

О Т З Ы В

официального оппонента д.ф.-м.н. Демина Виталия Анатольевича на диссертацию Ни Александра Эдуардовича **«Ламинарные и турбулентные режимы термогравитационной конвекции в замкнутых областях с локальными источниками радиационного нагрева»** на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности **01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы**

Диссертационная работа Ни Александра Эдуардовича посвящена прямому численному моделированию ламинарных и турбулентных режимов тепловой конвекции с учетом радиационного теплообмена между источником энергии и границами полости.

Изучение подобных систем представляется актуальным и весьма перспективным в связи с внедрением современных технологий сушки композиционных материалов, разработкой методов управления динамикой гелей, реология которых весьма чувствительна к инфракрасному излучению, применением новых эффективных методов отопления помещений за счет радиационного нагрева.

В частности, любопытным является факт, согласно которому даже в случае абсолютно диатермической среды для среднестатистических поглощающих свойств границ полости эффективность обогрева с помощью инфракрасных излучателей в разы выше, чем у классических систем отопления. Важно отметить, что недостаточно широкое использование подобных систем отопления в настоящее время связано не только со слабым исследованием этого вопроса в плане влияния инфракрасного излучения в соответствующем спектре частот на человеческий организм, но и недостаточностью проработки инженерных решений по теплофизическому отклику нагреваемого пространства, включая конвективно-кондуктивный теплоперенос в рабочей жидкости и стенках полости.

Укажем, что численная реализация задачи кондуктивно-конвективного теплопереноса в условиях радиационного нагрева весьма сложна и обусловлена большой трудоемкостью совместного решения нестационарных уравнений Навье-Стокса, переноса тепла и излучения. Прежде всего, эта сложность обусловлена необходимостью проведения внутренних итерационных процедур на каждом шаге по времени для определения распределения лучистой энергии в расчетном объеме. Все это делает диссертационное исследование Ни Александра Эдуардовича **«Ламинарные и турбулентные режимы термогравитационной конвекции в замкнутых областях с локальными источниками радиационного нагрева»** весьма актуальным, говорит о его перспективности и новизне.

Диссертация начинается с введения, в котором дается краткая характеристика работы, описывается ее структура, формулируются цели исследования, отмечается теоретическая и

практическая значимость полученных результатов. Указывается, что диссертационная работа состоит из трех глав, включая обзор литературы, и заключения. Объем диссертации довольно большой и составляет 208 страниц. В работе имеется 2 таблицы и 111 рисунков. Список литературы содержит 160 наименований.

Далее в **первой главе** проведен обзор современного состояния исследований в области сопряженного конвективного тепло- и массопереноса в системах с локальными источниками тепла. Проанализированы работы как отечественных, так и зарубежных ученых. Наибольшее внимание в обзоре (не по количеству процитированных ссылок, а содержательно) уделено различным способам расчета радиационного теплообмена и численному моделированию влияния источников теплового излучения на течения в замкнутых полостях, что вполне обосновано, т.к. именно в учете этого фактора заключается главная сложность и новизна диссертационного исследования автора.

По литературному обзору, представляющему собой первую главу диссертации, имеется следующее замечание, которое скорее представляет собой характер некоторого комментария. А именно, на стр. 5 утверждается, что *«результаты проводимых физических экспериментов ограничиваются измерениями температур или тепловых потоков в нескольких произвольных точках (от 7 до 18 [16]) объема, что не отражает полную картину исследуемого процесса»*.

Несмотря на то, что здесь имеется в виду количество термопар в конкретной работе [16], представляется, что это предложение, отражающее определенную точку зрения, довольно узко отражает использование термопар в теплофизических экспериментах. На самом деле, в конвективных опытах часто бывает так, что используется всего одна или две термопары и этого оказывается достаточно! Все зависит от целей, которые преследует экспериментатор. В то же время бывают ситуации, когда в современных сложных теплофизических устройствах для аккуратного промера температуры вдоль длинных неоднородно нагретых полостей с прокачиваемой жидкостью используется не «18», а на порядок больше термопар. При этом считывание сигнала происходит в полностью автоматическом режиме, и его обработка осуществляется компьютером. Особенно этот контроль важен для крупных промышленных агрегатов и установок.

Правда здесь необходимо оговориться, что, конечно, современные достижения теплофизических систем измерений и контроля совершенно не умаляют необходимости проведения при определенных условиях полноценного численного моделирования.

Во **второй главе** описывается вычислительная модель процесса кондуктивно-конвективно-радиационного теплопереноса в замкнутой области с локальными источниками лучистого нагрева. Особое внимание уделяется описанию техники расчета обмена энергией теплового излучения между твердыми границами полости. Проводится краткое описание алгоритма и

аппроксимационных схем используемого численного метода. Выполнено тщательное тестирование вычислительного кода на известных задачах тепловой конвекции в замкнутых областях, в том числе с учетом радиационного теплообмена.

По материалу второй главы у оппонента возникло замечание, касающееся терминологии используемой диссертантом:

С точки зрения оппонента, как в автореферате, так и тексте диссертации автором время от времени не очень строго используется терминология, которая может ввести читателя в заблуждение. А именно, когда автор пишет о преобразовании уравнений Навье-Стокса в термины функции тока и завихренности, то часто эта процедура описывается как запись уравнений в терминах «вектор завихренности – функция тока – температура» (см., например, автореферат, стр. 6 или заголовок для п. 2.6 в диссертации). Но когда в литературе по вычислительной гидродинамике упоминается вектор завихренности, то это сразу подразумевает трехмерность расчета, в то время как в диссертации расчеты всегда двумерны.

В то же время, если проводятся трехмерные расчеты, то вычислительная схема будет называться «вектор завихренности – векторный потенциал – температура».

Здесь же оппонент хотел бы обратить внимание на опечатку на стр. 38 диссертации в определении функции тока. Не может быть такого, чтобы x - и y -компоненты скорости, выражались через перекрестные производные от функции тока с одним знаком. Где-то потерялся знак минус.

В третьей (основной) главе представлены результаты двумерного численного исследования взаимодействия процессов кондукции, тепловой конвекции и поверхностного излучения в замкнутых областях с локальными источниками радиационного нагрева. Исследован кондуктивно-конвективный теплоперенос в условиях распределения лучистой энергии по закону Ламберта. Рассмотрена кондукция, конвекция и излучение в замкнутой полости с разной толщиной стенок в случае как изотермического, так и неизотермического источников радиационного нагрева.

Установлено, что степень черноты стенок сильно влияет на тепловой и гидродинамический режимы объектов лучистого нагрева. Изменение этого параметра в пределах $0.2 < \varepsilon < 0.8$ приводит не только к росту температуры во всей расчетной области, но и к перестройке изначально четырехвихревого течения к двухвихревому режиму.

Проанализировано влияние теплоотвода в стенки на локальные и средние характеристики течения и теплообмена. В ходе расчетов варьировалось расположение источника радиационного нагрева, что позволило провести сравнительный анализ тепловых режимов в рассматриваемых областях с системами обогрева помещений типа «теплый пол».

Проведено численное моделирование турбулентной тепловой конвекции в прямоугольных полостях с разным соотношением сторон при нагреве инфракрасным излучателем.

Третья глава является основной по защищаемым результатам. По этой причине большинство вопросов, сформировавшихся у оппонента при прочтении диссертации, вполне закономерно касаются именно этой главы:

Вывод №1 по третьей главе (на стр. 186) представляется оппоненту несколько тривиальным.

Это положение дословно выглядит так:

«По результатам проведенных численных исследований теплопереноса установлено, что в областях с локальными источниками радиационного нагрева формируются существенно неоднородные поля температур».

Во-первых, в приведенном выше утверждении никак не отражается специфика (другими словами новизна) полученных диссертантом результатов.

Во-вторых, очевидно, что с «существенно неоднородными температурными полями» можно столкнуться в самых разных задачах теплообмена. И легко привести множество примеров, когда эти неоднородности будут гораздо более ярко выражены, нежели в рассмотренной задаче. Плюс «существенная неоднородность» температурного поля по идее должна подразумевать какие-то пограничные слои или распространение ярко выраженного температурного фронта, чего на самом деле нет. Вот если бы в качестве источника излучения выступал импульсный лазер, направленно переносающий лучистую энергию, тогда действительно температурные неоднородности могли бы быть существенными, и это было бы главной чертой рассматриваемых явлений. Иными словами в выдвигаемом положении отсутствует всякая конкретика, необходимая при формулировке основных выводов.

Второе замечание. В качестве одной из сформулированных целей диссертационного исследования фигурирует следующий тезис (стр. 8, задача б):

«Анализ воздействия турбулизации газового потока на локальные и средние характеристики сопряженного теплообмена в замкнутых прямоугольных областях, нагреваемых инфракрасными излучателями».

Однако думается, что реально в представленной диссертации анализ процесса турбулизации течения не являлся центральным предметом исследования, а именно, физика переходных режимов от ламинарных течений к турбулентным не изучалась. Даже техника исследования у автора никак не соотносится с методами теории гидродинамической устойчивости. А эти методы требуется применять при исследовании ламинарно-турбулентных переходов. На основе полных уравнений Навье-Стокса были рассмотрены первые несколько типов надкритических движений для малых и умеренных значений числа Рэлея. А далее уже при достаточно больших значениях числа Рэлея фрагментарно на кардинально более мелких сетках было проведено прямое численное моделирование визуально более сложных конвективных режимов, которые, по

мнению оппонента, все же далеки от настоящей картины турбулентности. Хотя изотермы и выглядят более сложно, по сравнению с тем, что были при малых и умеренных значениях числа Рэлея, тем не менее, оппонент не увидел в этих режимах особенностей, характерных для турбулентности. Так, отсутствуют какие либо нестационарные когерентные структуры или нерегулярные волновые режимы, типичные для ламинарно-турбулентного перехода, не приведен спектр пульсаций температуры, завихренности и функции тока и т.д. Сшивка результатов расчетов для разных сеток не производилась. Плавное продвижение по числу Рэлея позволяющее полноценно описать ламинарно-турбулентный переход и последовательность бифуркаций с помощью метода прямого численного моделирования тоже отсутствует. Предполагаю, что ламинарно-турбулентный переход и не являлся по-настоящему предметом данного исследования. Это сложная проблема, которую уж точно не решишь в рамках одной кандидатской диссертации.

Несмотря на достаточно большой объем, диссертация легко читается, что свидетельствует о тщательной работе автора над текстом. Представление в тексте формул, иллюстрирующих численные процедуры, и обсуждение решаемых уравнений дано в полном объеме. При чтении диссертации оппоненту встретилось лишь несколько опечаток.

Например, одна из них на стр. 89 в предложении

«Однако с ростом подъемной силы ядро конвективных ячеек смешается от верхней горизонтальной границы раздела «газ-стенка» к нижней ...»

Здесь, по-видимому, имеется в виду

«Однако с ростом подъемной силы ядро конвективных ячеек смещается от верхней горизонтальной границы раздела «газ-стенка» к нижней ...»

На стр. 97 в предложении имеет место неверное склонение в прилагательном

«Очевидно, это обусловлено максимальным температурным градиентом между стенкой и приповерхностным слоем воздуха в начальный момент времени».

Должно быть

«Очевидно, это обусловлено максимальным температурным градиентом между стенкой и приповерхностным слоем воздуха в начальный момент времени».

Единственное замечание по оформлению касается автореферата. В нем рисунки напечатаны чрезвычайно мелко. Стоит признаться, что некоторые численные значения на изолиниях оппонент так и не смог прочесть даже с помощью увеличительного стекла. Этот недостаток оформления автореферата полностью компенсируется при чтении самой диссертации. Рисунки в диссертации оформлены просто замечательно. В них присутствует достаточная полнота в плане подачи информации, прекрасно подобраны по размерам шрифты и сами рисунки всегда находятся в нужном месте, органично сочетаясь с текстом.

Сделанные выше замечания абсолютно не влияют на общее положительное заключение по диссертационной работе. Полагаю, что работа является оригинальным законченным научным исследованием, в котором наиболее важным результатом с точки зрения оппонента является разработка и реализация оригинальной численной методики расчетов тепло- и массопереноса в замкнутых полостях с локальными радиационными источниками тепла. Получен авторский вычислительный код, легко поддающийся модернизации и модификации в зависимости от поставленной задачи, протестированный и позволяющий получать новые физические результаты. Научная новизна диссертационного исследования Ни Александра Эдуардовича заключается в том, что им впервые было проведено прямое численное моделирование процессов тепловой конвекции в рабочем пространстве полости, кондуктивного теплопереноса в стенках и радиационного нагрева в условиях ламинарного и турбулентного режимов течения при варьировании расположения теплового источника.

Результаты этого исследования могут представлять прямой интерес для инженерных работников, занимающихся проектированием новых эффективных систем отопления помещений. В частности, огромную важность представляет собой разработанная методика расчета ламинарных режимов тепловой конвекции и сопутствующего радиационного теплообмена в замкнутых областях с учетом теплоотдачи во внешнюю среду, которая может быть применена к описанию сильно нестационарных течений близких к турбулентным.

Материал диссертационной работы подробно изложен в 15 статьях, опубликованных в ведущих рецензируемых журналах, из которых 13 проиндексированы в базах данных Web of Science и Scopus, что является очень высоким показателем для соискателя ученой степени кандидата наук. В указанных работах достаточно полно отражены все основные результаты диссертации. Помимо этого соискателем получено 4 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Диссертационная работа **Ни Александра Эдуардовича** по своей актуальности и новизне результатов, объему выполненного теоретического исследования, научной и практической значимости полученных результатов вносит значительный вклад в развитие представлений о совместном действии конвективного, кондуктивного и радиационного теплопереноса в условиях лучистого нагрева в диатермических газообразных средах.

Считаю, что диссертационная работа Ни Александра Эдуардовича **«Ламинарные и турбулентные режимы термогравитационной конвекции в замкнутых областях с локальными источниками радиационного нагрева»** отвечает всем требованиям, предъявляемым ВАК к кандидатским

диссертациям (в том числе соответствует второй части пункта 9 «Положения о присуждении ученых степеней»), а ее автор заслуживает присвоения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности **01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы**.

заведующий кафедрой теоретической физики
Пермского государственного национального
исследовательского университета, д.ф.-м.н.,
доцент



Демин Виталий Анатольевич

26.09.2018

Пермский государственный национальный исследовательский университет
614990, РФ, г. Пермь, ул. Букирева, 15, кафедра теоретической физики.
Рабочий тел. 8 (342) 2396227, e-mail: demin@psu.ru
info@psu.ru, http://www.psu.ru

Я, Демин Виталий Анатольевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Ни Александра Эдуардовича «Ламинарные и турбулентные режимы термогравитационной конвекции в замкнутых областях с локальными источниками радиационного нагрева», и их дальнейшую обработку.

