

03

## Турбулентный конвективный теплообмен в наклонной трубе, заполненной натрием

© А.Ю. Васильев,<sup>1</sup> И.В. Колесниченко,<sup>1</sup> А.Д. Мамыкин,<sup>1</sup> П.Г. Фрик,<sup>1</sup> Р.И. Халилов,<sup>1</sup>  
С.А. Рогожкин,<sup>2</sup> В.В. Пахолков<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт механики сплошных сред УрО РАН,  
614013 Пермь, Россия

<sup>2</sup> Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова,  
603074 Нижний Новгород, Россия  
e-mail: frick@icmm.ru

(Поступило в Редакцию 29 декабря 2014 г.)

Экспериментально исследована турбулентная свободная конвекция жидкого натрия в прямой теплоизолированной трубе, длина которой равна 20 диаметрам, с торцевыми теплообменниками, обеспечивающими фиксированный перепад температуры. Эксперименты выполнены для фиксированного числа Рэлея  $Ra = 2.4 \cdot 10^6$  и различных углов наклона трубы к вертикали. Выявлена сильная зависимость мощности, передаваемой вдоль трубы, от угла наклона: число Нуссельта в исследованном диапазоне углов наклона изменяется на порядок с максимумом в области наклона  $65^\circ$  от вертикали. Представленные характеристики крупномасштабной циркуляции и турбулентных пульсаций температуры показывают, что конвективный теплоперенос определяется в основном скоростью крупномасштабной циркуляции натрия. Турбулентные пульсации максимальны при небольших углах наклона ( $\alpha = 20\text{--}30^\circ$ ) и ослабляют поток тепла вдоль канала, хотя в пределе малых углов (вертикальная труба) устойчивой крупномасштабной циркуляции нет и конвективный теплопоток, на порядок превышающий молекулярный, обеспечивается только мелкомасштабным (турбулентным) течением.

### Введение

Интерес к тепломассопереносу в жидких металлах вызван их применением в качестве теплоносителей в ядерных [1,2], термоядерных [3,4] и космических энергетических установках [5]. Натрий используется в качестве теплоносителя в реакторных установках (РУ) с реактором на быстрых нейтронах (БН).

По опыту эксплуатации отечественных РУ БН-350 и БН-600 известно [6], что при благоприятной компоновке трубопроводов в них может возникать свободная конвекция натрия, приводящая к прогреву трубопроводов и увеличению тепловых потерь. В этой связи чрезвычайно востребованными становятся результаты экспериментальных исследований свободной конвекции натрия в длинных замкнутых цилиндрических сосудах, ориентированных под различными углами к направлению силы тяжести. Результаты таких исследований могут быть использованы как при проектировании новых РУ, так и при верификации расчетных кодов, используемых в атомной энергетике [7,8].

Переносу тепла при турбулентной конвекции в замкнутых полостях посвящено огромное число работ. В обзоре [9] проведен подробный анализ результатов исследования конвекции Рэлея–Бенара в вертикальном цилиндре, высота которого равна диаметру, и показано, что даже для этой простой и наиболее изученной геометрии на плоскости параметров число Рэлея–число Прандтля можно выделить до десятка областей, отличающихся характером тепломассопереноса в пограничных слоях и ядре и приводящих в результате к различным

зависимостям числа Нуссельта (являющегося мерой интенсивности конвективного теплопереноса) от чисел Рэлея и Прандтля. Для длинных каналов наблюдается сильная зависимость интенсивности теплопереноса вдоль канала от угла наклона (например, для длинных трубок с жидким гелием  $Pr \sim 0.7$  [10] или термосифонов с водой  $Pr \sim 7$  [11]). Случай малых чисел Прандтля (жидкие металлы, для которых  $Pr \sim 0.01$  и менее) остается наименее изученным даже для коротких цилиндров, а работ по свободной конвекции в длинных цилиндрах авторам обнаружить не удалось. Недавно, в ИМСС УрО РАН были поставлены эксперименты по исследованию свободной конвекции натрия в цилиндре, длина которого равна 5 диаметрам, для трех положений цилиндра: вертикального, горизонтального и наклоненного под  $45^\circ$ , показавшие, что наиболее интенсивный теплоперенос вдоль цилиндра реализуется в наклонном цилиндре [12]. Эти результаты стимулировали интерес к детальному исследованию зависимости турбулентного конвективного теплопереноса в длинных каналах, заполненных жидким натрием, от угла наклона канала.

В настоящей работе приводятся результаты исследования свободной конвекции натрия в отрезке прямой теплоизолированной трубы, длина которой равна 20 диаметрам, с торцевыми теплообменниками, обеспечивающими фиксированный перепад температуры. Эксперименты выполнены для заданной разности температуры между торцевыми теплообменниками и различных углов наклона трубы к вертикали, от вертикального положения (подогрев снизу) до горизонтального. Выявлена силь-

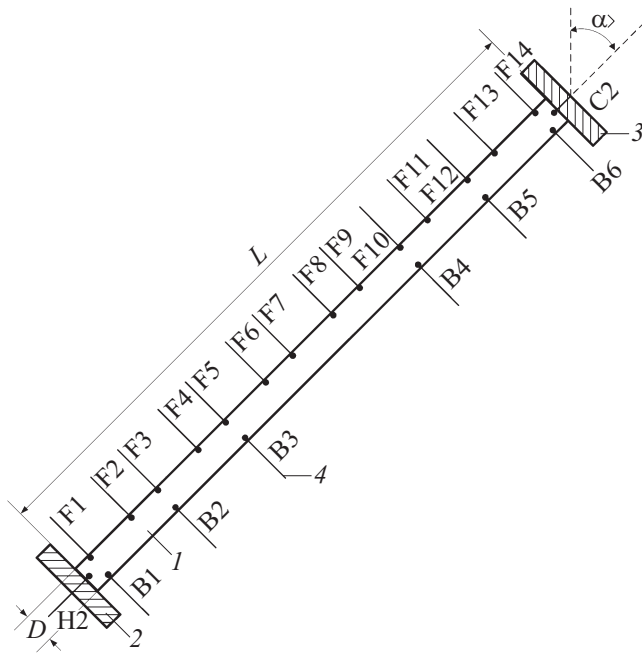


Рис. 1. Схема канала и расположение термопар.

ная зависимость мощности, передаваемой вдоль трубы, от угла наклона (число Нуссельта в исследованном диапазоне углов наклона изменяется на порядок) с максимумом в области наклона  $60\text{--}70^\circ$  от вертикали, показана связь с крупномасштабной циркуляцией и уровнем турбулизации конвективного потока.

## Экспериментальная установка

Экспериментальная установка состоит из канала 1 (рис. 1), представляющего собой трубу из нержавеющей стали с внутренним диаметром  $D = 96\text{ мм}$  и толщиной стенки  $8\text{ мм}$ . К торцам трубы с помощью фланцев присоединены теплообменники: нагреватель и холодильник. Цилиндрический нагреватель имеет корпус из меди, внутри которого расположен электрический тепловыделяющий элемент. Толщина медного диска 2, примыкающего к натрию, составляет  $15\text{ мм}$ . Холодильник также включает примыкающий к натрию медный диск 3 толщиной  $15\text{ мм}$ , в который с обратной стороны вмонтированы 474 медных стержня диаметром  $5\text{ мм}$  и длиной  $200\text{ мм}$ , заключенные в кожух и принудительно обдуваемые потоком воздуха с контролируемым расходом. Длина цилиндрического канала, заполненного жидким натрием, составляет  $L = 1980\text{ мм}$ . К трубе подсоединена обогреваемая расширительная ёмкость. Снаружи установка покрыта теплоизоляцией, состоящей из минеральной ваты толщиной  $50\text{ мм}$  и алюминиевой фольги. Канал расположен на поворотной раме, позволяющей фиксировать его под произвольным углом  $\alpha$  относительно вертикали. Угол  $\alpha$  изменяется

от  $0$  до  $90^\circ$ , т.е. нагреватель находится всегда не выше холодильника.

Для измерения температуры используются термопары хромель-алюмель с изолированным спаем, диаметр спая  $1\text{ мм}$ . Внутри канала для измерения пульсаций температуры в натрии установлено 22 термопары, маркировка и положение которых показаны на рис. 1. 14 термопар, обозначенных F1–F14 располагаются вдоль образующей трубы на расстоянии  $10\text{ мм}$  от стенки канала таким образом, что термопары с четным номером, как и термопары с нечетным номером, располагаются на одинаковом расстоянии друг от друга. Термопары в линейке F1–F14 используются также для оценки средней продольной компоненты скорости на участке между соседними термопарами по максимуму кросскорреляционной функции, построенной для сигналов от каждой пары датчиков. Еще 6 термопар B1–B6 расположены напротив основной линейки термопар на одном уровне с F1, F3, F5, F10, F12 и F14. Через торцевые диски вдоль оси канала в натрий заведены на расстояние  $5\text{ мм}$  от дисков термопары H2 (со стороны нагревателя) и C2 (со стороны холодильника). Именно по показаниям термопар H2 и C2 устанавливался требуемый режим и разность их показаний  $\Delta T$  принималась в качестве характерного перепада температуры, приложенного к столбу натрия. Внутри каждого торцевого медного диска установлено по 4 термопары для контроля распределения температуры в диске.

## Результаты

Все измерения выполнены для фиксированной средней температуры натрия  $T = 423\text{ К}$  и наложенной разности температуры  $\Delta T = 40\text{ К}$ . Таким образом, из четырех управляющих параметров (числа Рэлея  $Ra$ , числа Прандтля  $Pr$ , аспектного отношения  $\Gamma$  и угла наклона

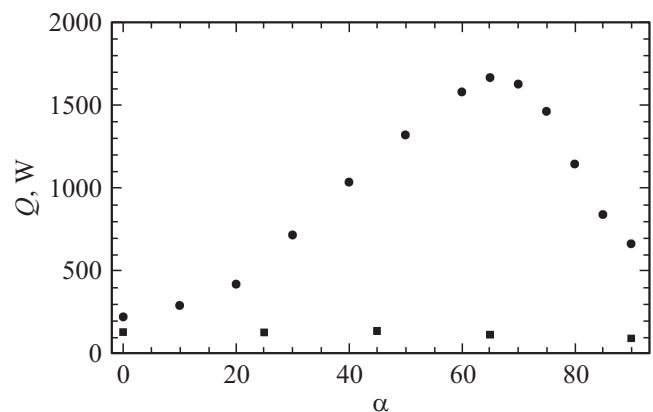
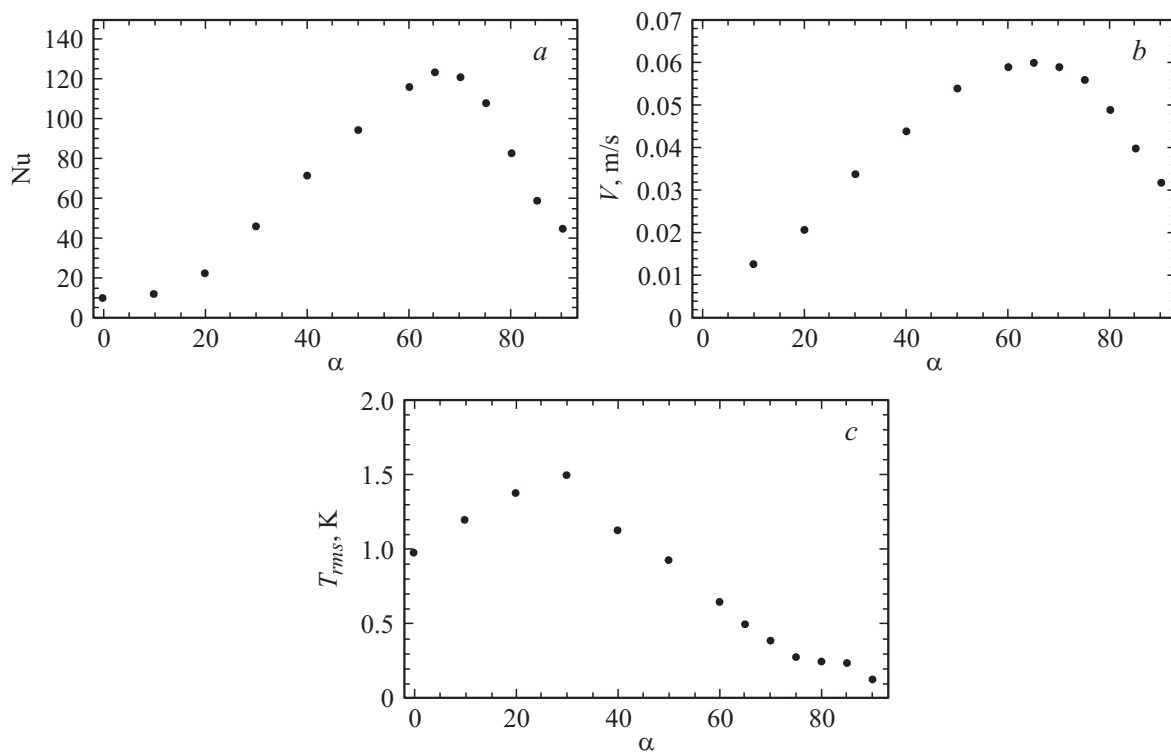


Рис. 2. Мощность, потребляемая нагревателем для поддержания перепада температуры  $\Delta T = 40\text{ К}$  (кружки), и мощность, потребляемая нагревателем при  $\Delta T = 0\text{ К}$  (квадраты). Средняя температура натрия в полости  $\bar{T} = 423\text{ К}$ .



**Рис. 3.** Число Нуссельта (*a*), средние значения продольной компоненты скорости на участке между термомпарами F4–F5 (*b*) и среднеквадратичные пульсации температуры на термомпаре F8 (*c*) в зависимости от угла наклона трубы.

канала  $\alpha$ ) три были зафиксированы

$$Ra = \frac{g\beta L^3 \Delta T}{\nu \chi} = 2.4 \cdot 10^6,$$

$$Pr = \frac{\nu}{\chi} = 0.0089, \quad \Gamma = \frac{L}{D} = 20.6,$$

где  $g$  — ускорение свободного падения,  $\beta$  — коэффициент теплового расширения,  $\nu$  — кинематическая вязкость и  $\chi$  — температуропроводность жидкости.

Эксперименты выполнены для 13 положений трубы. После установки угла наклона  $\alpha$  достигался стационарный режим конвекции (характерное время установления режима составило 2–3 h), после чего проводились измерения в течение 1 h.

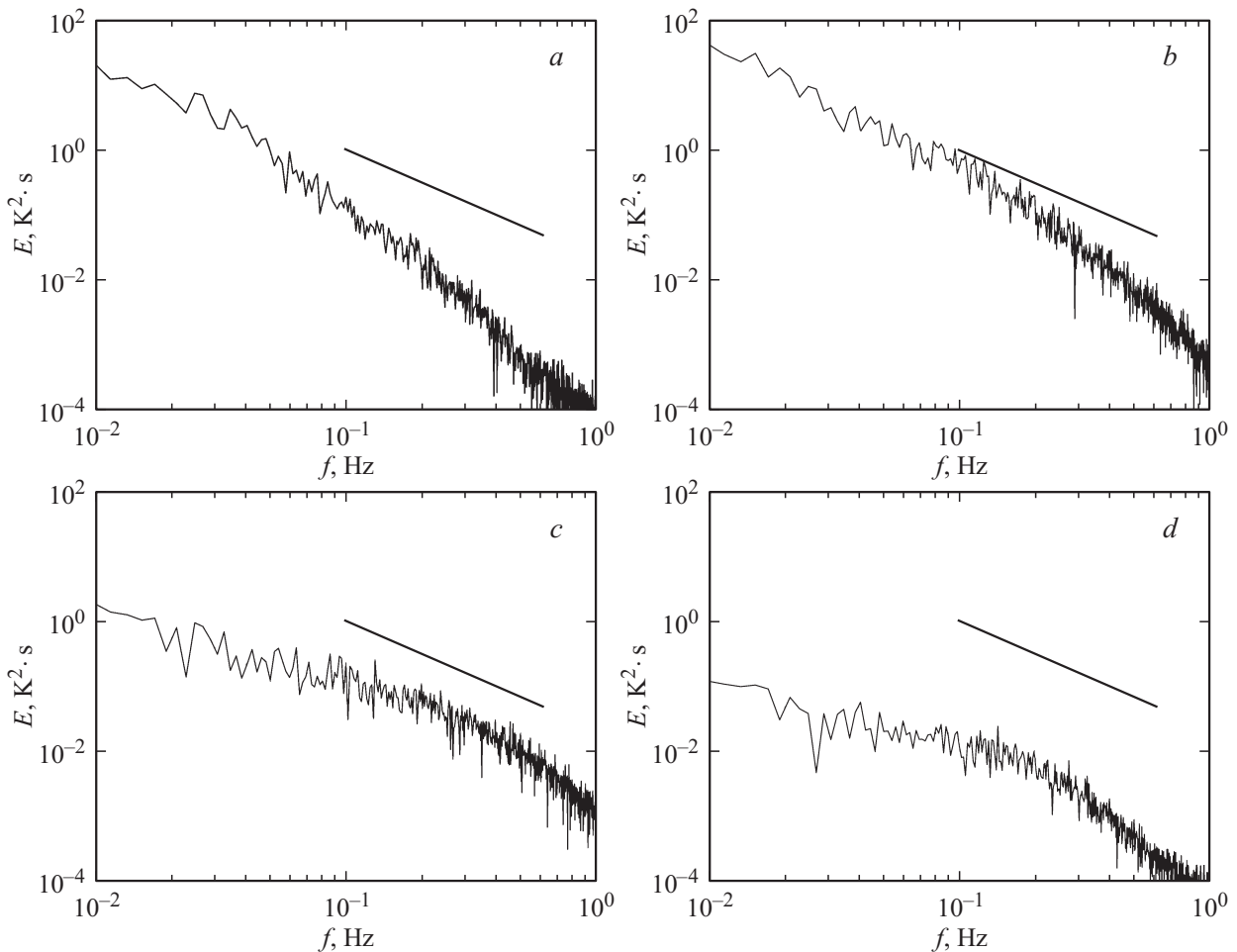
Конструкция установки не позволяет контролировать отвод тепла через холодильник. Измеряемой величиной является электрическая мощность, потребляемая нагревателем. Поскольку температура всех элементов установки существенно превышает температуру окружающего воздуха, то очевидно, что часть этой мощности рассеивается через теплоизоляцию. Для оценки потерь проводились измерения мощности, необходимой для поддержания температуры  $t = \bar{T} = 423$  K на обоих теплообменниках (для этих целей осуществлялся электрообогрев холодильника, воздух через холодильник не циркулировал). На рис. 2 показаны значения мощности  $Q$ , потребляемой нагревателем для поддержания заданного перепада температуры  $\Delta T = 40$  K при различных углах

наклона трубы. Наименьшая мощность (235 W) потребляется при вертикальном положении цилиндра ( $\alpha = 0^\circ$ ). С ростом угла наклона мощность растет, достигая максимума (1675 W) при  $\alpha = 65^\circ$ , и опускается до 675 W при горизонтальном положении трубы ( $\alpha = 90^\circ$ ). На этом же рисунке показана и мощность  $Q_l$ , потребляемая нагревателем для обеспечения средней температуры при  $\bar{T} = 0$  K. Эта мощность, характеризующая тепловые потери, также зависит от положения канала, изменяясь в диапазоне 110–150 W.

Характеристикой конвективного теплообмена является число Нуссельта, определяемое как отношение общего потока тепла через объем жидкости к молекулярному теплотокоту через неподвижную жидкость при такой же наложенной разности температуры. Зависимость числа Нуссельта, определенного как

$$Nu = \frac{4(Q - Q_l)L}{\pi D^2 \lambda \Delta T},$$

где  $\lambda$  — теплопроводность натрия при  $T = \bar{T}$ , от угла наклона показана на рис. 3, *a*. Структура зависимости  $Nu(\alpha)$  подобна структуре зависимости  $Q(\alpha)$  (рис. 2), но вариации безразмерного теплотокота еще существеннее: число Нуссельта для вертикального канала  $Nu = 11$ , возрастающая при  $\alpha = 65^\circ$  до  $Nu = 124$  и снижаясь до  $Nu = 45$  при  $\alpha = 90^\circ$ . Таким образом, конвективный теплоперенос в трубе, наклоненной на  $65^\circ$  к вертикали, почти втрое выше, чем в горизонтальной трубе с таким



**Рис. 4.** Спектры мощности пульсаций температуры на термопаре F8 для  $\alpha = 0^\circ$  (a),  $\alpha = 20^\circ$  (b),  $\alpha = 70^\circ$  (c),  $\alpha = 90^\circ$  (d). Прямая линия показывает наклон „ $-5/3$ “ (приведена для ориентира).

же перепадом температуры, и более чем в десять раз превосходит конвективный поток тепла в вертикально расположенной трубе.

Интересно выяснить структуру и характер возникающего в трубе конвективного течения. О структуре осредненного течения в канале можно судить по результатам измерения средней скорости по кросскорреляционным функциям для пульсаций температуры в соседних термопарах линейки F1–F14. Результаты измерений показали, что во всех случаях, кроме строго вертикального, в трубе устанавливается осредненное крупномасштабное течение — кросскорреляционные функции для всех пар датчиков в линейке F1–F14 имеют выраженный максимум, свидетельствующий о наличии течения в направлении от горячего торца к холодному. Скорости вдоль канала дают близкие значения, показывая незначительное снижение по мере приближения к холодному торцу — по-видимому, это объясняется тем, что вблизи горячего теплообменника поток более поджат к верхней стенке. В качестве характеристики интенсивности возникающей в канале крупномасштабной циркуляции натрия на рис. 3, b показаны значения средней скорости,

измеренные по показаниям термопар F4–F5. Можно видеть, что представленная выше зависимость  $Nu(\alpha)$  в целом воспроизводит вид функции  $V(\alpha)$ , что свидетельствует о том, что именно возникающая в трубе крупномасштабная циркуляция определяет мощность, передаваемую вдоль канала. Однако можно заметить, что в области малых углов скорость течения растет с углом быстрее, чем теплоперенос, а максимум вблизи  $\alpha = 65^\circ$  у функции  $Nu(\alpha)$  острее.

Другим фактором, очевидно воздействующим на конвективный теплоперенос, является турбулентность. Скорости крупномасштабного течения достигают  $0.06 \text{ m/s}$ , что дает оценку числа Рейнольдса  $Re = VD/\nu = 10\,000$ , свидетельствующую о наличии в потоке развитой мелкомасштабной турбулентности. В качестве характеристики интенсивности турбулентности в канале на рис. 3, c представлены среднеквадратичные значения пульсаций температуры в центральной части канала (по данным термопары F8). Рисунок свидетельствует о высоком уровне пульсаций температуры в вертикальном положении, которые становятся еще интенсивнее при небольшом наклоне трубы, достигая максимума при

$\alpha = 20\text{--}30^\circ$ . Дальнейшее увеличение угла наклона приводит к монотонному снижению уровня пульсаций. В горизонтальном положении амплитуда пульсаций падает на порядок по сравнению с вертикальным положением. Именно нарастанием турбулентных пульсаций можно объяснить замедленный в сравнении с ростом скорости крупномасштабного течения рост числа Нуссельта при малых углах наклона — турбулентность усиливает теплообмен между встречными потоками холодной и горячей жидкости.

О развитом турбулентном характере течения говорят и спектры мощности пульсаций температуры, приведенные на рис. 4 для термопары F8 при четырех положениях канала. Показаны низкочастотные части спектров (спектральная плотность энергии пульсаций температуры на частоте  $f \gg 1\text{ Hz}$  становится ниже уровня шума, равного  $10^{-4}\text{ K}^2\text{s}$ ), характеризующие не столько мелкомасштабную турбулентность, сколько пульсации крупномасштабных мод. При наблюдающихся скоростях течения жидкость проходит расстояние, равное диаметру, за время порядка одной секунды, а, следовательно, показанные на спектрах частоты в диапазоне  $0.01 < f < 1\text{ Hz}$  характеризуют вариации за время, за которое жидкость проходит расстояния, сравнимые с диаметром и существенно превышающие его. Поэтому наклон „ $-5/3$ “ показан на графиках в качестве ориентира, а не с целью обсуждения наличия в спектре инерционного интервала, который можно ожидать на более высоких частотах.

## Заключение

Выполненные экспериментальные исследования турбулентной конвекции жидкого натрия в трубе длиной, равной 20 диаметрам, для фиксированного числа Рэлея  $Ra = 2.4 \cdot 10^6$  выявили сильную зависимость числа Нуссельта от угла наклона трубы к вертикали. Максимальный теплоперенос наблюдается при наклоне под углом  $\alpha = 65^\circ$  к вертикали. Следует отметить, что зависимости числа Нуссельта от угла наклона, похожие на представленные на рис. 2, а, известны и для жидкостей с числами Прандтля порядка единицы. Эксперименты с жидким гелием ( $Pr \sim 0.7$ ) в трубках длиной от 10 до 50 диаметров и числах Рэлея  $Ra \sim 5 \cdot 10^6\text{--}10^8$  [10] указывают на наличие максимума приблизительно при таких же углах наклона, как и в рассмотренном случае жидкого натрия. Однако при свободной конвекции гелия максимальный тепловой поток превышает тепловой поток в вертикальном канале в 4–5 раз, в то время как в случае натрия тепловой поток возрос в 11 раз. Увеличение эффективности теплопереноса с увеличением угла наклона от вертикали до  $45^\circ$  наблюдалось и при исследовании турбулентной конвекции в канале, соединяющем резервуары с горячей и холодной водой [13].

Представленные характеристики крупномасштабной циркуляции и турбулентных пульсаций температуры показывают, что конвективный теплоперенос определяется в основном скоростью крупномасштабной циркуляции жидкости — при достижении максимальной скорости потока достигается и максимальный теплоток. Турбулентные пульсации максимальны при небольших углах наклона ( $\alpha = 20\text{--}30^\circ$ ) и скорее ослабляют поток тепла вдоль канала, хотя в пределе малых углов (вертикальная труба) устойчивой крупномасштабной циркуляции нет и конвективный теплоток, на порядок превышающий молекулярный, обеспечивается только мелкомасштабными (турбулентными) потоками жидкости.

Работа выполнена при поддержке программы Отделения ЭММиПУ РАН № 12-Т-1-1008.

## Список литературы

- [1] *Rachkov V.* // International conference on Fast reactors and related fuel cycles: safe technologies and sustainable scenarios. Paris, France, 4–7 March, 2013. Paper IAEA-CN-199-FRP-05.
- [2] *Latge C., Le Coz P., Castaldi O., Gauche F., Devictor N.* // The 9-th International PAMIR conference on Fundamental and Applied MHD, Thermo Acoustic and Space Technologies. Riga, Latvia, June 16–20, 2014. Vol. 2. P. 43–51.
- [3] *Platacis E.* // The 9-th International PAMIR conference on Fundamental and Applied MHD, Thermo Acoustic and Space Technologies. Riga, Latvia, June 16–20, 2014. Vol. 2. P. 25–28.
- [4] *Мельников И.А., Разуванов Н.Г., Свиридов В.Г., Свиридов Е.В., Шестаков А.А.* // Теплоэнергетика. 2013. № 5. С. 52–59.
- [5] *Ruault J.-M., Masson F., Worms J.-C., Detsis E., Gaia E., Jansen F., Semenkin A., Tinsley T.* // The 9-th International PAMIR conference on Fundamental and Applied MHD, Thermo Acoustic and Space Technologies. Riga, Latvia, June 16–20, 2014. Vol. 1. P. 484–488.
- [6] *Ashurko Y., Pugachev G.* // Journal of Nuclear Science and Technology. 2011. Vol. 48. N 4. P. 602–611.
- [7] *Большухин М.А., Васильев А.Ю., Будников А.В., Патрушев Д.Н., Романов Р.И., Свешников Д.Н., Сухановский А.Н., Фрик П.Г.* // Вычислительная механика сплошных сред. 2012. Т. 5. N 4. С. 469–480.
- [8] *Рогожкин С.А., Осипов С.Л., Фадеев И.Д., Шепелев С.Ф., Аксенов А.А., Жлуктов С.В., Сазонова М.Л., Шмелев В.В.* // Атомная энергия. 2003. Т. 115. Вып. 5. С. 295–298.
- [9] *Ahlers G., Grossmann S., Lohse D.* // Review of Modern Physics. 2009. Vol. 81. P. 503–537.
- [10] *Langebach R., Haberstroh Ch.* // AIP Conf. Proc. 2014. P. 1504.
- [11] *Lock G.S.H., Fu J.* // J. Heat Transfer. 1993. Vol. 115. P. 166–172.
- [12] *Frick P., Khalilov R., Kolesnichenko I., Mamykin A., Pakholkov V., Pavlinov A., Rogozhkin S.* // EuroPhysical Letters, 2015. Vol. 109. N P. (in press).
- [13] *Riedinger X., Tisserand J.-C., Seychelles F., Castaing B., Chilla F.* // Physics of Fluids. 2013. Vol. 25. P. 015 117.