

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНВЕКТИВНОГО ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОГО НАТРИЯ В НАКЛОННОМ ЦИЛИНДРЕ

¹Теймуразов А.С., ¹Фрик П.Г.

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН (Пермь)

Выполнено численное исследование конвекции Релея-Бенара в цилиндрической полости, заполненной жидким натрием при углах наклона относительно силы тяжести $0 \leq \alpha \leq \pi/2$ с шагом $\pi/20$. Для расчетов выбраны параметры, соответствующие параметрам экспериментальной установки, на которой было проведено исследование теплообмена при вертикальном, наклонном, и горизонтальном положениях цилиндра [1]. Математическая модель позволяет детально изучить структуру и характеристики течения, недоступные для экспериментальных измерений.

Расчетная область представляла собой вертикальный цилиндр высотой $L = 850$ мм и диаметром $D = 168$ мм (аспектное отношение $H/D \approx 5$). Конвективные параметры среды соответствуют жидкому натрию при температуре 165 °С ($Pr = 0.0083$). На нижнем торце цилиндра осуществлялся нагрев, на верхнем торце цилиндра производилось охлаждение, боковые границы области теплоизолированы. Поток тепла, проходящий через натрий составлял 59.3 кВт/м². При этом число Релея (если за характерный размер принять L) составляло $Ra = 10^9$. Математическая модель основана на уравнениях термогравитационной конвекции в приближении Буссинеска. Использована неравномерная расчетная сетка со сгущением вблизи границ с общим числом узлов 1.65 млн. Для корректного учета вклада мелкомасштабной турбулентности применен метод крупных вихрей (LES). Для реализации численной схемы применяется свободно распространяемый пакет программ с открытым исходным кодом OpenFOAM Extend 3.2. Расчеты проводились на вычислительном кластере «Тритон» ИМСС УрО РАН (г. Пермь).

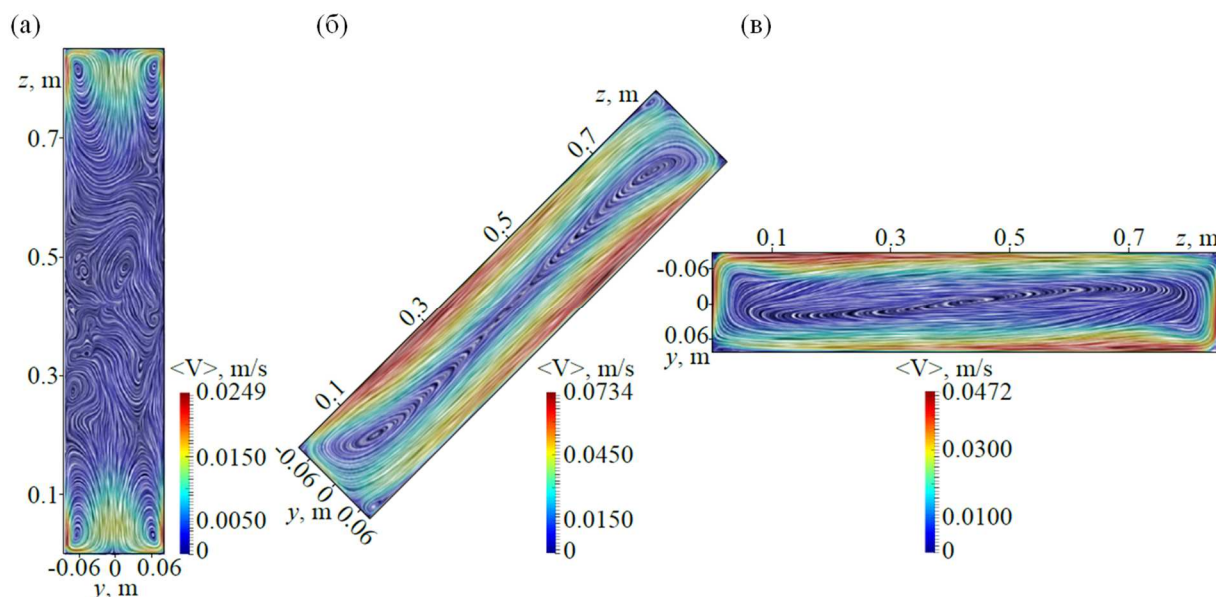


Рис. 1 Среднее по времени поле скорости в вертикальном сечении yOz для углов наклона $\alpha = 0$ (а), 0.25π (б), 0.5π (в).

Трехмерные нестационарные расчеты выполнялись для различной ориентации цилиндра относительно силы тяжести, что существенно меняло структуру течения и характеристики теплопереноса. На (Рис. 1) представлены средние по времени поля скорости в вертикальном сечении цилиндра при различных наклонах установки. В случае вертикального положения цилиндра крупномасштабное течение не устанавливается (Рис. 1а), появляются лишь два круговых вихря – в нижней части (вблизи нагревателя) и верхней части (вблизи холодильника), но пульсации скорости и температуры достигают наибольших значений. В случае наклонного и горизонтального положений цилиндра (Рис.1б,в) крупномасштабная циркуляция занимает весь объем расчетной области, но пульсации скорости и температуры в этих случаях значительно ниже, чем в случае вертикального цилиндра.

На (Рис. 2) представлены профили средней температуры и среднеквадратичного отклонения для температуры, полученные в расчетах, и в эксперименте. В эксперименте сигнал записывался с линейки из семи термопар, установленных вдоль образующей цилиндра на расстоянии 17 мм от боковой стенки.

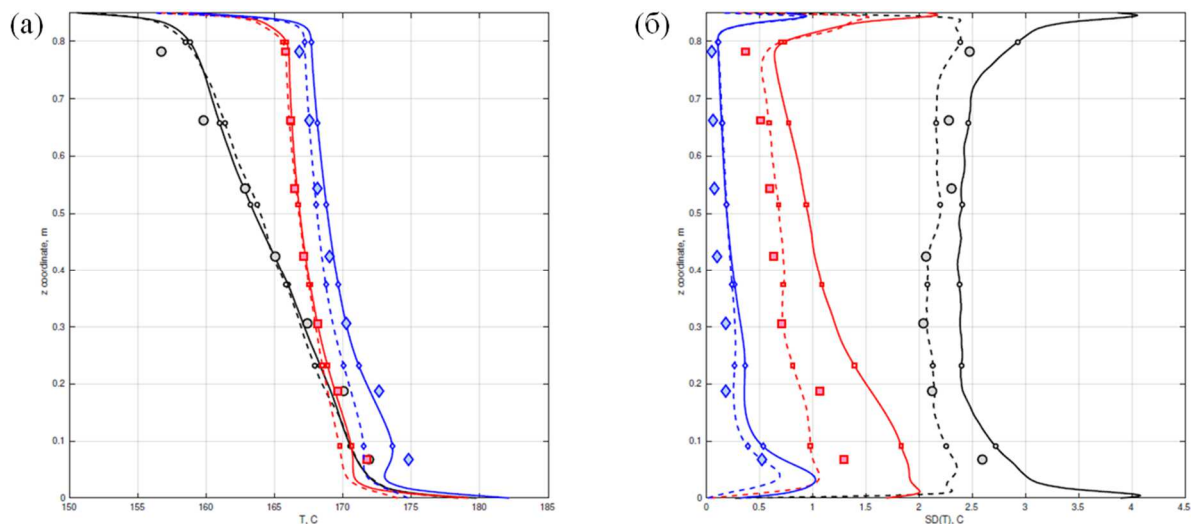


Рис. 2 Средние по времени профили температуры (а) и среднеквадратичное отклонение (б) вдоль линии, расположенной на расстоянии 17 мм от боковой стенки цилиндра для углов наклона $\alpha = 0$ (черные круги), 0.25π (красные квадраты), 0.5π (синие ромбы). Экспериментальные данные показаны соответствующими точками. Результаты расчетов: сплошные линии – для температуры задаются граничные условия второго рода (фиксированный поток тепла); штриховые линии – граничные условия для температуры первого рода (фиксированные значения температуры на торцах).

Исследовано влияние угла наклона цилиндра полости на теплоперенос. Показано, что наибольшее значение числа Нуссельта достигается при $\alpha = 7\pi/20$.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №16-01-00459а).

1. Frick P., Khalilov R., Kolesnichenko I., Mamykin A., Pakholkov V., Pavlinov A., Rogozhkin S. Turbulent convective heat transfer in a long cylinder with liquid sodium // Europhysical Letters. 2015. Vol. 109. No 1. P. 14002.