

На правах рукописи



ЯССИН ХАЛИЛ ФАРХАН ЯССИН

**ЛАМИНАРНЫЙ СВОБОДНО-КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН
В ВЕРТИКАЛЬНОМ КАНАЛЕ С ОТРЫВОМ ПОТОКА**

01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Терехов Виктор Иванович

Официальные оппоненты: **Попов Игорь Александрович**,
доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ», профессор кафедры «Теплотехники и энергетического машиностроения»

Шерemet Михаил Александрович,
доктор физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», заведующий кафедрой «Теоретической механики»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)», г. Новосибирск

Защита состоится « 8 » февраля 2019 г. в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.02 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» (630073, г. Новосибирск, проспект К. Маркса, 20).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» и на сайте www.nstu.ru

Автореферат разослан « ___ » _____ 20__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.173.02
доктор технических наук, профессор



А.В. Чичиндаев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Свободная конвекция в вертикальных каналах с адиабатическими или изотермическими стенами является одним из простейших случаев течения газов или жидкостей. Подъемное или опускное течение газа в этом случае обусловлено гидростатическими силами за счет разности плотностей в окружающем пространстве у входа и выходе из канала, а также за счет нагрева стенок. В итоге гидростатические силы приводят к возникновению конвективного течения, называемого конвективной тягой. Тяга трубы или канала является одним из основных показателей эффективности их работы и зависит от большого числа факторов: температурного напора (числа Релея), высоты трубы, ее формы и размеров, гидравлических потерь, определяемых геометрией канала, шероховатости поверхности, наличия преград и многих других факторов.

Свободно-конвективные течения в вертикальных каналах чрезвычайно широко распространены в различных технических приложениях. Прежде всего, это печные и дымовые трубы котельных установок и крупных тепловых станций, каналы для выброса отработанного газа при вентиляции помещений и производственных цехов. Большой спектр применений относится к интенсификации охлаждения электронного оборудования, а также многих энергетических аппаратов. С целью дальнейшего повышения эффективности охлаждения оборудования и развития фундаментальных основ свободно - конвективных течений важным этапом является проведение комплексных расчетных исследований новых возможностей интенсификации тепломассопереноса или увеличения расхода газа между пластинами в широком диапазоне изменения параметров.

Интерес к данной проблеме возник давно и он практически не ослабевает последнее столетие. Задача о свободной конвекции между двумя параллельными пластинами стала к настоящему времени классической и ей посвящено огромное число теоретических и экспериментальных работ. Большой вклад в решение этих проблем внесен российскими исследователями [Остроумов Г.А., Леонтьев А.И., Кирдяшкин А.Г., Бердников В.С., Полежаев В.И., Мартыненко О.Г., Смирнов Е.М., Терехов В.И., Черкасов С.Г., Шеремет М.А. и др.]. Отметим ряд фундаментальных работ, выполненных зарубежными учеными [Elenbaas, Bar-Cohen & Rosenhow, Olsson, Frederick, Jaluria, Tanda, Audin, Ekaid и др.].

Однако отсутствие систематических данных при малых числах Релея и особенно в очень высоких прослойках ($AR \sim 500$), а также наличие в них отрыва потока за различными преградами является «белым пятном» в этой проблеме, в то время как существует большая практическая потребность подобных исследований. Определяющую роль в решении сложных задач аэромеханики и теплообмена приобретает численный эксперимент, что составляет основной инструмент для исследований в настоящей работе. Следовательно, поставленная в работе проблема является **актуальной** и она отвечает приоритетному направлению развития науки, технологий и техники РФ: п. 8 «Энергоэффективность, энергосбережение и ядерная энергетика».

Цели диссертационной работы:

- Создание физико-математической модели, численного алгоритма для исследования течения и теплообмена при свободной ламинарной конвекции в открытых каналах при наличии отрыва потока.
- Проведение систематических численных расчетов в каналах с адиабатическими и изотермическими стенками в широком диапазоне чисел Релея ($Ra^*=10^{-2} \div 10^5$) и высоты каналов ($AR=H/w=1 \div 500$) с гладкими и оребренными стенками с варьируемой высотой ребра ($l/w = 0 \div 0,8$).
- Обработка и обобщение результатов численных экспериментов с целью получения корреляционных соотношений для интегральной теплоотдачи и конвективной тяги, которые могут быть использованы в инженерной практике.

Научная новизна работы:

1. Впервые проведены численные исследования свободно – конвективного течения и теплообмена в вертикальных каналах с открытыми границами в широком диапазоне чисел Релея ($Ra^*=10^{-2} \div 10^5$), высоты канала ($AR=1 \div 500$), а также при наличии симметрично и не симметрично установленных адиабатных ребер.

2. В каналах с адиабатными стенками обнаружен режим инверсии ($Ra \approx 400$), когда расход газа через канал не зависит от высоты ребра. Показано, что основной причиной снижения интегрального теплообмена и конвективной тяги (до порядка величины) в оребренных каналах является рост гидравлического сопротивления за счет внезапного сужения и отрыва потока.

3. Получены новые данные для ламинарной свободной конвекции в канале с изотермическими стенками. Использование модифицированных значений чисел Релея и Рейнольдса позволило обобщить численные данные для каналов различной длины и различного уровня термогравитационных сил. Исключение составляет область малых чисел Релея, причины которого требуют более детальных исследований.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

1. Разработана методика моделирования процессов течения и теплообмена при ламинарной свободной конвекции в вертикальных протяженных каналах с неизвестными границами на входе.

2. На базе полученных данных проведен анализ влияния основных параметров на конвективную тягу и интегральный теплоперенос. Обобщение полученных результатов позволяют проводить инженерный анализ режимов с интенсифицированным теплообменом.

3. Результаты работы используются в учебном процессе на кафедре «Техническая теплофизика» НГТУ в процессе преподавании дисциплин: тепломассообмен, теория пограничного слоя, системы кондиционирования воздуха, тепловые машины.

Несомненную ценность представляют и разработанные автором компьютерные коды, алгоритмы численного исследования и программы, зарекомендовавшие себя как надежный метод изучения данной задачи, в большей части, заменяющий дорогостоящие экспериментальные или натурные исследования.

Личный вклад автора.

Работа выполнена под научным руководством д.т.н. Терехова В.И. Ему принадлежит постановка задачи, анализ и обсуждение результатов. К.т.н. Экаид А.Л. являлся научным консультантом по данной работе. Он принимал участие в отладке программного комплекса и его верификации. Большая часть работы автором выполнена самостоятельно. Им проведен комплекс численных расчетов, их обработка и анализ, а также подготовка материалов к публикации. Все основные результаты, обладающие научной новизной и выносимые на защиту, получены автором лично.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика численного исследования ламинарной термогравитационной конвекции и теплообмена в вертикальных протяженных каналах с параллельными адиабатическими или изотермическими стенками при наличии отрыва потока.

2. Результаты систематических исследований конвективной тяги и теплопереноса в вертикальных каналах различной протяженности, при наличии или отсутствии теплового потока с гладкими или ребренными стенками.

3. Результаты численного исследования влияния отрыва потока на основные характеристики течения при изменении масштаба преград и места их расположения по высоте канала.

Степень достоверности полученных результатов. Все основные положения и выводы, сформулированные в диссертации, обеспечиваются корректностью постановок задач, использованием апробированных вычислительных алгоритмов и расчетных схем, а также сравнением результатов численного анализа с имеющимися в литературе экспериментальными и расчетными данными, а также сопоставлениями с результатами расчетов, основанных на использовании теории пограничного слоя.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на XXXIII Сибирском теплофизическом семинаре (Новосибирск, 2017); 11-th Int. Forum on Strategic Techn. (IFOST), (Novosibirsk, 2016); 9th Int. Symp. Advances in Comp. Heat Transfer (ICHMT), (Cracow, Poland, 2016); III and IV Int. Seminar with elements of scientific school for young scientists (ISHM) (Novosibirsk, 2016, 2017); XV Минском международном форуме по тепло - и массообмену (Минск, Беларусь, 2016), 16th Int. Heat Transfer Conf., ИНТС-16, (Beijing, China, 2018).

Публикации. По результатам исследований опубликовано 15 печатных работ, в том числе 4 научных статьи - в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени кандидата наук, 11 работ, опубликованы в трудах международных и всероссийских конференций.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и приложения. Работа содержит 136 страниц основного текста, 80 рисунков, 3 таблицы. Список использованных источников содержит 187 наименования.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении рассмотрена общая постановка проблемы, обоснована актуальность ее решения, сформулированы цель и задачи работы, а также методы ее решения. Продемонстрирована научная новизна поставленных задач и их практическая значимость, приведены основные положения диссертации.

В первой главе проведен критический обзор и анализ научной литературы, посвященной исследованиям свободной конвекции в вертикальных каналах с открытыми границами. Установлено, что данной проблеме уделялось большое внимание и, особенно в последнее время, численным исследованиям. Слабо проработанными являются случаи предельно низких и высоких каналов. Отрывные течения в каналах с преградами также являются мало изученными.

На основании проведенного анализа современного состояния проблемы определены направления исследований и дается постановка задач.

Вторая глава посвящена физико-математической постановке задачи о ламинарном свободно – конвективном течении и теплообмене в двухмерной постановке в вертикальных гладких и оребренных каналах с адиабатическими или изотермическими стенками (Рисунок 1). Высота пластин изменялась в очень широких пределах $H=(1\div 500)w$, так что параметр их удлинения был равен $AR = H / w = 1 \div 500$. Стенки открытой прослойки могли быть адиабатическими ($q_w = const$, Глава 3) либо изотермическими ($T_w = const$, Глава 4). В первом случае температуры окружающей среды внизу иверху канала отличались между собой, за счет чего и создавалось конвективное течение. Во втором случае температуры перед входом и за выходом из канала совпадали между собой и равнялись T_0 .

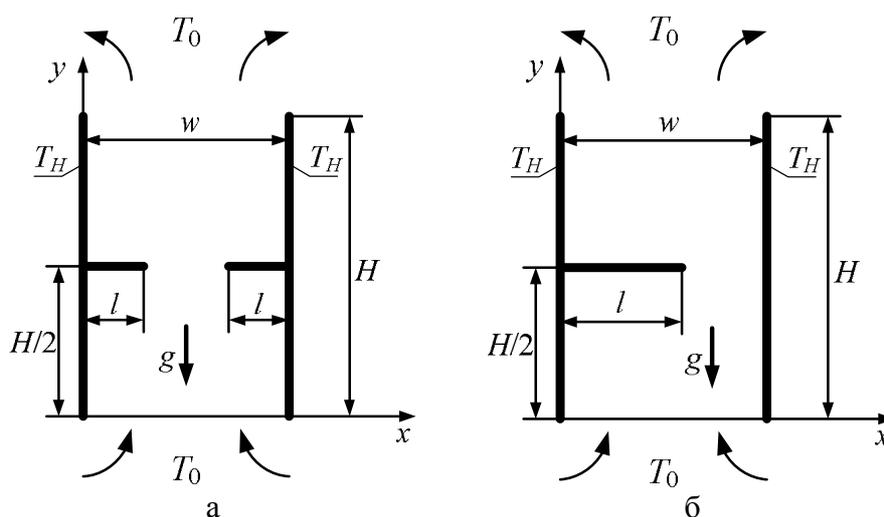


Рисунок 1 – Схемы каналов при различном расположении ребер

В работе рассматривался простейший случай, когда температуры противоположных пластин были одинаковыми и температурный фактор был равен $R_T = (T_C - T_H) / (T_H - T_0) = 1$, поэтому течение и теплообмен, как правило, были симметричными относительно оси канала.

В серии исследований по влиянию ребра на течение и теплообмен рассматривались адиабатические ($\lambda \rightarrow 0$) бесконечно тонкие ребра (толщина равна вычислительному шагу), которые могли располагаться как на одной стенке, так и симметрично друг относительно друга на противоположных поверхностях. Высота их для ребер на одной стенке изменялась $l/w=0 \div 0,8$, а при симметричной установке двух ребер – $l/w=0,4$. Кроме того, в программу исследований входило изучение места расположения ребер по высоте прослойки, поэтому они могли располагаться, начиная с сечения входа вплоть до выхода из канала.

Численные исследования проводились на основе решения двумерных стационарных уравнений Навье-Стокса и уравнения энергии в приближении Буссинеска. Рассматриваемая краевая задача имеет неизвестные граничные условия на входе и на выходе между пластинами. Поэтому расчетная область кроме пространства между пластинами включает два дополнительных прямоугольника у входа и выхода канала с мягкими граничными условиями на их границах. Оптимальный размер этих областей и число расчетных узлов определялись в серии численных экспериментов и верификацией на опытных данных, полученных в более простых условиях. Как правило, линейный размер входной и выходной областей был не меньше, чем высота пластины H . Численное решение было получено для воздуха при числе Прандтля $Pr = 0,71$. Влиянием лучистого теплообмена пренебрегалось, поскольку стенки были изотермическими. В работе величина модифицированного числа Рэлея изменялась в очень широком диапазоне $Ra^* = 10^{-2} \div 10^5$, что позволило получить данные, которые могут быть востребованы в практических приложениях.

Решается система уравнений Навье-Стокса в безразмерной форме:

$$\left(\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} \right) = 0, \quad (1)$$

$$\left(U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} \right) = - \frac{\partial P}{\partial X} + \sqrt{\frac{Pr}{Ra}} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right), \quad (2)$$

$$\left(U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} \right) = - \frac{\partial P}{\partial Y} + \sqrt{\frac{Pr}{Ra}} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) + \theta. \quad (3)$$

Уравнение энергии:

$$\left(U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} \right) = \frac{1}{\sqrt{Pr \cdot Ra}} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right), \quad (4)$$

где $u_{ref} = \sqrt{g\beta(T_H - T_0)w}$; $Ra = \rho^2 g\beta(T_H - T_0)w^3 Pr / \mu^2$; $Pr = \nu / a$; $AR = H / w$.

Поле течения характеризуется числом Рейнольдса $Re = \frac{\rho V_m 2w}{\mu} = 2V_m \sqrt{\frac{Ra}{Pr}}$,

где V_m – среднерасходная скорость между пластинами.

Локальное и интегральное числа Нуссельта определялось на обеих стенках как:

$$\text{Nu}_C = \left. \frac{\partial \theta}{\partial X} \right|_{X=0}; \quad \text{Nu}_H = \left. \frac{\partial \theta}{\partial X} \right|_{X=1}; \quad \overline{\text{Nu}}_H = \frac{1}{H} \int_0^H \text{Nu}_H dY.$$

Для дискретизации уравнений движения и энергии используется метод конечного объема. Система алгебраических уравнений решается методом развертки неявно линейной схемой исключения Гаусса. Для приближения конвективных членов в уравнениях движения и энергии используется гибридная схема потока. Численная реализация системы дифференциальных уравнений (1)–(4) с граничными условиями выполнена на языке программирования Fortran. Для связи скорости и давления применялся алгоритм SIMPLE. В работе использовалась не равномерная сетка со сгущением к стенкам и преградам.

Численный алгоритм прошел многоэтапное тестирование на сеточную сходимость, а также с классическими литературными данными. Проведенная оценка неопределенности результатов по интегральным характеристикам не превышала 1,2%, что говорит в пользу достоверности результатов.

В третьей главе представлены результаты численных расчетов течения в канале с адиабатическими стенками. На Рисунке 2 показано изменение продольной компоненты скорости в различных по высоте сечениях короткого канала ($AR=5$) при двух предельных случаях свободной конвекции: слабой ($Ra=100$, Рисунок 2,а) и интенсивной ($Ra=10^5$, Рисунок 2,б). Как видно, при слабой конвекции течение быстро стабилизируется, тогда как, при высоких числах Релея сценарий развития течения в канале имеет более сложный характер. Распределение скорости на входе имеет седлообразный характер с провалом на оси канала. Обтекание передней кромки индуцирует симметричный отрыв потока на обеих стенках. Скорость возвратного течения достигает примерно 20% от скорости на оси канала, а протяженность отрывной зоны – 1,5 калибра. Восстановление профиля скорости до стабилизированного при данных условиях не происходит.

Результаты расчета параметра конвективной тяги (числа Re) при вариации числа Ra и высоты канала AR представлены на Рисунке 2,в. Как и следовало ожидать, число Рейнольдса возрастает по мере увеличения числа Релея. При этом следует сделать один важный вывод. В области малых чисел Релея короткие каналы являются более эффективными с точки зрения увеличения тяги. При больших числах Релея, наоборот, число Рейнольдса или расход газа возрастают по мере увеличения высоты канала. Граничная область, где конвективная тяга практически не зависит от высоты канала, приходится на числа Релея в диапазоне $Ra \sim 350 \div 400$. Этот режим, при котором величина расхода газа не зависит от высоты трубы, назовем точкой инверсии конвективной тяги. Наличие такого режима обусловлено соотношением сил, действующих на элементарный объем внутри канала и, вероятно, должен существовать и для круглых труб, а также и при турбулентной конвекции. По нашему мнению, наличие режима инверсии ранее в литературе не отмечалось, и этот вопрос требует более глубокой проработки.

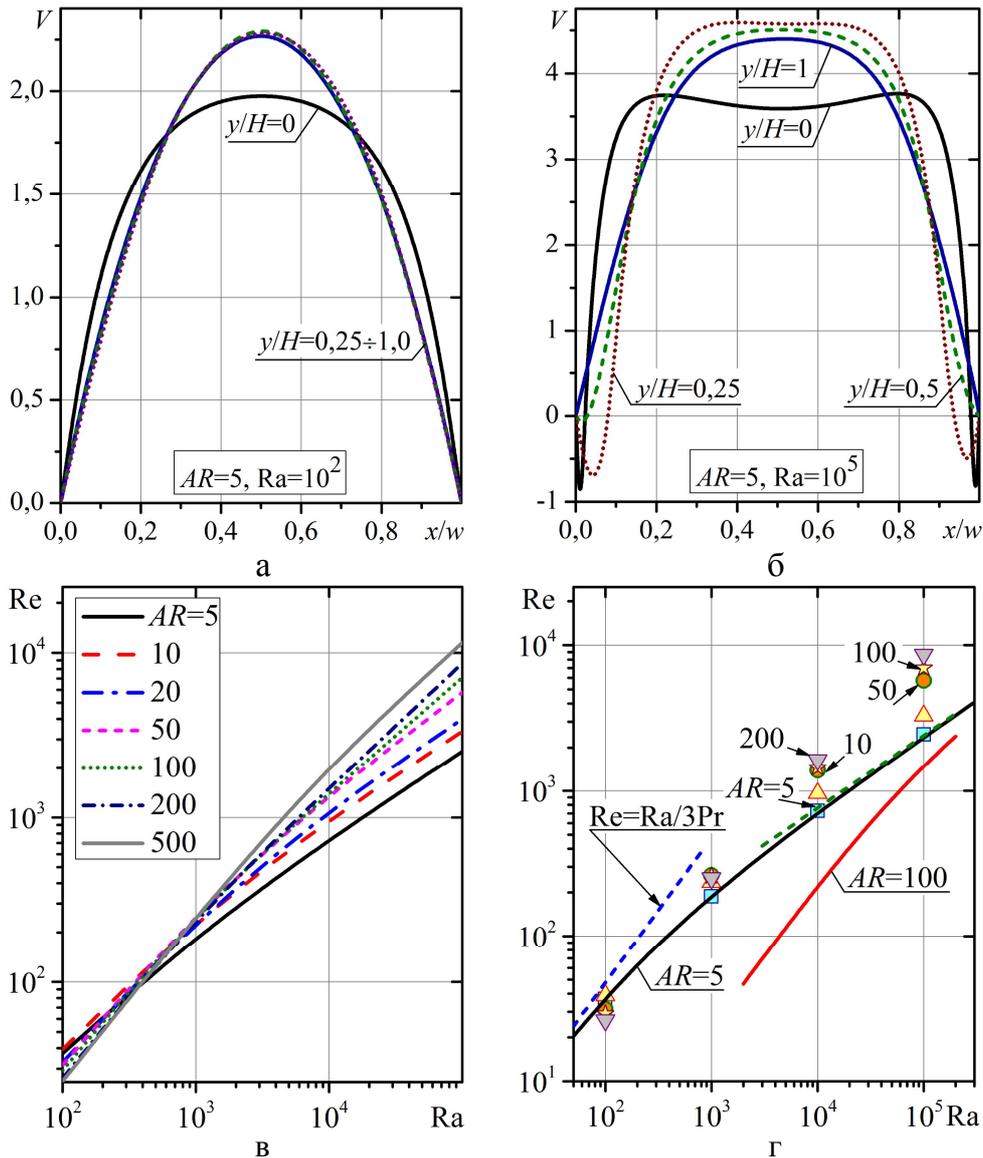


Рисунок 2 – Профили скорости (а,б) и число Рейнольдса (в,г) в адиабатном канале. На 2,г линии – расчет по (5),(6) и (7), точки – численный расчет

Из уравнения Бернулли для конвекции в вертикальном канале с учетом сил Архимеда и касательных напряжений получим выражение для числа Re :

$$Re = -12AR + \left(144AR^2 + 8AR \frac{Ra}{Pr} \right)^{1/2} \quad (5)$$

из которого следует два предельных соотношения:

$$\text{для невязкого течения } \tau_w \rightarrow 0: Re = 2,83 \left(AR \frac{Ra}{Pr} \right)^{1/2} \quad (6)$$

$$\text{и слабой конвекции: } V \rightarrow 0: Re = \frac{1}{3} \frac{Ra}{Pr}. \quad (7)$$

Сопоставление результатов численного расчета с аналитическими зависимостями (5)–(7) дано на Рисунке 2,г. Видно, что результаты хорошо совпадают только для короткого канала во всем диапазоне чисел Релея. Для высоких каналов такого совпадения численных результатов с аналитикой не наблюдается. И только в области очень высоких чисел Релея ($Ra > 10^5$) намечается тенденция к сближению этих результатов. Причины такого поведения результатов расчетов лежат в несоответствии приближений одномерной модели реальной структуре течения в длинных каналах. Инерционный (6) и вязкий (7) пределы дают правильное отражение поведения тяги в области слабой ($Ra \rightarrow 0$) и сильной ($Ra \rightarrow \infty$) свободной ламинарной конвекции.

Наличие оребрения стенок каналов приводит к кардинальной перестройке течения. В этом можно убедиться, обратившись к Рисунку 3, где представлено изменение скорости и давление на оси при симметричной установке двух тонких ребер высотой $l/w = 0,4$.

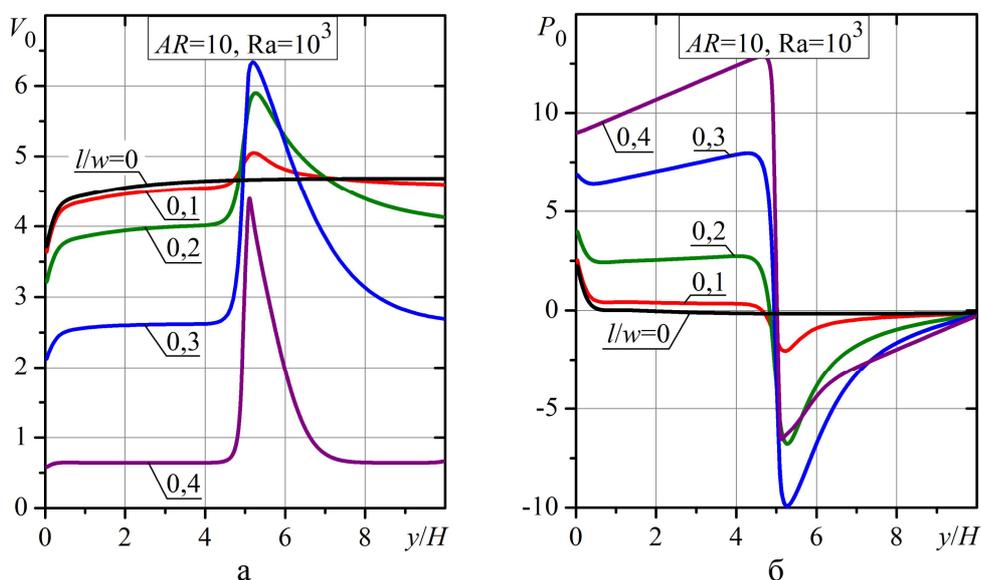


Рисунок 3 – Распределение скорости потока (а) и статического давления (б) на оси канала при наличии двух симметричных ребер на стенках

Вполне ожидаемым было увеличение максимума скорости в сечении перережима потока при $y/H=5$ относительно его значения в области невозмущенного течения. Но абсолютная величина этого максимума ведет себя не монотонно в зависимости от степени пережатия потока, поскольку в данном случае включается фактор роста общих гидравлических потерь и скорость газа на оси при увеличении высоты ребер, как это ярко видно на Рисунке 3,а, резко снижается. Это же самое проявляется и на распределении давления в канале (Рисунок 3,б), где величина максимального разрежения наблюдается не у самого высокого ребра.

Число Рейнольдса Re , в значительной мере зависит от наличия в канале оребрения (Рисунок 4). Преграда высотой $l/w = 0,4$ может снизить его (и конвективную тягу также) более чем в семь раз. При этом во всем диапазоне чисел Релея расчетные линии для гладкого и оребренного каналов располагаются ме-

жду собой эквидистантно, что говорит об одинаковой степени влияния ребер на расход газа. Результаты расчета в первом приближении могут быть описаны корреляционным соотношением $Re \sim ARa^{0,6}$, но коэффициент A при этом изменяется весьма значительно.

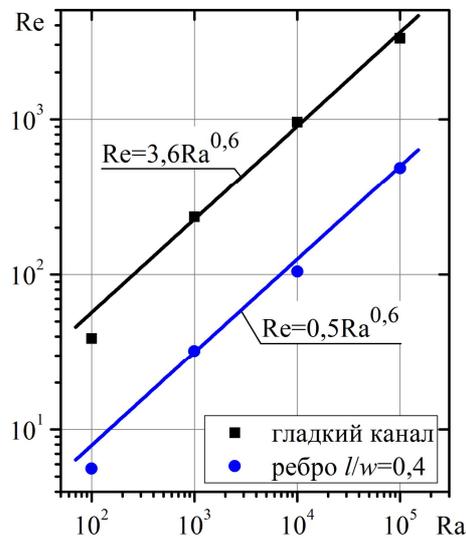


Рисунок 4 – Изменение числа Рейнольдса в гладком и оребренном канале

В четвертой главе представлены результаты численного эксперимента по изучению течения и теплообмена в высоких вертикальных каналах с изотермическими стенками при вариации числа Релея в широких пределах.

Наглядное представление о развитии теплового поля по высоте канала дает распределение среднемассовой температуры Θ_m и локального числа Нуссельта Nu . Такие данные численного расчета для случая $Ra=10^3$ и различных высот канала демонстрируются на Рисунке 5. В каналах небольшой высоты ($AR=1 \div 10$) воздушный поток не успевает полностью прогреться до температуры стенок (Рисунок 5,а).

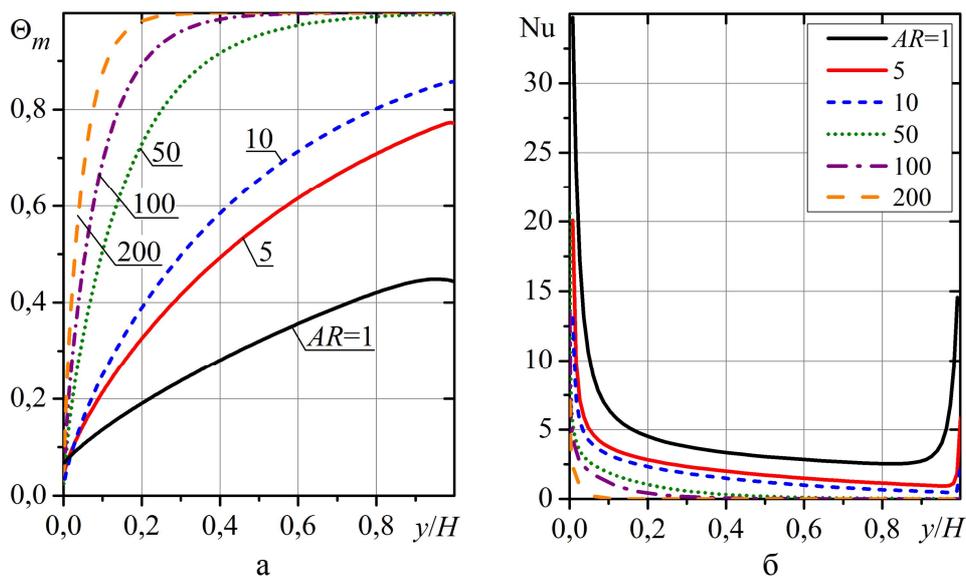


Рисунок 5 – Распределение по длине каналов различной высоты среднемассовой температуры (а) и числа Нуссельта (б): $Ra = 10^3$

В высоких прослойках ($AR > 50$) течение достигает теплового равновесия $\Theta_m = 1$ задолго до выхода из канала, поэтому оставшаяся его часть не участвует в процессе теплообмена.

Эти же выводы подтверждают данные и по локальной теплоотдаче, показанные на Рисунке 5,б. Ясно видно, что интенсивность теплообмена снижается по мере увеличения высоты канала. Для высоких прослоек он и вовсе отсутствует на большей части канала. Важно подчеркнуть, что заметное влияние на течение и теплообмен оказывают области, примыкающие к входу и выходу из канала. В этих зонах из-за эффектов обтекания угловой кромки канала образуются вихревые отрывные потоки, приводящие к интенсификации теплообмена, однако в данной работе этот процесс подробно не изучался.

Наиболее наглядно влияние геометрии прослойки на интенсивность теплообмена и число Рейнольдса демонстрируется на Рисунке 6. Как видно интегральный теплообмен с увеличением длины канала уменьшается во всем диапазоне чисел Релея. Однако, темп снижения в области высоких чисел Релея менее значителен, чем при малых. Объяснением этому служит тот факт, что значительную часть протяженных каналов занимает область с очень низким уровнем теплоотдачи, в то время как размер зоны с эффективным теплообменом практически остается одним и тем же для каналов различной длины.

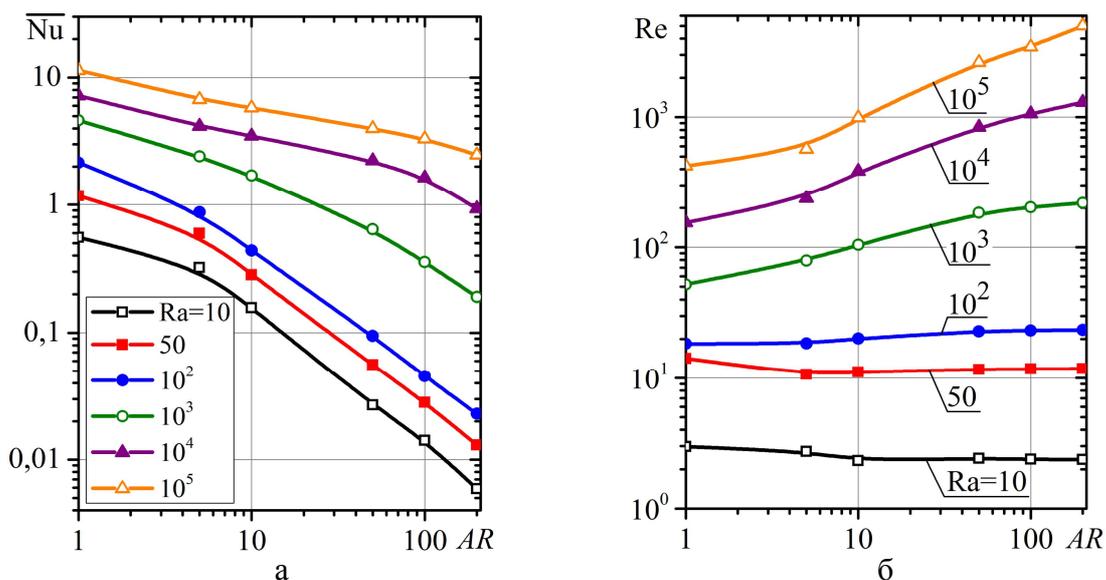


Рисунок 6 – Зависимость среднего теплообмена (а) и числа Re (б) от высоты прослойки

Число Рейнольдса в канале (Рисунок 6,б) в зависимости от длины канала ведет себя сложным образом. При малых числах Релея ($Ra < 10^3$) рост термогравитационных сил за счет увеличения поверхности теплообмена компенсируется потерями на трение. Поэтому в этой области чисел Ra расход газа сквозь канал практически не зависит от его высоты. Более того, при малых удлинении ($AR < 10$) вначале наблюдается небольшое понижение расхода газа, а затем его стабилизация. В области больших чисел Релея ($Ra > 10^3$) расход газа через канал возрастает по мере увеличения высоты канала, что говорит о преобладающем эффекте подъемных сил по сравнению с трением. Отмеченные особенности пове-

дения тепловых и динамических характеристик при вариации уровня термогравитационных сил являются важными при оптимизационном анализе каналов с параллельными стенками различной протяженности.

При обобщении результатов численных и физических экспериментов по теплоотдаче в вертикальных каналах различной длины Elenbaas, 1942 впервые использовал модифицированное число Релея, учитывающее масштаб протяженности канала:

$$Ra^* = Ra \frac{w}{l}. \quad (8)$$

С использованием этого критерия им было получено обобщающее выражение для интегрального числа Нуссельта для каналов различной протяженности:

$$Nu_{av} = \frac{1}{24} Ra^* \left[1 - \exp\left(\frac{35}{Ra^*}\right) \right]^{3/4}. \quad (9)$$

Bar-Cohen & Rosenhow, 1984 с использованием метода сращивания решений для свободной конвекции на начальном участке канала и для полностью развитого течения при постоянной температуре стенки получено соотношение для интегральной теплоотдачи в функции модифицированного числа Релея:

$$Nu_{av} = \left[\frac{576}{Ra^{*2}} + \frac{2,83}{\sqrt{Ra^*}} \right]^{-1/2}. \quad (10)$$

Зависимость среднего числа Нуссельта и числа Рейнольдса от модифицированного числа Релея показаны на Рисунке 7. Здесь же, на Рисунке 7,а нанесены расчеты по формулам (9) и (10). Обе расчетные линии располагаются достаточно близко между собой и согласуются с данными численных расчетов настоящей работы в очень широком диапазоне чисел Релея $Ra^* = 10^{-2} \div 10^5$. Исключение составляют результаты, полученные для прослоек всех длин при малых числах Релея. Одной из возможных причин такого поведения закономерностей теплообмена объясняется переходу к асимптотическому пределу, наблюдаемому при числах Релея, стремящихся к нулю $Ra \rightarrow 0$. Этот вопрос активно обсуждается в последнее время в литературе.

В отличие от интегральной теплоотдачи использование параметра Elenbaas Ra^* не приводит к обобщению расчетных данных и все они расслаиваются в зависимости от высоты канала (Рисунок 7,б). Причем, как и следовало ожидать, в каналах большей высоты расход воздуха за счет свободной конвекции возрастает. Об этом указывается в работе Olsson, 2004, где получено выражение для числа Рейнольдса при условии $T_w = const$:

$$Re = \frac{2}{Pr} \left[\left(4Ra^* \cdot Pr \frac{AR}{f_{app}} \right)^{-0,405} + \left(6,6Ra^* \cdot Pr^{1/4} AR^{0,81} \right)^{-1} \right]^{-1/0,81}. \quad (11)$$

Результаты расчетов по формуле (11) для параметров удлинения $AR = 10$ и 100 представлены на Рисунке 7,б пунктирными линиями. Как следует из сопоставлений, эти линии идеально совпадают с результатами расчетов настоя-

шей работы во всем диапазоне чисел Релея, что говорит о возможности использования приближенных методов (11) для описания гидродинамики в вертикальных каналах в режиме свободной конвекции.

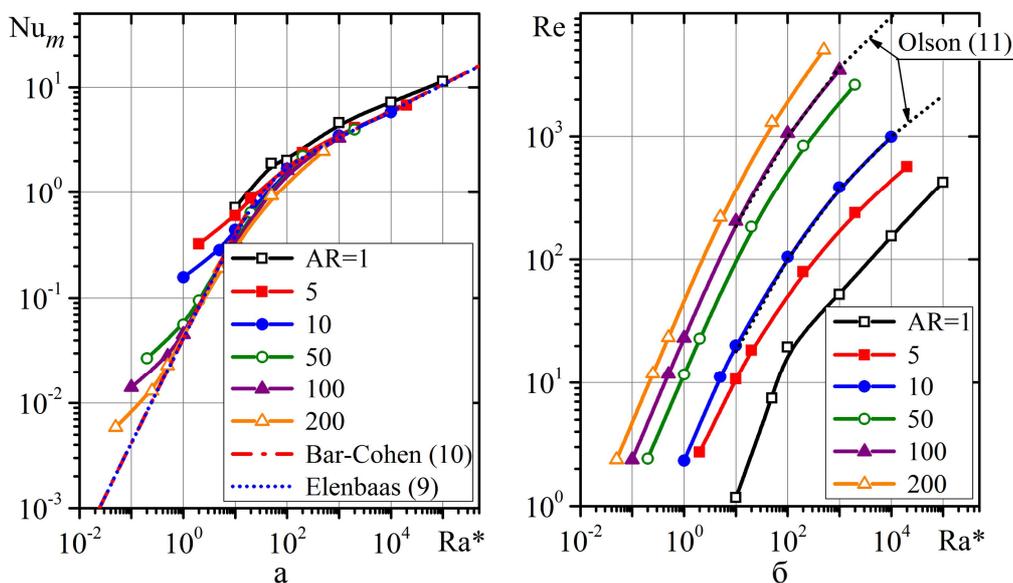


Рисунок 7 – Влияние числа Релея на средний теплообмен и тягу в каналах различной длины

Для использования закономерностей теплопереноса, полученных при ламинарном течении в каналах, все полученные данные можно представить в координатах $Nu_{av} \sim f(Re)$. Тем самым, течение, создаваемое подъемными силами, условно заменяется вынужденно-конвективным потоком в канале с известным расходом газа. Такое представление, несмотря на некоторую его условность, позволит более детально проанализировать механизм теплопереноса. Результаты численного эксперимента в такой обработке для всего диапазона изменения определяющих параметров изображены на Рисунке 8. По данным этого рисунка можно сделать несколько важных выводов.

Интенсивность средней теплоотдачи сильно зависит от длины канала. В коротких каналах она выше, чем у длинных за счет более тонких пограничных слоев. К тому же в протяженных прослойках возрастает длина участка, где достигается температурное равновесие между газом и стенкой.

Большинство расчетных кривых на Рисунке 8,а имеют два характерных участка: с меньшим углом наклона при малых числах Рейнольдса (малые Ra и AR) с большим углом в области высоких чисел Re (большие Ra и AR). Пунктирными линиями на этом рисунке нанесены корреляционные соотношения $Nu_{av} \sim Re^n$, где $n = 0,5$ и $0,8$, соответственно. Очевидно, что такое поведение расчетных данных нельзя трактовать как существование в рассматриваемых условиях двух режимов теплообмена – ламинарного и турбулентного. Тем не менее, отмеченные особенности изменения средней теплоотдачи могут быть использованы при создании новых моделей расчета процессов переноса в вертикальных каналах.

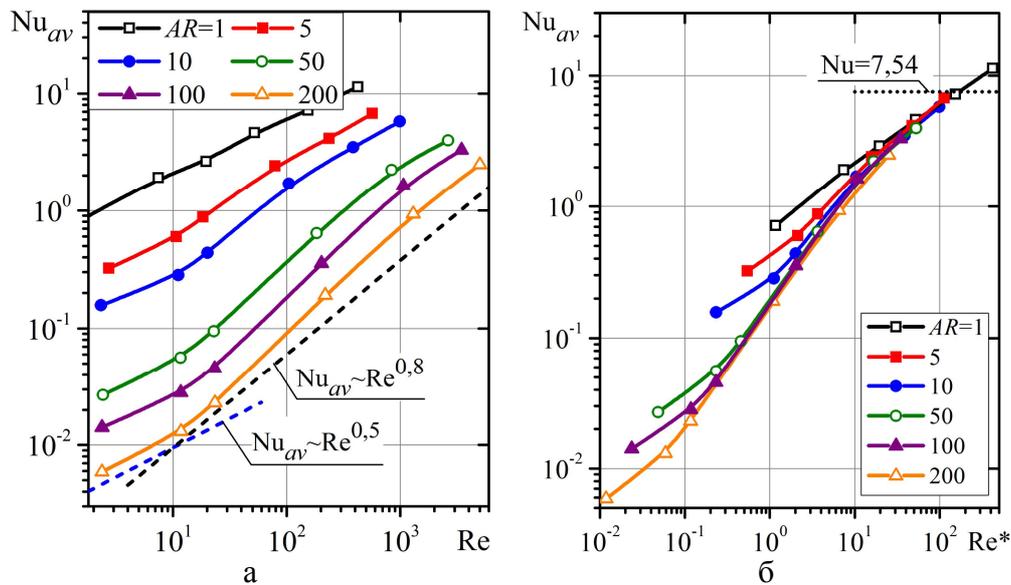


Рисунок 8 – Зависимость $Nu_{av} \sim f(Re)$ в вертикальных каналах в режиме свободной конвекции

Результаты обработки данных расчета в виде зависимости среднего числа Нуссельта от модифицированного числа Рейнольдса представлены на Рисунке 8,б. Отметим, что в таком представлении можно видеть тенденцию к обобщению данных. Однако полного совпадения результатов расчета здесь не наблюдается. Точно так же, как и на Рисунке 7,а, в области малых чисел Re^* происходит отклонение от общей зависимости с выходом на постоянное значение, соответствующее асимптотическому пределу при малых числах Рейля.

В главе 5 представлены результаты цикла численных исследований течения и теплообмена в канале с изотермическими стенками при наличии в них отрыва потока. Это очень важная в научном и техническом плане проблема в настоящее время изучена очень слабо.

Визуализация течения в канале с симметрично расположенными ребрами демонстрируется на Рисунке 9. На распределениях линий тока и скорости четко фиксируется зона отрыва потока, которая распространяется в рассматриваемом случае примерно на $1 \div 1,5$ калибра. Установлено, что давление всюду, за исключением области отрыва и присоединения потока постоянно по ширине канала. Важно отметить, что поле температур после входа в канал быстро принимает температуру стенки, поэтому любые изменения в гидродинамике течения не будут оказывать влияние на интенсивность теплопереноса.

Данные по аэродинамике течения в канале с ребром демонстрируются на Рисунке 10. Здесь рассмотрен случай установки ребер с максимальной для данных исследований высотой $l/w=0,4$. Согласно Рисунку 10,а, где показаны профили продольной скорости при слабой конвекции ($Ra=10^2$), профиль скорости является неизменным по всей длине канала, за исключением области, расположенной рядом с местом установки ребра $y/H \sim 0,5$. Здесь поток резко сужается и из-за сохранения расхода газа скорость возрастает. Если исключить эту область, то профили скорости аналогичны для случая потока в гладком канале, с

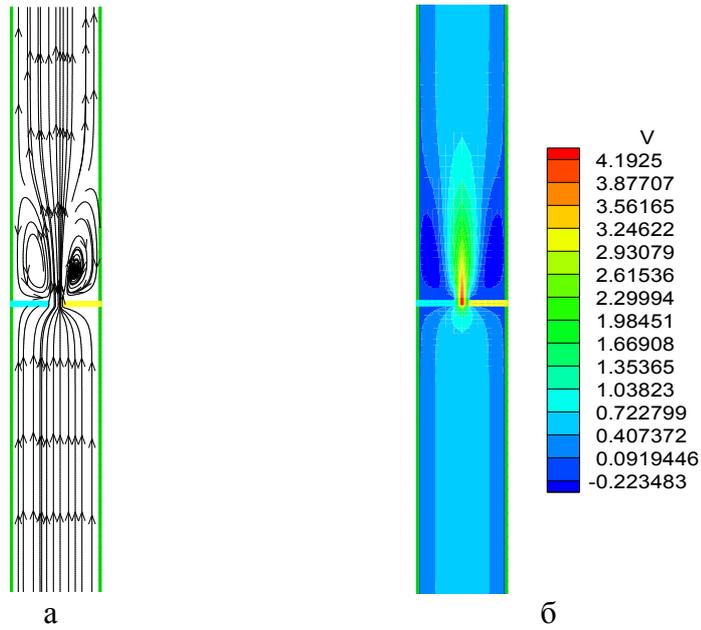


Рисунок 9 – Линии тока (а) и распределение продольной скорости (б) в канале с отрывом потока: $AR=10$, $Ra=10^3$, $l/w=0,4$

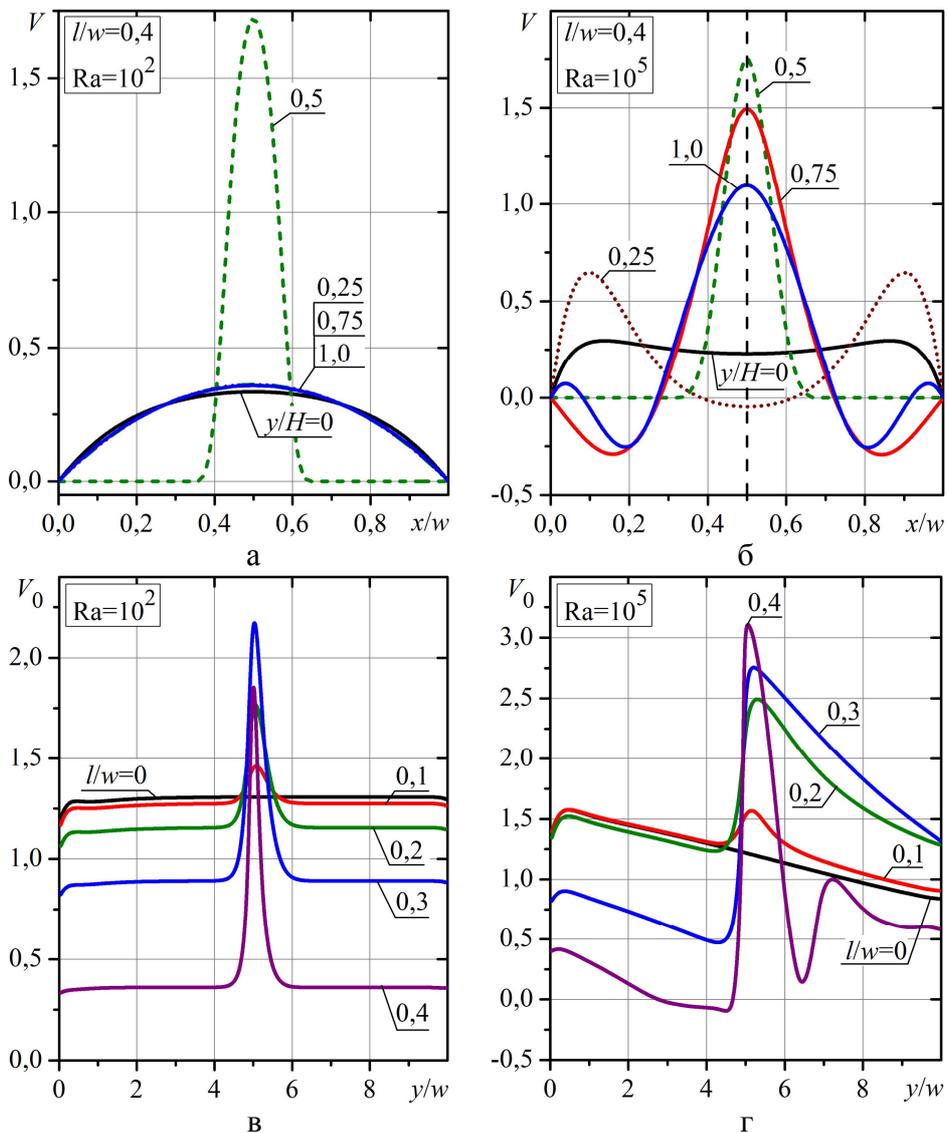


Рисунок 10 – Развитие течения в канале с симметричным расположением ребер

той лишь разницей, что абсолютное значение скорости в присутствии ребра значительно меньше, чем в его отсутствие. Это связано с увеличением сопротивления потоку из-за установки препятствий в канале.

Поток в канале с препятствием при высоком числе Рэлея ($Ra=10^5$, Рисунок 10,б) претерпевает сложную деформацию. В начальных сечениях, как и при отсутствии препятствий, профиль канала, близкий к «ударному» на входе, трансформируется в «седлообразный» профиль при $y/H \sim 0,25$, а затем, после поджатия потока и его отрыва позади ребра, минимум на оси изменяется на максимум. В области стенки, где отрыв потока сказывается на течении наиболее сильно, формируются интенсивные зоны обратного потока, поэтому здесь продольная скорость отрицательна.

Для анализа механизма явлений важно знание распределения параметров вдоль оси канала. Эти данные представлены на Рисунке 10,в и 10,г для продольной компоненты скорости. При $Ra=10^2$ (Рисунок 10,в) значение скорости остается неизменным, за исключением небольшой области, расположенной рядом с входом в канал, и непосредственно в месте установки ребра. При высоких числах Рэлея ($Ra=10^5$, Рисунок 10,г) стабилизации течения не наблюдается из-за сложного перераспределения потока газа, подобных профилю в пристенной струе. Наиболее сложная картина наблюдается для высокого ребра $l/w=0,4$, что обусловлено как сильным поджатием течения в узком поперечном сечении, так и увеличением эффекта отрыва потока.

Распределение числа Нуссельта по высоте канала при вариации масштаба ребра показано на Рисунке 11. Главной особенностью процесса теплообмена в диапазоне низких чисел Рэлея, согласно данным Рисунка 11,а, является отсутствие изменений местного числа Nu в месте установки ребра. Это объясняется тем, что в месте установки ребра температура стенки и газа близки между собой, поэтому локальное ускорение и отрыв потока не в состоянии оказывать влияние на теплоперенос. При этом установка ребер сильно влияет на общий уровень передачи теплоты, но оно связано только с ростом гидравлических потерь.

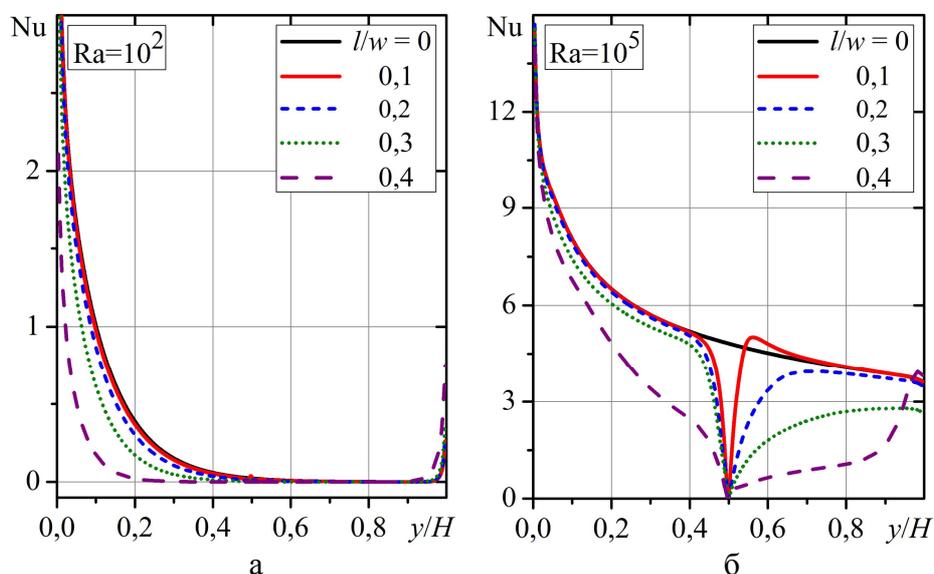


Рисунок 11 – Влияние высоты ребра на локальное число Нуссельта

При высоких числах Рэлея ($Ra = 10^5$), как следует из данных Рисунка 11,б, поведение локального числа Нуссельта принципиально отличается от случая с низким значением Ra . Без ребра число Nu уменьшается из-за роста толщины пограничного слоя. При наличии ребра интенсивность теплообмена уменьшается в области торможения перед ребрами. В точке соединения ребер с поверхностью в угловых зонах течение практически отсутствует, поэтому теплопередача здесь близка к нулю $Nu \rightarrow 0$. Обратный поток, который в виде вихря протекает вдоль стенки, образуется в зоне позади ребра. Однако типичного распределения теплоотдачи за точкой отрыва не наблюдается, и передача тепла не достигает уровня безотрывного потока.

Подобные эффекты имеют место и при установке ребра на одной стенке с той лишь разницей распределения теплообмена по высоте противоположных стенок отличаются между собой. На стенке с ребром в окрестности отрыва потока интенсивность теплоотдачи снижается, а на противоположной, наоборот, заметно подрастает из-за ускорения потока в месте его пережима.

Конвективная тяга и теплоотдача могут зависеть от места расположения препятствия от входа в канал. В работе проведено подробное исследование динамических и тепловых характеристик при различных расстояниях от преграды до входа в канал h/H . В качестве примера на Рисунке 12 демонстрируется изменение скорости на оси (а) и локальной теплоотдачи (б) по высоте канала для различных вариантов расположения ребра. Отметим главное: распределение скоростей и чисел Нуссельта принципиально отличаются от таковых для гладкого канала. Поведение кривых носит «пилообразный» характер с максимумом скорости и минимумом теплообмена в месте препятствия. Причем течение достаточно долго релаксирует до стабилизированного профиля и для большинства расстояний h/H такого режима течения не наблюдается вплоть до выхода из канала.

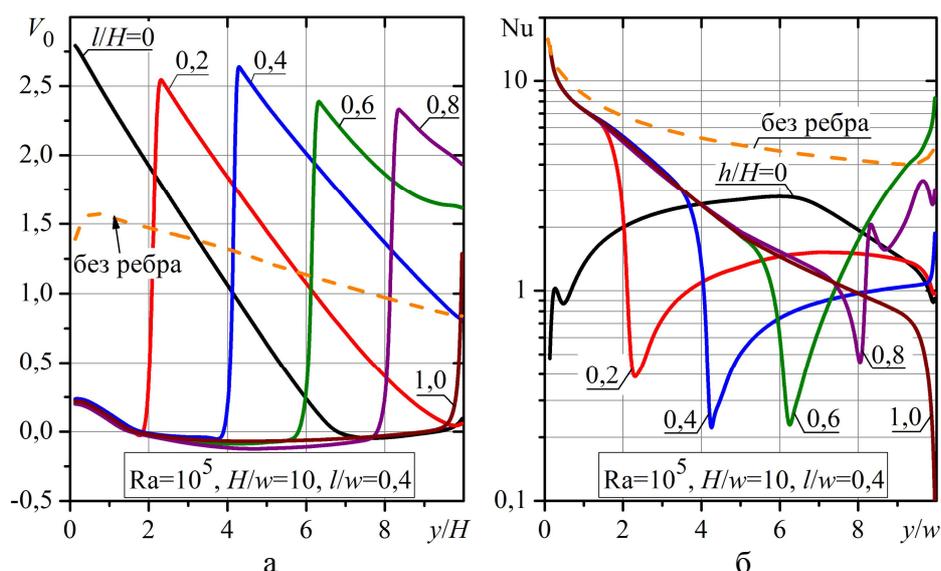


Рисунок 12 – Изменение скорости на оси и локальной теплоотдачи по длине канала при установке преград на различных расстояниях от входа

Интегральный теплообмен и конвективная тяга, как показали расчеты (Рисунок 13), максимальны при установке ребра посередине канала ($h / H \approx 0,5$) и минимальны на входе ($h / H \approx 0$).

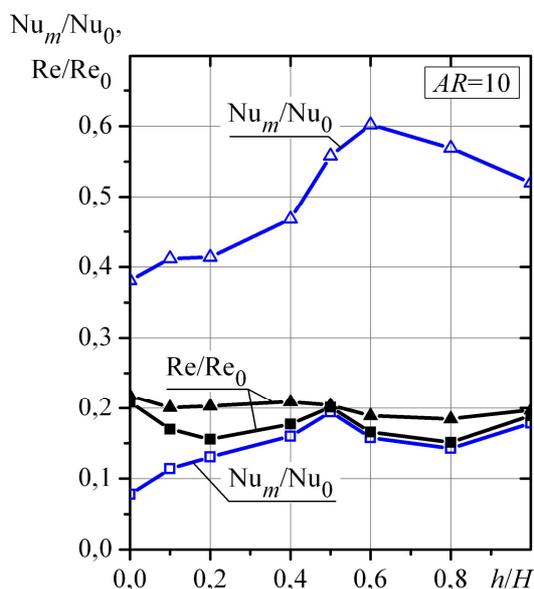


Рисунок 13 – Относительные величины теплообмена и конвективной тяги в каналах с оребрением. Квадраты – $Ra = 10^3$, треугольники – $Ra = 10^5$

Из приведенных выше данных следует отметить общий тренд поведения определяющих параметров (Рисунок 14). Теплопередача в канале становится ниже с увеличением высоты ребра. Это является логическим следствием того, что в этом случае преграда в канале сильно подавляет расход (Рисунок 14,б).

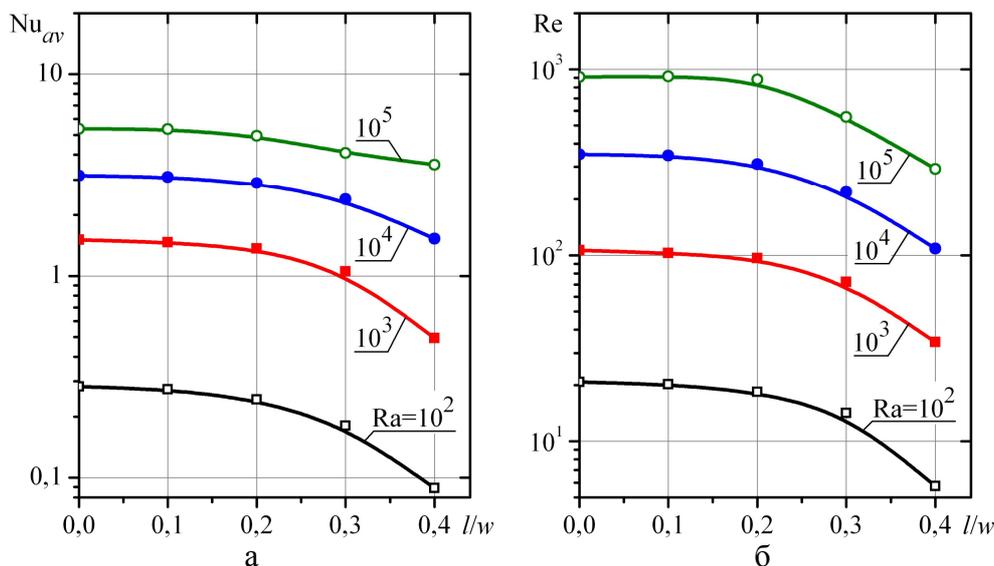


Рисунок 14 – Влияние высоты ребра на среднее значение Нуссельта (а) и число Рейнольдса (б) в канале

Следует также отметить, что число Рэлея оказывает более сильное влияние на интенсивность теплопередачи и скорость потока в канале, чем высота

ребра. Однако это влияние все равно значительно и оно ослабевает по мере усиления конвективного переноса (числа Рейлея).

Одним из эффективных методов обобщения является использования классического представления данных по теплоотдаче в зависимости от числа Рейнольдса. Результаты такой обработки можно видеть на Рисунке 15. Результаты систематических численных исследований для различных высот ребер и чисел Рейлея имеют тенденцию к обобщению. Эти данные имеют две характерные области, описываемые эмпирическими формулами:

линия 1
$$Nu_{av} = 0,015 Re ; \tag{12}$$

линия 2
$$Nu_{av} = 0,16 Re^{0,5} . \tag{13}$$

Эти формулы могут использоваться для инженерных оценок. Очевидно, что при вариации степени расширения AR , формы препятствия и их количества, а также при иных тепловых граничных условиях картина влияния препятствия на характеристики потока может значительно отличаться от представленного в данной работе. Влияние этих факторов должно быть изучено и установлено. Все это требует подробных и обширных исследований.

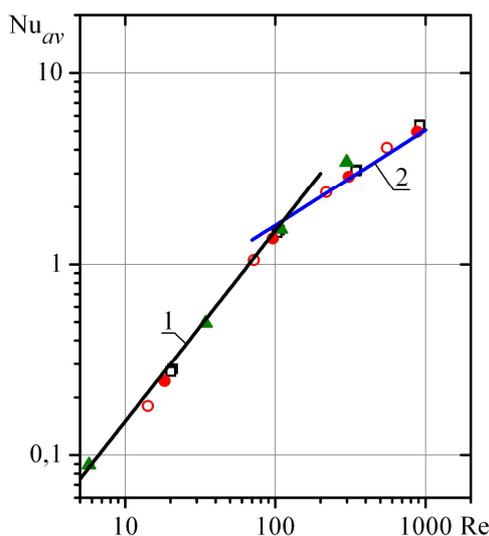


Рисунок 15 – Обобщение данных по среднему числу Нуссельта в вертикальном канале с ребрами различной высоты. Линия 1– формула (12), линия 2 – формула (13). Точки – результаты численных расчетов

В заключительной части работы изложена методика практического расчета характеристик течения и теплообмена при свободной конвекции в вертикальных каналах с адиабатическими и изотермическими стенками при наличии внутри них отрыва потока.

Основные выводы

1. Разработана физико-математическая модель ламинарного свободно – конвективного течения и теплообмена в слое между двумя бесконечно протяженными пластинами при наличии преград. Создан комплекс программ чис-

ленного 2-D моделирования и проведены систематический численный эксперимент для открытых прослоек с широким диапазоном их высот ($AR = H/w = 1 \div 500$), чисел Релея (модифицированное число $Ra^* = 10^{-2} \div 10^5$), высоты ребер ($l/w = 0 \div 0,8$) и места их расположения.

2. В канале с адиабатическими стенками впервые обнаружен режим инверсии ($Ra \approx 300 \div 400$), когда конвективная тяга не зависит от высоты канала. При меньшем значении числа Релея тяга возрастает при уменьшении высоты канала, а в области больших Ra , напротив, тяга больше у высоких каналов.

3. Изучена конвекция в адиабатических условиях при симметричной установке ребер на противоположных стенках. Главным эффектом воздействия ребра на конвективное течение в канале является сильное снижение тяги за счет роста гидравлических потерь, а также образования отрывной зоны за ребром.

4. При использовании изотермических стенок показано, что большую часть протяженных каналов может занимать зона с температурой газа близкой к температуре стенки, что приводит к существенному понижению среднего числа Нуссельта. Использование модифицированных значений чисел Релея и Рейнольдса позволяет обобщить численные данные для каналов различной длины и различного уровня термогравитационных сил. Исключение составляет область малых чисел Релея, причины которого требуют более детальных исследований.

5. Впервые показано, что при установке в канале преграды интегральный теплообмен и число Рейнольдса (конвективная тяга) значительно (до порядка величины) уменьшаются с увеличением высоты ребер. Эти процессы взаимосвязаны, и увеличение гидравлических потерь из-за поджатия и отрыва потока является наибольшим вкладом в механизм подавления свободной конвекции и тепломассопереноса.

6. В результате проведенных исследований получены корреляционные соотношения для интегральной теплопередачи при различных высотах преград и чисел Релея, которые могут составить основу для проведения инженерных расчетов при конструировании новых технологий охлаждения электронных устройств, вентиляционных систем, солнечных коллекторов и дымовых труб.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК

1. Terekhov V.I., Ekaid A.L., Yassin K.F. Laminar Free Convection Heat Transfer Between Vertical Isothermal Plates // J. of Eng. Thermophysics. –2016. – Vol. 25. – № 4. – PP. 509–519.

2. Terekhov V.I., Ekaid A.L., Yassin K.F. Laminar free convection heat transfer and separated flow structure in a vertical channel with isothermal walls and two adia-

batic opposing fins // J. Eng. Thermophysics. – 2017. – Vol. 26. – № 3. – PP. 339–352.

3. Терехов, В.И. Теплообмен при ламинарной свободной конвекции и отрывном течении за ребром в вертикальном канале с изотермическими стенками / В.И. Терехов, А.Л. Экаид, **Х.Ф. Ясин** // Теплофизика и Аэромеханика. – 2017. – №4. – С. 593-597.

4. Terekhov V.I., Ekaid A.L., **Yassin K.F.** The effect of aspect ratio on the laminar free convection inside a vertical channel heated isothermally // IFOST-2016: Appl. Eng. –2017. – 978-1-5090-0855-1/16/ 2017. – IEEE. – PP. 619-624.

Материалы международных и всероссийских конференций

1. Terekhov V.I., Ekaid A.L., **Yassin K.F.** The effect of rib width on the laminar natural convection between vertical parallel plates // ISHM-IV. – 2016. – PP. 49.

2. Terekhov V.I., Ekaid A.L., **Yassin K.F.** Laminar natural convection between two vertical parallel isothermal plates with different aspect ratios // IX International conference on computational heat and mass transfer ICCHMT 2016, Cracow, Poland, 23-26 May 2016. – p. 31.

3. Terekhov V.I., Ekaid A.L., **Yassin K.F.** The effect of rib width on the laminar natural convection between two vertical parallel isothermal plates heated symmetrically // Proceedings of CHT-17 –Ichmt Digital Library Online. Begell House Inc. – 2017. - DOI: 10.1615/ICHMT.2017.CHT-7.1070 . - pp. 1005- 1020.

4. Терехов, В.И. Ламинарная свободная конвекция между изотермическими вертикальными пластинами при вариации их высоты и числа Релея / В.И. Терехов, А.Л. Экаид, **К.Ф. Ясин** // XV Минский международный форум по теплообмену. – 2016. – С. 217-220.

5. Terekhov V.I., Ekaid A.L., **Yassin K.F.** The effect of aspect ratio on the laminar free convection inside a vertical channel heated isothermally // IFOST proceedings 11th International forum on strategic technology. –2016. – PP. 619-624.

6. Терехов, В.И. Отрывное свободно- конвективное течение и теплообмен между вертикальными пластинами при наличии ребер на стенке / В.И. Терехов, **К.Ф. Ясин** // IX всероссийская конференция «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики». –2016. – С. 428-430.

7. Terekhov V.I., Ekaid A.L., **Yassin K.F.** Laminar free convection flow and heat transfer between vertical plates in the presence of ribs on the walls // ISHM-V. – 2016. –PP. 93.

8. Terekhov V.I., Ekaid A.L., **Yassin K.F.** The effect of rib width on the laminar natural convection between two vertical parallel isothermal plates heated symmetrically // Proceedings of CHT-17-127, ICCHMT International Symposium on Advances in Computational Heat Transfer. – 2017.

9. **Ясин, Х.Ф.** Отрыв потока за ребром при ламинарной свободной конвекции в вертикальном канале с изотермическими стенками / **Х.Ф. Ясин**, А.Л. Экаид, В.И. Терехов // Всероссийская конференция «XXXIII Сибирский теплофизический семинар». – 2017. – С. 92.

10. Terekhov V.I., Ekaid A.L., **Yassin K.F.** Laminar flow between two vertical parallel adiabatic plates // ISHM-VI. – 2017. – P. 84.

11. Терехов, В.И. Структура отрывного течения и теплообмен в вертикальном плоском канале за ребром в режиме ламинарной свободной конвекции / В.И. Терехов, **Х.Ф. Яссин** // Международная конференция «Современные проблемы теплофизики и энергетики» 9-11 октября 2017 г, НИУ «МЭИ», М.:, Россия.

12. Terekhov V.I., Ekaid A.L., **Yassin K.F.** Laminar free convection between two vertical parallel plates with different rib lengths and positions// Proc.16th Int. Heat Transfer Conf., ИНТС-16, August 10-15, 2018, Beijing, China.

Подписано к печати 04.12.2018 г. Заказ № 28.
Формат 60x84x1/16. Объем 1,5 п.л., тираж 100 экз.

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20