

Т.Б. Карлович, доц., канд. физ.-мат. наук;
А.Б. Сухоцкий, доц., канд. техн. наук; Е.С. Данильчик, ассист.
(БГТУ, г. Минск)

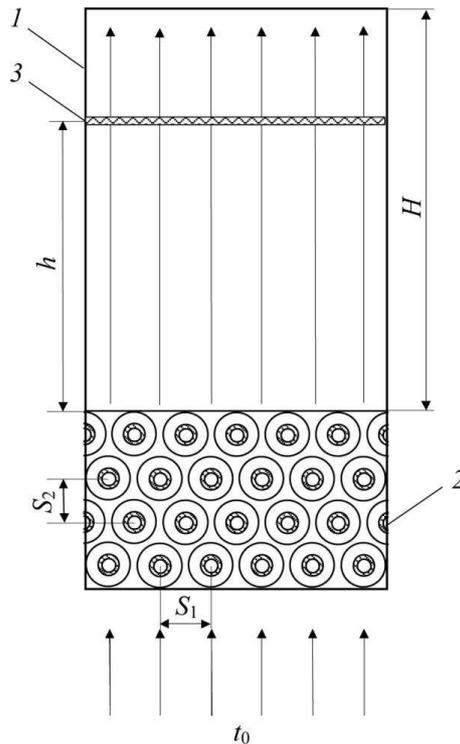
КОНВЕКЦИЯ РЭЛЕЯ-БЕНАРА В ВОЗДУШНЫХ ПОТОКАХ ВЫТЯЖНОЙ ШАХТЫ НАД ПУЧКОМ ИЗ ОРЕБРЕННЫХ ТРУБ

Явление свободной конвекции тесно связано изучением неустойчивых гидродинамических течений, возникающих в результате неоднородности плотности жидкости или газа, обусловленной процессами тепло- или массообмена в поле гравитационных сил [1]. Если жидкость неравномерно нагрета, то в ней, как правило, возникает конвективное движение. Однако, существуют такие условия подогрева жидкости, при которых она может находиться в состоянии механического равновесия, в то время как тепловой поток будет отличен от нуля [2]. Соответствующая конвекция носит название конвекции Рэлея-Бенара и в простейшем случае для подогрева снизу бесконечного горизонтального слоя жидкости представляет собой совокупность двумерных конвективных валов (т.н. ячеек Рэлея-Бенара), вращающихся в противоположные стороны [3].

В настоящей работе конвекция Рэлея-Бенара рассматривается применительно к воздушным потокам в вертикальной шахте, расположенной над четырехрядным шахматным пучком из оребренных труб, разогреваемых за счет ТЭНов, расположенных внутри. Такие пучки труб являются частью различных теплообменных аппаратов, служащих для быстрого отведения теплоты от охлаждаемого объекта. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

Четырехрядный шахматный пучок состоит из $m = 22$ шт. ребристых труб с поперечным $S_1 = 64$ мм и продольным $S_2 = 55,4$ мм шагами. Вытяжная шахта, служащая для интенсификации свободной конвекции, имеет в основании прямоугольник размером $b \times c = 38 \times 31$ см и высоту $H = 52$ см. При определенной мощности, подводимой к оребренным трубам, разогревающим воздух, в шахте появляются потоки холодного воздуха, направленные внутрь шахты. При этом нагретый воздух, выходящий из шахты, смешивается с холодным воздухом, образуя нестационарные гейзерные течения.

Оребренные трубы имеют следующие геометрические размеры: наружный диаметр $d = 56$ мм; диаметр трубы по основанию $d_0 = 26,8$ мм; высота ребра $h = 14,6$ мм; шаг ребра $s = 2,5$ мм; средняя толщина ребра $\Delta = 0,5$ мм; длина трубы $l_{\text{т}} = 330$ мм; коэффициент оребрения трубы $\phi = 19,26$. Диаметр несущей трубы $d_{\text{н}} = 25$ мм; толщина стенки $\delta = 2$ мм.



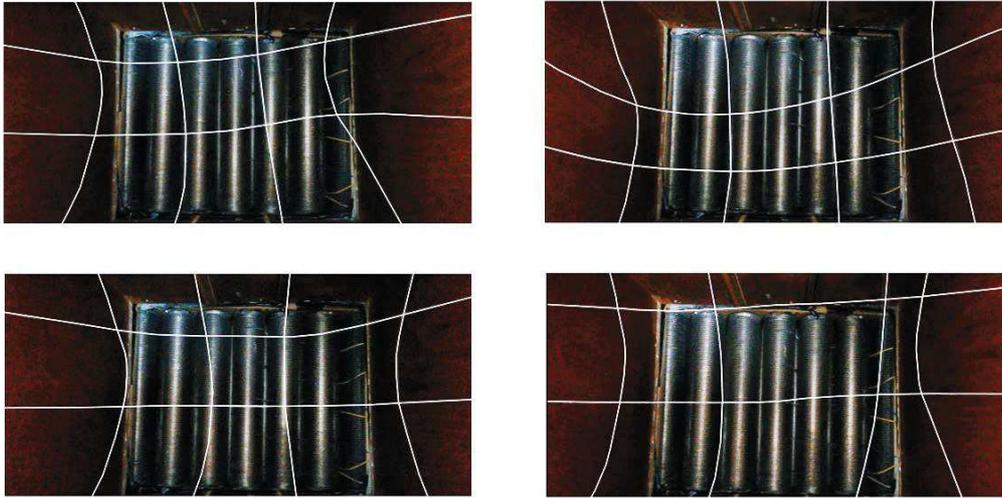
1 – вытяжная шахта; 2 – четырехрядный шахматный пучок;
3 – сетка из легких нитей

Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки

Конвективная неустойчивость воздушных потоков в шахте регистрировалась путем установки внутрь шахты сетки из легких нитей, закрепленной на жесткой рамке. Рамка фиксировалась на высоте $h = 37$ см от оребренного пучка труб (см. рис. 1) и проводилась съемка движения нитей с течением времени. Оказалось, что все нити сетки совершают колебательные движения с некоторой частотой и амплитудой. Наибольшую амплитуду колебаний имеют боковые нити, расположенные параллельно оребренным трубам пучка, причем сначала колебания возникают на одной стороне шахты, а затем постепенно переходят на вторую сторону шахты, затухая на первой стороне. На рис. 2 продемонстрировано положение нитей в различные моменты времени для подведенной мощности 125 Вт. По направлению деформации нитей можно судить о направлении воздушных потоков в шахте. Так, на рис. 2а видно, что холодный воздух задувается в шахту справа и снизу, на рис. 2б – слева и сверху, на рис. 2в – в основном слева, на рис. 2г – в основном в центре. Таким образом, в шахте формируются некоторые вращающиеся квазипериодические структуры, приводящие к разнонаправленной скорости течения воздуха.

Движение воздуха в шахте можно интерпретировать на основе линеаризованной системы уравнений для конвекции воздуха в поле силы тяжести, состоящей из уравнения Навье-Стокса, записанного в

приближении Буссинеска, уравнения теплопроводности и уравнения непрерывности [2]. При этом скорость течения воздуха раскладывается на две составляющие: скорость течения воздуха без возмущений и малую возмущающую компоненту скорости.



Время съемок: 4-я (а), 13-я (б), 17-я (в), 20-я (г) секунды от начала наблюдения (для лучшей видимости нити утолщены и выделены белым цветом)

Рисунок 2 – Квазипериодические структуры воздушных потоков в шахте

Верхняя и нижняя граница шахты предполагаются свободными, а на боковых границах скорость полагается равной нулю. В случае механического равновесия невозмущенная составляющая скорости равна нулю, а температурный градиент является постоянной величиной. В данной постановке решение задачи представляется в виде совокупности нормальных возмущений, экспоненциально зависящих от времени и периодически осциллирующих в пространстве [4]. Переход из режима устойчивого молекулярного теплопереноса к режиму неустойчивого вихревого течения определяется критическими числами Рэлея по формуле:

$$Ra_{cr} = \frac{(n^2\pi^2 + l^2a_x^2 + m^2a_y^2)^3}{l^2a_x^2 + m^2a_y^2}, \quad (1)$$

где $a_x=2\pi H/b$, $a_y=2\pi H/c$ – нормированные минимальные волновые числа для прямоугольного основания шахты.

Согласно (1) в случае $Ra = Ra_{cr}$ задача Рэлея имеет нестационарное периодическое решение в виде прямоугольных конвективных ячеек (рис.3). Экспериментальное число Рэлея для подведенной мощности 125 Вт составляет $Ra = 538000$. Ближайшее к нему критическое число Рэлея $Ra_{cr} = 565000$ соответствует гармоникам $n = 1$, $l = 2$, $m=2$.

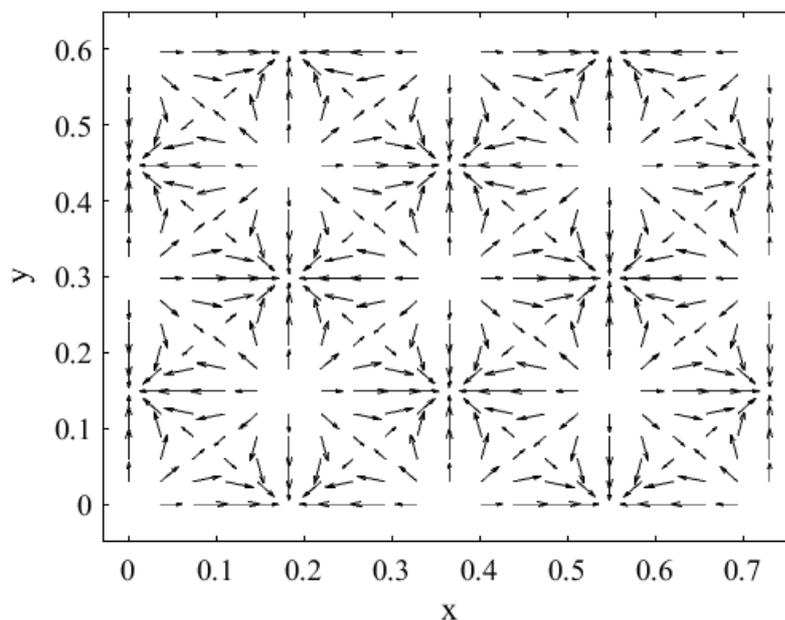


Рисунок 3 – Ячейки Рэля-Бенара в вытяжной шахте для гармоник $n = 1, l = 2, m = 2, Ra_{cr} = 565000$.

Отличие экспериментального и теоретического значений критического числа Рэля говорит о том, что течение воздуха в шахте является более сложным по сравнению с предсказаниями конвективной модели Рэля-Бенара. Это обусловлено, в первую очередь, неравномерным подогревом воздуха над оребренным пучком труб и пограничными явлениями вблизи стенок шахты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Гидродинамика. 3 изд. М.: Наука, 1986. 736 с.
2. Гершуни Г. З., Жуховицкий Е. М. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. М.: Наука, 1972. 392 с.
3. Rayleigh L. On convective currents in a horizontal layer of fluid when the higher temperature is on the under side // Phil. Mag. 1916. Vol. 32. P. 529-546.
4. Chandrasekhar S. Hydrodynamic and Hydromagnetic Stability. Oxford at the Clarendon Press, 1961. 654 p.