



УТВЕРЖДАЮ
Директор
Института теплофизики СО РАН,
член-корр. РАН

 Маркович Д.М. /

”29” мая 2018 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию
Полудницина Анатолия Николаевича

НАДКРИТИЧЕСКИЕ КОНВЕКТИВНЫЕ ТЕЧЕНИЯ ВОЗДУХА В НАКЛОНЯЕМОЙ ЗАМКНУТОЙ ПОЛОСТИ

по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы
на соискание учёной степени кандидата физико-математических
наук.

В диссертационной работе представлено экспериментальное и численное исследование термогравитационной конвекции в наклоняемой кубической полости с акцентом на изучение переходов от нормального режима течения к аномальному, которое характеризуется противоположным направлением течения. Аномальные режимы течения, как показал автор, устойчивы и реализуются в практически важном диапазоне параметров задачи. Соответственно, это существенно сказывается на процессах теплообмена в замкнутой полости. Поэтому рассмотрение этой задачи имеет отношение и к практическим приложениям, поскольку естественную конвекцию важно учитывать при проектировании и эксплуатации жилых и производственных помещений, корпусов электронных и технических устройств, шахтных выработок, салонов и контейнеров транспортных средств.

В этой связи исследование экспериментальное и численное исследование термогравитационной конвекции в наклоняемой кубической полости является **актуальным**. Экспериментальные исследования ограничиваются рассмотрением термогравитационного течения воздуха в наклоняемом кубе, подогреваемом снизу и хорошо проводящими тепло боковыми стенками. В численных расчетах боковые стенки были идеально теплопроводными или теплоизолированными.

Во введении обоснована актуальность рассмотренной задачи, сформулированы цели исследования, приведены результаты, выносимые на защиту, указана их научная новизна и практическая значимость.

В первой главе диссертационной работы рассмотрено современное состояние исследований ламинарной термогравитационной конвекции в наклоняемых замкнутых прямоугольных полостях и цилиндрах. Приведенный обзор литературы показал, что основное внимание при исследовании конвекции в подогреваемом снизу цилиндре квадратного сечения уделялось наклоняемому квадратному цилиндру с теплоизолированными боковыми стенками, аномальное течение в наклоняемом квадратном цилиндре с идеально теплопроводными стенками до работ автора практически не исследовалось. Влияние наклона куба изучено, в основном теоретически путем численного расчета надкритических течений и анализа их устойчивости. Обнаружено, что даже небольшой наклон от положения подогрева строго снизу приводит к появлению конвективного течения при очень малых значениях числа Релея. Влияние наклона куба с теплопроводными стенками на ламинарное валовое конвективное течение экспериментально исследовано недостаточно, не исследованы характеристики переходов от аномального течения к нормальному течению, как в численных расчетах в наклоняемом квадратном цилиндре, так и экспериментально для кубической полости.

Во второй главе приведены результаты экспериментального исследования перехода от нормального режима термогравитационной конвекции воздуха в наклоняемой, подогреваемой снизу кубической полости с теплопроводными боковыми гранями, к аномальному режиму конвекции и наоборот при изменении угла наклона кубической полости. Результаты исследования приведены в виде диа-

грамм, которые построены на основе данных измерений температуры четырьмя термопарами, расположенных в заданных точках кубической полости. в средней (по отношению к граням, к которым прижаты теплообменники) плоскости куба. На диаграммах представлены зависимости перепада температур между выбранными точками от угла наклона полости при различных интенсивностях надкритического подогрева. Изучено влияние величины подогрева на критический угол наклона, ограничивающий существование аномального конвективного течения. Обнаружен и изучен гистерезис при переходе между аномальными и нормальными режимами конвекции. Аномальное течение возникает в результате эволюции нормального течения при переходе угла наклона через нулевое значение. Переход от аномального течения к нормальному течению всегда происходит скачком при достижении критического значения углом наклона полости. Критический угол возрастает с увеличением надкритичности, достигает максимума и далее начинает уменьшаться. Исследованы стационарные и нестационарные типы переходов между аномальными и нормальными режимами конвекции, сопровождающиеся автоколебательными процессами. Экспериментально определена область существования аномальных режимов течения в зависимости от критического угла наклона кубической полости и надкритичности, определяемой отношением числа Рэлея к критическому числу Рэлея возникновения термогравитационной конвекции для ненаклоненного куба. Время установления перехода от аномального режима термогравитационной конвекции к нормальному режиму течения уменьшается с увеличением надкритичности. Автор проводил измерения, меняя угол наклона куба от -30° до 30° и обратно. **Интересно отметить**, что результаты измерения оказались несимметричными при поворотах в одну и другую стороны. Особенно это заметно при нестационарных переходах. Это свидетельствует о возможной неединственности переходов между режимами, связанной с формированием термогидродинамических структур разного вида. Представляет интерес более детально исследовать этот вопрос, поскольку это может дать более глубокое понимание физических механизмов формирования аномального режима течения.

Третья глава посвящена численному исследованию термогравитационной конвекции в наклоняемом цилиндре квадратного сечения в приближении Буссинеска. Расчеты проводились для плоской задачи стандартными конечно-разностными методами. Цель численного исследования – определение границ существования аномального конвективного течения в наклоняемом цилиндре квадратного сечения, изучение возникающих паттернов термогидродинамических структур и формирование гистерезиса. Впервые исследован переход к аномальному режиму термогравитационной конвекции для случая теплопроводных стенок. Установлено, что предельный угол существования аномального течения в случае теплоизолированных стенок примерно в три раза превышает предельный угол для теплопроводных стенок. Естественно, что в плоской постановке задачи и строго выполненной симметрии при численных расчетах асимметрия перехода от нормального режима течения к аномальному не проявляется. Из расчетов следует, что изменение направления вращения происходит в результате интенсивного роста одного из диагональных вихрей, соответствующих нормальному режиму течения, который подавляет и вытесняет аномальное конвективное движение.

В **Заключении** приводятся выводы диссертационной работы.

Резюмируя, можно сказать, что в диссертационной работе получен ряд новых результатов по исследованию термогравитационной конвекции в кубической полости. К ним относятся экспериментальные и исследования стационарных и нестационарных переходов к аномальной конвекции в кубе со стенками, хорошо проводящими тепло, определение области существования аномальной термогравитационной конвекции, детальное исследование гистерезиса перехода между режимами конвекции.

К сожалению, работа не свободна от недостатков:

- На с.49 в тексте перепутаны рис. 2.5a и 2.5b, вместо рис. 2.5c, 2.5d, 2.5e и 2.5f указаны несуществующие 3.5c, 3.5d, 3.5e и 3.5f. Следует сказать, что формы, указанные на рис. 2.5c, 2.5d, 2.5e и 2.5f соответствуют скорее результатам численных расчетов, а не эксперименту.

Если проанализировать эксперимент, то получается совсем другая несимметричная картина.

- Неудачен термин бифуркационные диаграммы. На этих диаграммах не показана бифуркация, нет точки ветвления. Это кривые перехода от одного режима течения к другому. Так и следовало бы их назвать.
- На с. 56 приведено неудачное выражение «вектор направления циркуляции». Циркуляция вектора скорости по определению скаляр, поэтому меняется ее знак.

Сделанные замечания не снижают ценности работы и не меняют общей положительной оценки работы. В целом работа выполнена на высоком профессиональном уровне, хорошо оформлена. В ней представлены интересные результаты по экспериментальному и численному исследованию переходов от нормального режима течения к аномальному при термогравитационной конвекции в наклоняемой кубической полости.

Результаты, выносимые на защиту, являются **новыми**. **Достоверность** результатов обоснована применением хорошо апробированных экспериментальных и теоретических методов исследования, согласием с известными результатами других авторов. **Научная и практическая ценность** результатов обусловлена важностью полученных научных результатов для понимания физических механизмов особых режимов термогравитационной конвекции, которые могут реализовываться на практике и в технологических процессах, таких как проектировании и эксплуатации жилых и производственных помещений, корпусов электронных и технических устройств, шахтных выработок, салонов и контейнеров транспортных средств.

Результаты и выводы диссертационной работы могут быть использованы в Институте гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Институте проблем механики РАН, НИИ механики МГУ, Институте теплофизики УрО РАН.

Работа прошла апробацию на всероссийских и международных конференциях, а ее результаты опубликованы в трудах научных конференций и журналах, в том числе рекомендованных ВАК.

Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Диссертация Полудницина Анатолия Николаевича «Надкритические конвективные течения воздуха в наклоняемой замкнутой полости», представленная на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы, является законченной научной работой, в которой получены новые существенные результаты по исследованию термогравитационной конвекции в замкнутых объемах.

По своей актуальности, научной новизне, объёму полученных исследований и практической значимости полученных результатов представленная работа соответствует требованиям положения «О порядке присуждения учёных степеней» от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, а её автор Полудницин Анатолий Николаевич достоин присуждения искомой учёной степени по специальности по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы

Зав. лабораторией моделирования
Института теплофизики СО РАН
профессор, д.ф.-м.н.



Н.И. Яворский

Ученый секретарь
Института теплофизики СО РАН
к.ф.-м.н.



М.С. Макаров