

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

## ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ НА ФОРМИРОВАНИЕ КОНВЕКТИВНЫХ ВАЛОВ В ПЛОСКОМ ГОРИЗОНТАЛЬНОМ СЛОЕ, ПОДОГРЕВАЕМОМ СНИЗУ

Интенсификация естественной конвекции в теплообменных процессах технологических установок является актуальной задачей в энергетической отрасли и других отраслях промышленности. Так, например, при транспортировке компримированного природного газа по трубопроводу для его охлаждения используются аппараты воздушного охлаждения. Если естественная конвекция является недостаточной для охлаждения, используется принудительная вентиляция, сопровождающаяся затратами на электрическую энергию. Процесс естественной конвекции также можно интенсифицировать, используя вытяжную шахту в аппаратах воздушного охлаждения. При экспериментальном исследовании течения воздуха в шахте, имеющей в основании прямоугольник размером  $38 \times 31$  см и высоту  $H=52$  см и установленной над четырехрядным пучком из оребренных биметаллических труб, оказалось, что при определенной подведенной мощности в шахте наблюдаются разнонаправленные воздушные потоки [1], способствующие

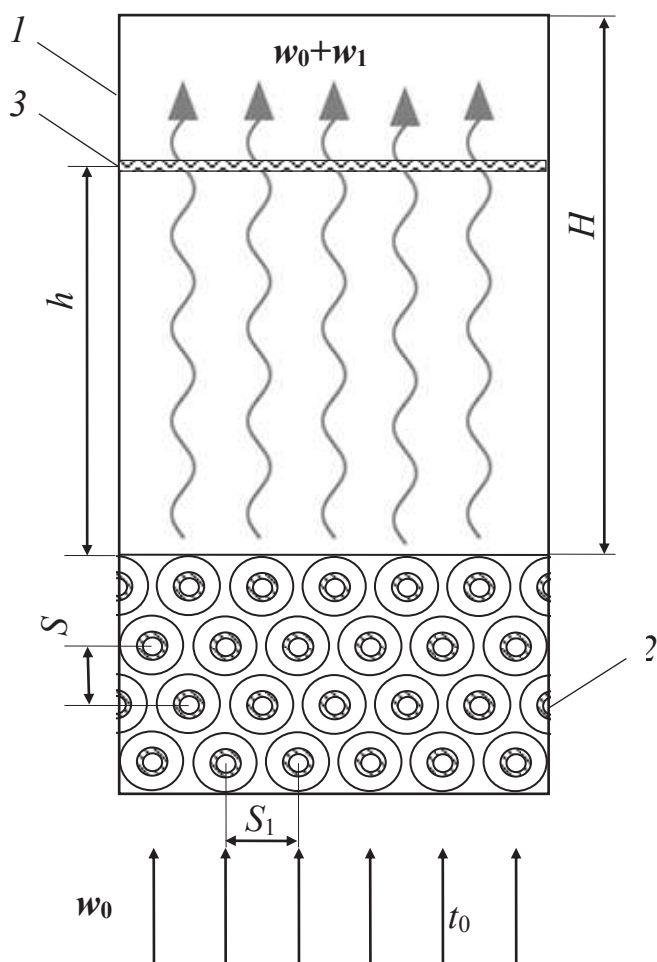


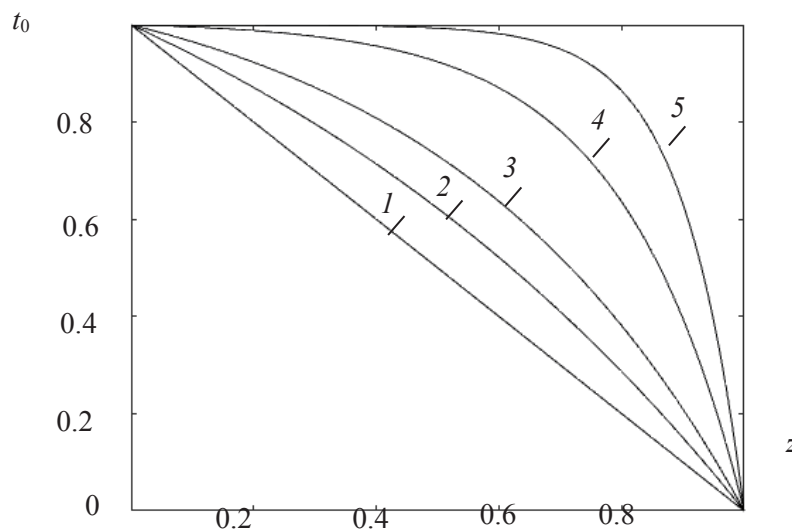
Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки: 1 – вытяжная шахта; 2 – четырехрядный шахматный пучок труб; 3 – сетка из легких нитей

разнонаправленные воздушные потоки [1], способствующие

Если естественная конвекция является недостаточной для охлаждения, используется принудительная вентиляция, сопровождающаяся затратами на электрическую энергию. Процесс естественной конвекции также можно интенсифицировать, используя вытяжную шахту в аппаратах воздушного охлаждения. При экспериментальном исследовании течения воздуха в шахте, имеющей в основании прямоугольник размером  $38 \times 31$  см и высоту  $H=52$  см и установленной над четырехрядным пучком из оребренных биметаллических труб, оказа-

более интенсивному перемешиванию воздушных масс и, соответственно, более интенсивному охлаждению источника теплоты. В качестве источника тепла рассматривался четырехрядный шахматный пучок, состоящий из  $m=22$  шт. ребристых труб с поперечным  $S_1=64$  мм и продольным  $S_2=55,4$  мм шагами. К каждой трубе подводилась регулируемая электрическая мощность. Схема соответствующей экспериментальной установки представлена на рис. 1.

В работах [2, 3] данное явление интерпретировалось на основе конвекции Рэлея-Бенара, сопровождающейся появлением трехмерных квазипериодических структур в шахте, число которых обусловлено критическим числом Рэлея. Также была определена аналитическая зависимость критических чисел Рэлея от параметров шахты. Для описания конвекции Рэлея-Бенара использовалась система уравнений для термогравитационной конвекции в приближении Обербека-Буссинеска. Однако в ней не учитывалась конечная скорость течения воздуха в шахте, которая приводит к равновесному температурному распределению, отличному от равномерно убывающего распределения, и характеризуется числом Пекле  $Pe = w_0 H/a$  (см. рис. 2).



**Рисунок 2 – Распределение температуры для чисел Пекле:  
1 –  $Pe = 0$ ; 2 –  $Pe = 1$ ; 3 –  $Pe = 2$ ; 4 –  $Pe = 5$ ; 5 –  $Pe = 10$**

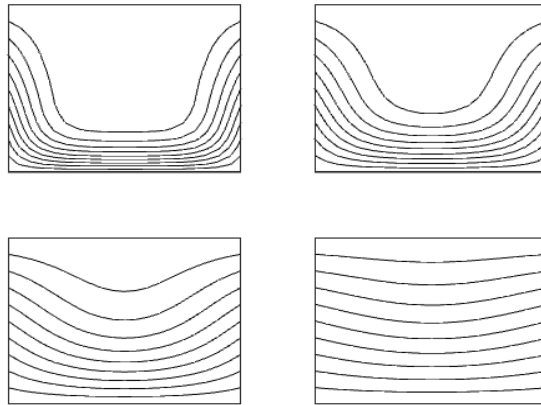
Из рис. 2 видно, что при возрастании числа Пекле температура начинает медленнее уменьшаться в направлении к выходу воздуха из шахты, что приводит к деформации ячеек Рэлея-Бенара.

В случае малых чисел Пекле можно получить аналитическое решение уравнений термогравитационной конвекции с декрементом  $\lambda$ , зависящем от чисел Пекле  $Pe$ , Прандтля  $Pr$ , Рэлея  $Ra$  и от геометрических размеров шахты:

$$\lambda_{nm} = \frac{in\pi Pe}{Pr} + \frac{d_{nm}^2(1+Pr)}{2Pr} \pm \sqrt{\frac{d_{nm}^4(Pr-1)^2}{4Pr^2} + \frac{Ra \cdot f_m^2}{d_{nm}^4 Pr}}, \quad (1)$$

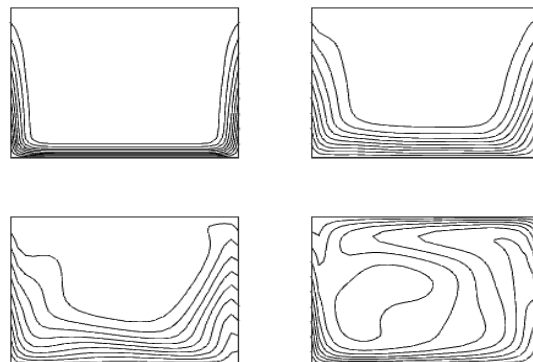
$$d_{nm}^2 = (n\pi)^2 + f_m^2, \quad f_m = 2\pi Hm/b.$$

Наличие мнимой части у декремента  $\lambda$  означает появление дополнительных колебательных возмущений в шахте с частотой, пропорциональной числу Пекле. При этом действительная часть декремента, определяющая критические числа Рэлея, остается такой же, как и для случая нулевой равновесной скорости [2].



**Рисунок 3 – Изотермы в докритическом режиме. Число Рэлея  $Ra = 500$   
а)  $\tau = 0.01$ ; б)  $\tau = 0.02$ ; в)  $\tau = 0.05$ ; г)  $\tau = 0.1$**

Свободная конвекция воздуха в шахте также рассчитывалась численно методом конечных разностей. На рис. 3 и 4 представлены графики изотерм в плоскости  $(x, z)$  для различных времен эволюции воздушных потоков. Видно, что в докритическом режиме (рис. 3) происходит постепенное выравнивание температуры по высоте боковой стенки. В надкритическом режиме (рис. 4) при наличии начального вихря в системе развивается неустойчивое состояние, приводящее к конвективному перемешиванию воздушных потоков и развитию квазипериодических структур.



**Рисунок 4 – Изотермы в надкритическом режиме. Число Рэлея  $Ra = 6000$   
а)  $\tau = 0.001$ ; б)  $\tau = 0.005$ ; в)  $\tau = 0.01$ ; г)  $\tau = 0.03$**

В работе рассмотрена конвективная неустойчивость течения воздуха в вытяжной шахте над горизонтальным четырехрядным оребренным пучком труб. Продемонстрировано появление колебательной неустойчивости наряду с монотонной неустойчивостью конвекции Рэлея-Бенара в случае проницаемых горизонтальных границ на основе аналитического решения уравнений термогравитационной конвекции в случае малых чисел Пекле. Также получено численное решение уравнений термогравитационной конвекции, свидетельствующее о деформации ячеек Рэлея-Бенара в случае отличия от нуля равновесной скорости течения воздуха в шахте.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Сухоцкий А.Б., Маршалова Г.С. Особенности гравитационного течения нагретого воздуха в вытяжной шахте над многорядным оребренным пучком // ИФЖ. 2019. Т.92, № 3. С. 619–625.

2. Карлович Т.Б., Сухоцкий А.Б., Данильчик Е.С. Конвективная неустойчивость воздушных потоков в вытяжной шахте над четырехрядным оребренным пучком // Вести НАН Беларуси. Серия физ.-мат.наук. 2021. Т. 57, № 2. С. 242–254.

3. Карлович Т.Б., Сухоцкий А.Б., Данильчик Е.С. Конвекция Рэлея-Бенара в вытяжной шахте над однорядным горизонтальным пучком из оребренных труб // Труды БГТУ. Сер. 3, Физико-математические науки и информатика. Минск : БГТУ, 2021. № 2. С. 58–64.

УДК 674.055:621.934(043.3)

В.В. Чаевский<sup>1</sup>, доц., канд. физ.-мат. наук;  
Р.Г. Штемплук<sup>2</sup>, гл. инженер, канд. техн. наук;  
А.К. Кулешов<sup>3</sup>, зав. лаб., канд. физ.-мат. наук  
<sup>1</sup>(БГТУ, г. Минск), <sup>2</sup>(НП ЗАО «Синта», г. Минск), <sup>3</sup>(БГУ, г. Минск)

#### СИНТЕЗ И СВОЙСТВА Ni-ДНА ПОКРЫТИЙ НА СТАЛИ

В настоящее время в промышленности широко применяются композиционные электрохимические покрытия (КЭП) на основе никеля [1], интерес к которым вызван уникальным комплексом присущих этим материалам физико-химических и механических свойств. Использование детонационных наноалмазов (ДНА) [2] при электрохимическом осаждении хрома, никеля, цинка приводит к получению покрытий с высокими эксплуатационными характеристиками, такими как микротвердость, износостойкость, коррозионная стойкость. Ni-ДНА КЭП улучшают долговечность инструментов, однако никелевая