих возможность реализации замкнутого ядерного топливного цикла и обладающих высоким уровнем безопасности. Результаты исследований по проблеме термогидродинамики тяжелых металлов (расплавов свинца и эвтектики свинец-висмут) в поперечно обтекаемых пучках труб, которые были недавно выполнены в ФЭИ, частично отражены в работах [5, 6].

Экспериментальный подход к изучению структуры течения и теплового состояния расплавов жидких металлов сопряжен с большими затратами и преодолением ряда объективных трудностей. В современных условиях численное моделирование на основе нестационарных уравнений движения и теплопереноса рассматривается как наиболее перспективное направление исследований по расширению базы знаний, необходимых для разработки новых проектов. Расчетные методики, которые сегодня используются, можно разделить на «инженерные» (относительно экономичные), базирующиеся на осредненных по Рейнольдсу уравнениях Навье – Стокса (RANS, URANS), и вихре-разрешающие (DNS, LES, DES); последние обладают высокой точностью, но при этом крайне требовательны к вычислительным ресурсам. Примером приложения метода прямого численного моделирования к родственной проблеме являются расчеты турбулентного обтекания одиночного кругового цилиндра жидким натрием при существенном влиянии эффектов плавучести [7].

Отраженный в литературе опыт численного моделирования течения и теплообмена в поперечно обтекаемых пучках

труб накоплен в основном для сред с числом Прандтля порядка единицы. В ранних расчетах использовалось предположение о периодичности поля течения в продольном и поперечном направлениях, отвечающее модели безграничного пучка [8, 9]. Однако при постановке лабораторных экспериментов исследователи стремятся использовать пучки с минимально возможным числом труб, особенно при проведении дорогостоящих опытов с течениями жидких металлов. Соответственно, возникает вопрос о влиянии краевых эффектов на структуру потока и характеристики теплоотдачи. При проведении численного моделирования, результаты которого сопоставляются с опытными данными, неопределенности такого рода желательно исключать (или существенно уменьшать). Это можно сделать, отказавшись от предположения о периодичности течения, т. е. использовать расчетную область, которая охватывает всю совокупность труб, образующих пучок в экспериментальном прототипе (см., например, работы [10, 11]).

В настоящей работе представляются результаты двумерных параметрических расчетов турбулентного течения и теплообмена в поперечно обтекаемых жидким металлом коридорных пучках гладких круглых труб. Расчеты выполнены на основе нестационарных уравнений Рейнольдса (метод URANS) с применением программного пакета вычислительной гидродинамики ANSYS Fluent. Исследуется влияние на структуру расчетных полей скорости и температуры и на характеристики теплоотдачи различных факторов: режимного числа Пекле (в диапазоне 600 – 1200), плотности упаковки пучка и его ширины, размерности расчетной сетки. На основе сопоставления с известными экспериментальными данными для чистых щелочных металлов оцениваются возможности метода URANS по предсказанию средней теплоотдачи для рассматриваемых условий.

Постановка задачи и вычислительные аспекты

В двумерном приближении рассматривается нестационарное турбулентное тече-

ние жидкости при малом числе Прандтля ($Pr = 0,023$) применительно к задаче поперечного обтекания коридорных пучков, состоящих из круглых труб. Используется модель несжимаемой ньютоновской жидкости с постоянными физическими свойствами, без учета эффектов плавучести. Численное моделирование основывается на решении нестационарных, осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье – Стокса (URANS) в совокупности с уравнением энергии. Для замыкания системы уравнений Рейнольдса привлекается SST-модель турбулентности [12].

Расчеты выполнены для экспериментальных условий работы [3], где объектом исследования являлись коридорные пучки труб с различными расстояниями (шагами) между ними, поперечно обтекаемые расплавами жидких щелочных металлов. Рабочий участок экспериментальной установки представлял собой прямоугольный короб, снабженный входным диффузором и выходным конфузуром. Центральные трубы первого и шестого рядов пучка обогревались в экспериментах работы [3] поочередно, путем пропускания через них электрического тока. Остальные трубы не подвергались обогреву и служили лишь для создания гидродинамического подобия.

При проведении настоящих расчетов рассматривался только случай обогрева труб шестого ряда. Численное моделирование проводилось для двух трубных пучков: тесного, с шагом по фронту $S_1 = 1,23d$ и

по глубине $S_2 = 1,18d$;

широкого, с одинаковыми шагами по фронту и глубине $S_1 = S_2 = 1,69d$. Здесь и далее диаметр трубок d используется в качестве масштаба длины.

В качестве масштаба скорости принимается скорость V^* в минимальном сечении поперек хода потока, определяемая соотношением:

$$V^* = \frac{V_{in}}{(1 - d / S_1)}, \quad (1)$$

где V_{in} – скорость на входе в расчетную область.

Расчетные области содержали некоторое число рядов труб в направлении, поперечном по отношению к потоку, и два ряда «вытеснителей», выполненных из половинок труб и расположенных на боковых границах (как и в экспериментах работы [3]).

В расчетах для тесного пучка задавалось разное количество рядов труб в поперечном направлении: один, три или пять. Расчеты для широкого пучка выполнялись для одной конфигурации, содержащей три полных ряда труб. По глубине обоих пучков были помещены 10 рядов труб. Принятые при моделировании значения геометрических параметров сведены в табл. 1.

На рис. 1 в качестве примера показана расчетная область для тесного пучка с одним полным рядом труб. На входе в расчетную область задавались постоянные значения нормированной скорости: $V_{in} = 0,185$ для

Таблица 1

Значения параметров, принятых при моделировании

Параметр	Значение параметра	
	Тесный пучок	Широкий пучок
Шаг по фронту по глубине	$S_1 = 1,23d$ $S_2 = 1,18d$	$S_1 = S_2 = 1,69d$
Количество рядов труб в поперечном направлении	1, 3, 5	3 полных
Количество рядов труб по глубине	10	10

Обозначение: d – масштаб длины.

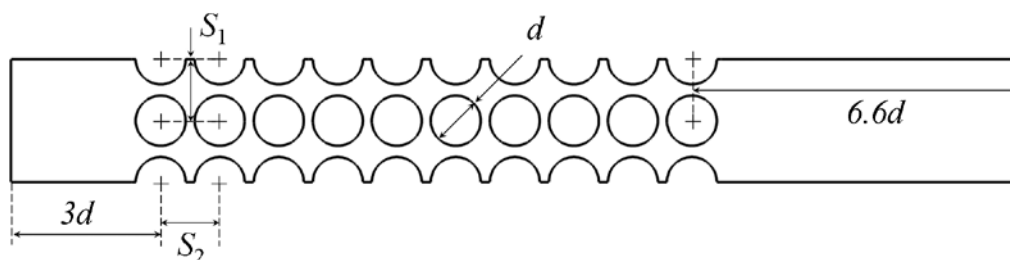


Рис. 1. Расчетная область для тесного пучка с одним полным рядом труб; S_1 , S_2 – шаги по фронту и по глубине, соответственно; d – масштаб длины

тесного пучка и 0,408 для широкого; приведенная температура на входе полагалась равной нулю, $T_m = 0$. На выходной границе полагалось равным нулю приведенное давление. На стенках труб ставились условия прилипания. Стенки труб считались адиабатическими, за исключением труб шестого ряда, на которых задавался постоянный тепловой поток. Стенки с полукруглыми вытеснителями, ограничивающие поток в поперечном направлении, рассматривались как адиабатические, на них также задавалось условие прилипания.

Для каждой конкретной геометрии основные серии расчетов были выполнены для следующего набора значений числа Пекле, $Pe = V^*d/a$: 600, 800, 1000 и 1200 (a – коэффициент температуропроводности). Значения числа Рейнольдса при этом изменялись в пределах от 26200 до 52400.

Неструктурированные расчетные сетки включали, в зависимости от конфигурации пучка, от 160 до 500 тыс. узлов. Дополнительная серия расчетов проводилась для тесного пучка с тремя рядами труб поперек потока на огрубленной расчетной сетке, по сравнению с базовой (общая размерность сетки была уменьшена примерно в 3 раза). Сгущение сеток к цилиндрическим стенкам обеспечивало во всех рассчитанных вариантах значение нормированного размера пристенной ячейки y^+ , не превышающее единицу.

Расчеты проводились с помощью CFD-пакета ANSYS Fluent 14.0. Турбулентное число Прандтля задавалось равным 0,85. Входные значения характеристик турбулентности рассчитывались, исходя из задания интенсивности турбулентности в 5 % и

отношения турбулентной вязкости к молекулярной, равного 10.

Результаты расчетов и обсуждение

Переходя к представлению и обсуждению результатов, следует, прежде всего, отметить, что в расчетах для тесного пучка с одним рядом труб при всех рассмотренных значениях числа Пекле, а также при его наименьшем значении ($Pe = 600$) для вариантов с тремя и пятью рядами численное решение в ходе вычислительного процесса сводилось к стационарному. В остальных случаях расчетное поле течения было нестационарным и непериодическим, что требовало получения достаточно длительной выборки для последующего осреднения.

На рис. 2 – 4 приведены общие картины и увеличенные фрагменты (в окрестности труб шестого ряда) мгновенных распределений модуля полной безразмерной скорости и нормированной температуры, полученные для тесного пучка с разным количеством поперечных рядов труб при наибольшем из рассмотренных значений числа Пекле ($Pe = 1200$). Температура нормировалась на разность между выходной среднемассовой и входной температурами.

Как видно, для однорядного пучка две узкие струи, выходящие из межтрубного пространства, отклоняются к одной или к другой стенке, ограничивающей поток в поперечном направлении, причем в ходе установления численного решения направленность этого отклонения носит случайный характер (в силу симметрии расчетной области и граничных условий). Тепловой след распространяется в направлении развития основного течения, охватывая несколько цилиндров,

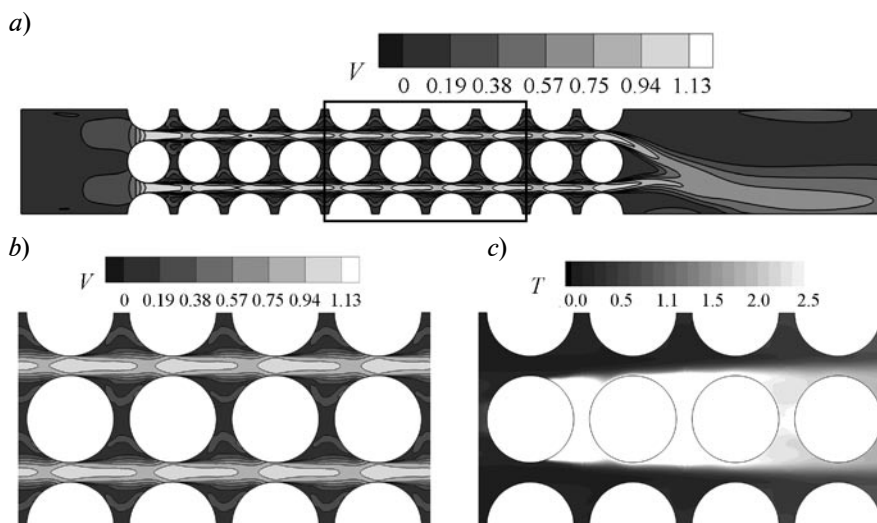


Рис. 2. Мгновенные поля, рассчитанные при $Re = 1200$ для тесного пучка с одним полным рядом труб: модуль скорости (a), увеличенные фрагменты модуля скорости (b) и температуры (c). Приведены нормализованные значения величин

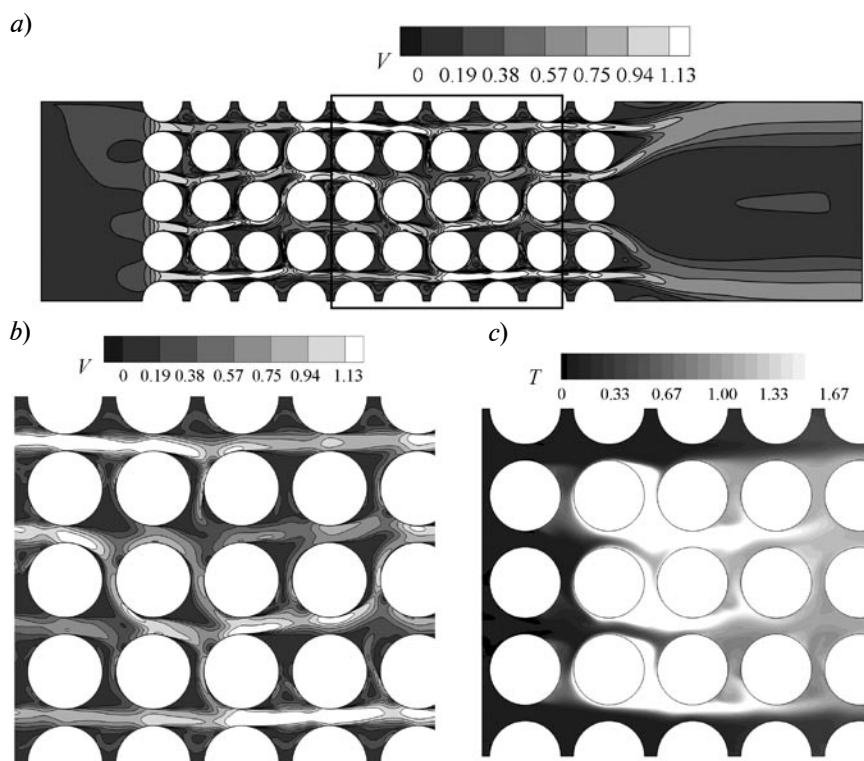


Рис. 3. То же, что на рис. 2, но для пучка с тремя рядами труб

расположенных за нагреваемой трубой.

В случае трехрядного пучка рассчитанное течение носит выраженный нестационарный характер с заметным поперечным перетеканием теплоносителя в межтрубном

пространстве. В отличие от случая однорядной конфигурации, на выходе из трехрядного пучка картина течения обладает симметрией. Здесь струи, омывающие центральный ряд цилиндров, при выходе из

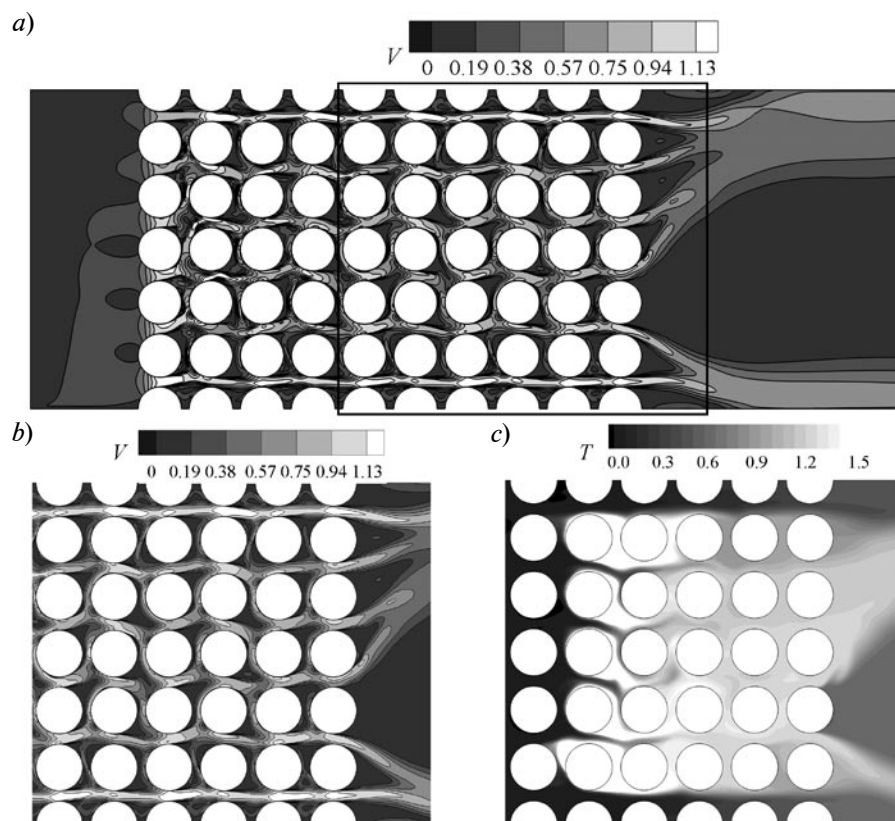


Рис. 4. То же, что на рис. 2 и 3, но для пучка с пятью рядами труб

пучка объединяются (каждая с соседней струей, формирующейся между крайним рядом труб и вытеснителем) и отклоняются в направлении ближайшей горизонтальной стенки. При этом скорость продольного протекания теплоносителя по коридорам различна: течение является более интенсивным в пространстве между крайними рядами трубок и вытеснителями.

Картины полей течения внутри пучка, состоящего из пяти рядов труб в поперечном направлении, качественно подобны таковым, полученным для трехрядного пучка. Здесь, однако, как и для конфигурации с одинарным рядом, в результатах расчетов наблюдается несимметричность решения в области за пучком – с объединением струй и их последующим отклонением к горизонтальным стенкам. Отметим, что эта асимметрия сохраняется и в осредненных по времени полях.

Влияние числа Пекле на результаты расчетов иллюстрируется на рис. 5, где показаны осредненные во времени поля мо-

дуля скорости для трехрядного пучка при $Re = 600$ и 1200 . Видно, что предсказываемая методом URANS структура течения для этих режимов различается как внутри трубного пучка, так и в следе за пучком. В случае режима с $Re = 600$ обращает на себя внимание изменение направления струйного течения по мере протекания по коридорам. Течение в следе несимметрично, объединение струй, в отличие от режима с наибольшим числом Пекле, происходит непарно: формируется как одна широкая струя (путем слияния трех выходящих из пучка струй), так и вторая («одионочная»).

Мгновенные поля модуля скорости и температуры, рассчитанные для широкого пучка при $Re = 1200$, показаны на рис. 6. Течение, по сравнению с полученным для трехрядного тесного пучка, существенно более хаотично; заметно выше здесь и степень перемешивания потока за счет более интенсивного перетекания в поперечном направлении в широких межтрубных зонах. Тепловой след от нагреваемых труб доста-

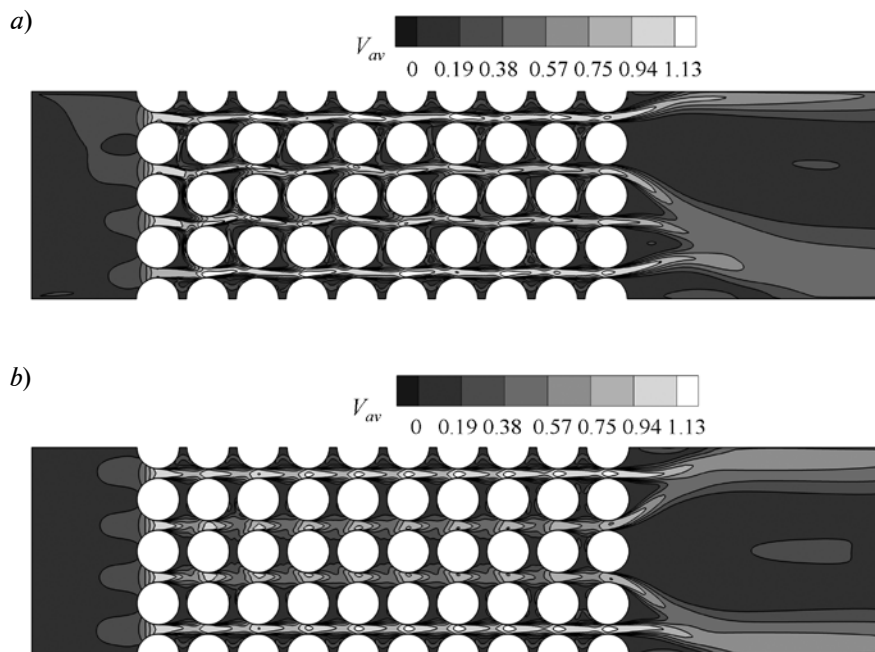


Рис. 5. Осредненные во времени распределения модуля скорости для случая тесного пучка с тремя рядами труб: $Re = 600$ (a) и 1200 (b). Приведены нормализованные значения величин

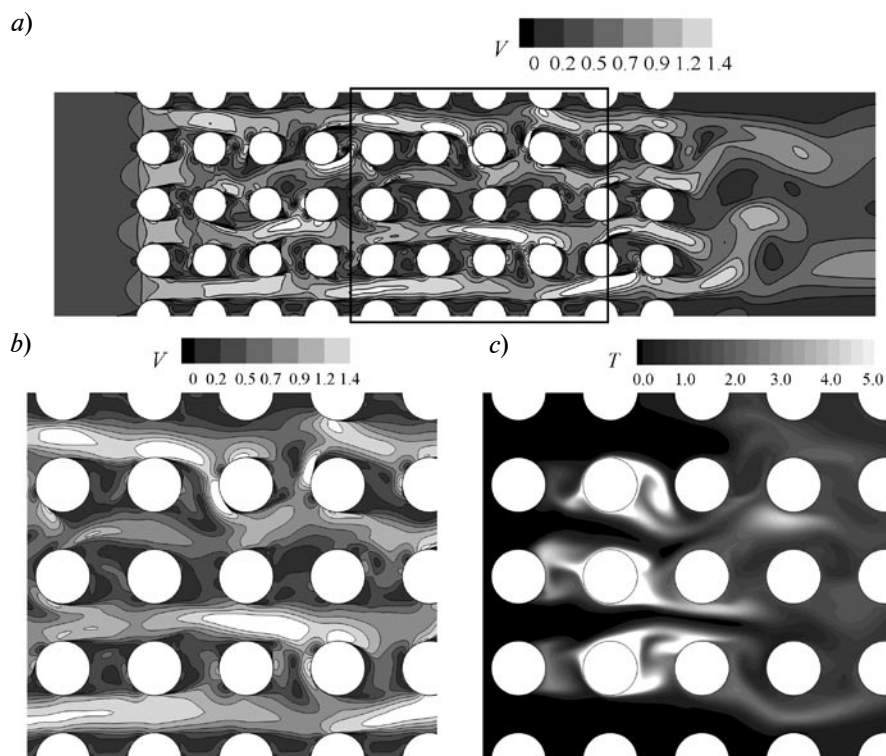


Рис. 6. Мгновенные поля, рассчитанные при $Re = 1200$ для широкого пучка с тремя рядами труб: модуль скорости (a), увеличенные фрагменты модуля скорости (b) и температуры (c). Приведены нормализованные значения величин

точно быстро размывается, становясь более коротким. Такие изменения в структуре течения, как показано далее, оказывают сильное влияние на средние характеристики теплоотдачи.

Расчетные значения среднего числа Нуссельта Nu для отдельной трубы вычислялись следующим образом:

$$Nu = \frac{q_w d}{\lambda(T_w - T_{in})}, \quad (2)$$

где T_w – средняя температура поверхности обогреваемой трубы, q_w – плотность теплового потока на ее поверхности, λ – коэффициент теплопроводности.

При обработке численных данных, полученных для пучков, содержащих более одного ряда трубок в поперечном направлении, применялось два способа расчета среднего числа Нуссельта: в первом случае использовались данные только для центрального цилиндра (число обозначено Nu , как и в экспериментах [3]), а во втором вычислялось среднее арифметическое чисел Нуссельта, полученных для всех обогреваемых цилиндров, расположенных в шестом ряду (среднее обозначено как Nu_Σ).

Значения числа Нуссельта, рассчитанные для пучков различной конфигурации,

представлены на рис. 7 в сопоставлении с экспериментальными данными, полученными для течения чистых щелочных металлов в коридорных пучках с рассмотренными параметрами упаковки [1].

Для тесного пучка в конфигурациях из трех и пяти поперечных рядов труб на рис. 7, *a* показаны значения числа Нуссельта, рассчитанные двумя разными способами. Дополнительно на графики нанесена обобщающая зависимость $Nu = Re^{0.5}$, рекомендованная авторами работ [3, 4] к использованию для оценочных расчетов теплообмена в коридорных и шахматных пучках труб при их обтекании чистыми жидкими металлами. Заметим здесь, что в экспериментах с течением расплава свинца и эвтектики свинец-висмут (описаны в работах [5, 6]), а также и в других недавних опытах со свинцом [13], получены значения коэффициента теплоотдачи в несколько раз меньшие, чем оцениваемые зависимостью $Nu = Re^{0.5}$. Основная причина этого расхождения заключается в том, что оксидная пленка на поверхности конструкционного материала, в совокупности с приповерхностным слоем свинца, насыщенным примесями и оксидом теплоносителя, образует слой с низкой теплопроводностью,

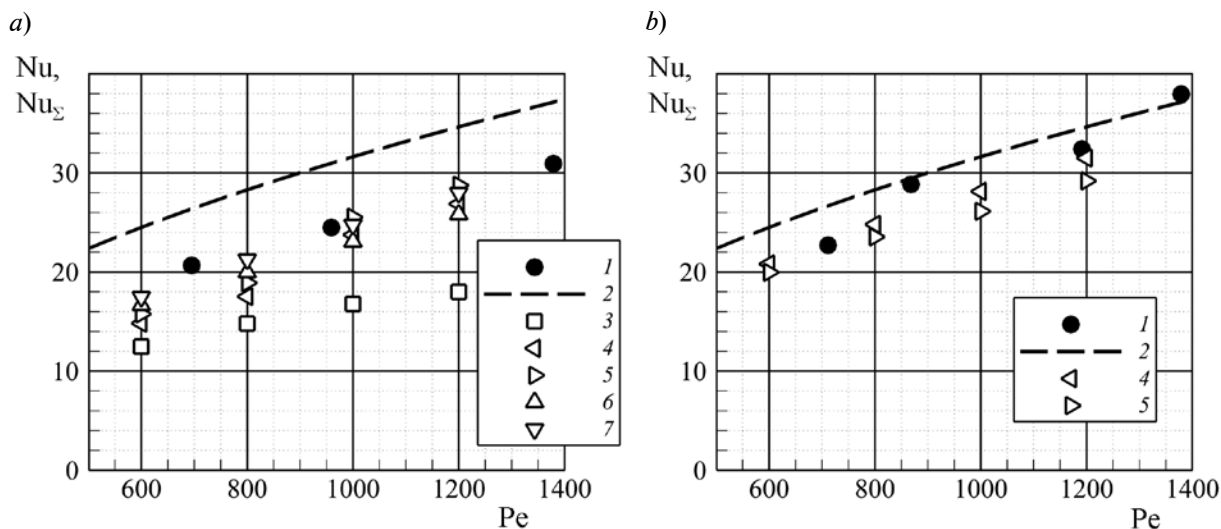


Рис. 7. Экспериментальные (1) и расчетные (3 – 7) значения чисел Нуссельта Nu (1 – 3, 5, 7) и Nu_Σ (4, 6) в зависимости от значения числа Пекле, а также аппроксимация экспериментальных данных (2) для тесного (а) и широкого (б) пучков. Расчеты выполнены для одного (3), трех (4, 5) и пяти (6, 7) рядов труб

Таблица 2

Влияние размерности сетки, числа Пекле и способа расчета на значения числа Нуссельта

Число Пекле	Nu		Nu _г	
	Грубая сетка	Мелкая сетка	Грубая сетка	Мелкая сетка
600	16,64	15,77	16,13	14,83
800	20,45	18,90	19,49	17,53
1000	23,70	25,53	22,17	23,75
1200	25,13	26,88	26,41	28,74

который препятствует интенсивной теплоотдаче (возникает так называемое термическое контактное сопротивление (ТКС)). В случае чистых щелочных металлов эффекты ТКС относительно малы.

Анализ расчетных данных, представленных на рис. 7, а, показывает, что в случае однорядного тесного пучка метод URANS (а по факту – стационарное RANS-решение) для всех рассчитанных режимов предсказывает интенсивность теплоотдачи, которая существенно ниже по сравнению с экспериментальными данными [1]. При увеличении же числа рядов расчетные значения становятся ближе к экспериментальным. Наилучшее согласие при этом достигается при высоких значениях числа Пекле. Кроме того, здесь менее выражено как влияние рядности, так и способа вычисления среднего теплового потока.

В табл. 2 приведены значения числа Нуссельта, рассчитанные двумя разными способами по результатам вычислений для трехрядного тесного пучка на расчетных сетках разной степени измельченности. Различия в результатах, полученных на разных сетках, не превышают 5 – 7 %, причем для двух меньших значений числа Пекле на более грубой сетке предсказываются большие значения числа Нуссельта, а для $Pe = 1000$ и 1200 – наоборот, расчеты на мелкой сетке предсказывают большую интенсивность средней теплоотдачи.

Расчетные значения числа Нуссельта, полученные для широкого пучка (рис. 7, б), при всех режимах хорошо согласуются с данными экспериментов [1].

Не вызывает сомнения, что профессио-

нальное применение вихре-разрешающих подходов может обеспечить более адекватное описание структуры турбулентных полей, пространственно-временного развития течения, локальной и средней теплоотдачи от поверхности нагреваемых труб пучка. Вместе с тем, использование режимов вычислительно-эффективного подхода URANS оказалось в настоящих расчетах вполне продуктивным. На расчетных сетках весьма умеренной размерности удалось получить приемлемую степень согласия с экспериментами по интересующей практиков средней теплоотдаче.

Заключение

Экономичный вычислительный подход, основанный на решении нестационарных, осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье – Стокса (метод URANS) использован для двумерного численного моделирования турбулентного течения и теплообмена в поперечно обтекаемых жидким металлом коридорных трубных пучках. При учете краевых эффектов изучено влияние на поле течения и среднюю теплоотдачу варьирования числа Пекле в диапазоне от 600 до 1200, плотности упаковки труб в пучке и его ширины. Из сравнения рассчитанных интегральных характеристик теплоотдачи с данными экспериментов следует, что приемлемая степень согласия достигается в том случае, если расчетная область включает в себя три и более рядов труб в поперечном к потоку направлении.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант №14-08-00936).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Боришанский В.М., Кутателадзе С.С., Новиков И.И., Федьинский О.С.** Жидкометаллические теплоносители. 2-е изд., перераб. и дополн. М.: Атомиздат, 1967. 299 с.
- [2] **Субботин В.И.** Гидродинамика и теплообмен в атомных энергетических установках. М.: Атомиздат, 1975. 408 с.
- [3] **Боришанский В.М., Андреевский А.А., Жилкина В.Б., Шнейдерман Л.Л.** Теплоотдача при поперечном обтекании пучков труб жидким металлом // Жидкие металлы. Под ред. В.М. Боришанского и др. М.: Госатомиздат, 1963. С. 183–205.
- [4] **Субботин В.И., Минашин В.Е., Денискин У.И.** Теплообмен при поперечном обтекании пучков труб // Теплофизика высоких температур. 1963. Т. 1. № 2. С. 238–246.
- [5] **Калякин С.Г., Грабежная В.А.** Экспериментальное исследование теплообмена в жидком металле при поперечном обтекании пучка труб в обоснование парогенератора РУ БРЕСТ-ОД-300 // Труды IV Российской национальной конференции по теплообмену (РНКТ-4). М.: ИД МЭИ, 2006. Т. 2. С. 128–131.
- [6] **Parphenov A.C., Mikheev A.C., Grabezhnaya V.A., Shcherbakov S.I.** Experimental study of heat transfer at the cross flow of lead over the bundle of steam generating tubes // Collection of conference papers “Thermophysics of fast reactors (Thermophysics-2013)”, Obninsk, October 23 – November 1, 2013. Obninsk, SSC of RF-IPPE, 2014.
- [7] **Абрамов А.Г., Смирнов Е.М.** Прямое численное моделирование турбулентного обтекания кругового цилиндра жидким натрием при существенном влиянии эффектов плавучести // Труды VI Российской национальной конференции по теплообмену (РНКТ-6). М.: ИД МЭИ, 2014.
- [8] **Белов И.А., Кудрявцев Н.А.** Теплоотдача и сопротивление пакетов труб. Л.: Энергоатомиздат, 1987. 223 с.
- [9] **Benhamadouche S., Laurence D.** LES, coarse LES, and transient RANS comparisons on the flow across a tube bundle // International Journal of Heat and Fluid Flow. 2003. Vol. 24. No. 4. Pp. 470–479.
- [10] **Liang C., Papadakis G.** Large eddy simulation of flow over a staggered tube bundle at subcritical Reynolds number // Journal of Fluids and Structures. 2007. Vol. 23. No. 8. Pp. 1215–1230.
- [11] **Li X., Wu X., He S.** Numerical investigation of the turbulent cross flow and heat transfer in a wall bounded tube bundle // International Journal of Thermal Sciences. 2014. Vol. 75. Pp. 127–139.
- [12] **Menter F.R., Langtry R., Kuntz M.** Ten 2015s of industrial experience with the SST turbulence model // In: Turbulence, Heat and Mass Transfer 4 (CD-ROM Proceedings). Redding, CT: Begell House Inc. 2003. Pp. 625–632.
- [13] **Beznosov A.V., Yarmonov M.V., Zudin A.D., et al.** Experimental studies of heat transfer characteristics and properties of the cross-flow pipe flow melt lead // Open Journal of Microphysics. 2014. Vol. 4. No. 4. Pp. 54–65.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

АБРАМОВ Алексей Геннадьевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры гидроаэродинамики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
 abramov@gunnet.ru

ЛЕВЧЕНЯ Александр Михайлович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры гидроаэродинамики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
 levchenya@yandex.ru

СМИРНОВ Евгений Михайлович – доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой гидроаэродинамики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого,

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
 aero@phmf.spbstu.ru

СМИРНОВ Павел Евгеньевич – кандидат физико-математических наук, старший разработчик программного обеспечения ANSYS Germany GmbH, г. Дармштадт, Федеративная Республика Германия.

Birkenweg 14A, 64295 Darmstadt, Germany
 psmirn2000@mail.ru

Abramov A.G., Levchenya A.M., Smirnov E.M., Smirnov P.E. NUMERICAL SIMULATION OF LIQUID METAL TURBULENT HEAT TRANSFER FROM AN INLINE TUBE BUNDLE IN CROSS-FLOW.

Results of numerical simulation of turbulent flow field and heat transfer of liquid metal in cross-flow over inline tube bundles consisting of smooth round tubes are presented. Computations have been performed with the CFD-code ANSYS Fluent on the base of two-dimensional unsteady RANS formulation using the SST turbulence model by Menter and assuming constant physical properties of a fluid with the Prandtl number equal to 0.023. The Reynolds number was ranged from 26200 to 52400. Instantaneous and time-averaged velocity and temperature fields obtained for bundles of different intertube spacing at variation of the bundle width (number of tube rows in the spanwise direction) were analyzed. Integral characteristics of heat transfer were compared with experimental data.

TUBE BUNDLE, LIQUID METAL, TURBULENCE, HEAT TRANSFER, NUMERICAL SIMULATION, URANS.

REFERENCES

- [1] V.M. Borishanskiy, S.S. Kutateladze, I.I. Novikov, O.S. Fedynskiy, Zhidkometallicheskiye teplonositeli [Liquid-metal heat-transport media]: 2-ye izd., pererab. i dopoln, Atomizdat, Moscow, 1967.
- [2] V.I. Subbotin, Gidrodinamika i teploobmen v atomnykh energeticheskikh ustanovkakh [Hydrodynamics and heat transfer in nuclear energy facilities], Atomizdat, Moscow, 1975.
- [3] V.M. Borishanskiy, A.A. Andreyevskiy, V.B. Zhilkina, L.L. Shneyderman, Teplootdacha pri poperechnom obtekanii puchkov trub zhidkim metallom [Heat transfer of tube bundles in cross-flow of liquid metal], Zhidkiye metally. Pod red. V.M. Borishanskogo i dr. Gosatomizdat, Moscow (1963). 183–205.
- [4] V.I. Subbotin, V.E. Minashin, U.I. Deniskin, Teploobmen pri poperechnom obtekanii puchkov trub [Heat transfer of tube bundles in cross-flow], Teplofizika vysokikh temperatur. 1 (2) (1963) 238–246.
- [5] S.G. Kalyakin, V.A. Grabezhnaya, Eksperimentalnoye issledovaniye teploobmena v zhidkom metalle pri poperechnom obtekanii puchka trub v obosnovaniye parogeneratora RU BREST-OD-300 [Experimental study of heat transfer at cross-flow of liquid metal in justification of the steam generator RU BREST-OD-300], Trudy IV Rossiyskoy natsionalnoy konferentsii po teploobmenu (RNKT-4). ID MEI, Moscow. 2 (2006) 128–131.
- [6] A.C. Parphenov, A.C. Mikheev, V.A. Grabezhnaya, C.I. Shcherbakov, Experimental study of heat transfer at the cross flow of lead over the bundle of steam generating tubes, Collection of conference papers Thermophysics – 2013, Obninsk, October 23 – November 1 2013. Obninsk, SSC of RF – IPPE, 2014.
- [7] A.G. Abramov, E.M. Smirnov, Pryamoye chislennoye modelirovaniye turbulentnogo obtekaniya krugovogo tsilindra zhidkim natriyem pri sushchestvennom vliyaniy effektiv plavuchesti [Direct numerical simulation of liquid sodium turbulent flow past a circular cylinder under the essential buoyancy effects], Trudy VI Rossiyskoy natsionalnoy konferentsii po teploobmenu (RNKT-6). ID MEI, Moscow (2014) ID C2-01.
- [8] I.A. Belov, N.A. Kudryavtsev, Teplootdacha i soprotivleniye paketov trub [Heat transfer and resistance of tube bundles], Energoatomizdat, Leningrad, 1987.
- [9] S. Benhamadouche, D. Laurence, LES, coarse LES, and transient RANS comparisons on the flow across a tube bundle, International Journal of Heat and Fluid Flow, 24(4) (2003) 470–479.
- [10] C. Liang, G. Papadakis, Large eddy simulation of flow over a staggered tube bundle at subcritical Reynolds number, Journal of Fluids and Structures, 23(8) (2007) 1215–1230.
- [11] X. Li, X. Wu, S. He, Numerical investigation of the turbulent cross flow and heat transfer in a wall bounded tube bundle, International Journal of Thermal Sciences, 75 (2014) 127–139.
- [12] F.R. Menter, R. Langtry, M. Kuntz, Ten years of industrial experience with the SST turbulence model, In: Turbulence, Heat and Mass Transfer 4 (CD-ROM Proceedings). Redding, CT: Begell House Inc. (2003) 625–632.
- [13] A.V. Beznosov, M.V. Yarmonov, A.D. Zudin, et al., Experimental studies of heat transfer characteristics and properties of the cross-flow pipe flow melt lead, Open Journal of Microphysics, 4(4) (2014) 54–65.

THE AUTHORS

ABRAMOV Alexey G.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation

abramov@runnet.ru

LEVCHENYA Alexander M.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation
levchenya@yandex.ru

SMIRNOV Evgueni M.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation
aero@phmf.spbstu.ru

SMIRNOV Pavel E.

ANSYS Germany GmbH
Birkenweg 14A, 64295 Darmstadt, Germany
psmirn2000@mail.ru