

Р.Г.Кадыров<sup>1</sup>, А.А.Миронов<sup>1</sup>, И.А. Попов<sup>1</sup>, Гортышов Ю.Ф.<sup>1</sup>, Ю.В. Жукова<sup>2</sup>, А.Д. Чорный<sup>2</sup>,  
Г.С.Маршалова<sup>2,3</sup>, Е.С.Данильчик<sup>2,3</sup>, И.И.Хабибуллин<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Казанский национальный исследовательский технический университет им.А.Н.Туполева- КАИ,  
420111, Казань, ул. К. Маркса, 10

<sup>2</sup> Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси,  
220072, Минск, ул. П. Бровки, 15

<sup>3</sup> Белорусский государственный технологический университет,  
220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а

<sup>4</sup> НИИ Турбокомпрессор им.В.Б.Шнеппа,  
420029, г. Казань, Сибирский тракт, 40

## ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОПЕРЕЧНО ОБТЕКАЕМЫХ ПУЧКОВ ТРУБ С ГЕНЕРАТОРАМИ ВИХРЕЙ

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Впервые Г. Эйфелем [1] было обнаружено явление, заключающееся в том, что при возникновении в пограничном слое на обтекаемом теле (сферы, цилиндра) турбулентного течения резко уменьшается сопротивление. Внешний поток усиленно действует на пограничный слой и перемещивает его. Точка отрыва смещается вниз по течению. Для ламинарного пограничного слоя точка отрыва находится в окрестности угловой координаты  $90^\circ$ , тогда как после турбулизации пограничного слоя она смещается вниз по течению – на угловую координату  $110-140^\circ$ . Таким образом, область застойного течения за телом значительно сужается, а распределение давления становится подобным распределению давления при течении без трения.

Экспериментально этот парадокс подтвердил Л.Прандтль [2]. На поверхности шара, перед его миделевым сечением он укрепил тонкое проволочное кольцо. Наличие кольца вызвало искусственную турбулизацию пограничного слоя при умеренных числах Рейнольдса и привело к снижению сопротивления.

Предложенное и использованное в работе Л. Прандтля проволочное кольцо, установленное на обтекаемом теле для искусственной турбулизации пограничного слоя, при умеренных числах Рейнольдса может быть заменено на другие типы генераторов вихрей [3,4]. Одним из таких типов генераторов вихрей могут служить системы сферических выемок, хорошо известных в литературе по интенсификации теплоотдачи [5-7].

Известно [8] **Ошибка! Источник ссылки не найден.**, что при внесении возмущений в пограничный слой на поверхности плохообтекаемого тела, в том числе кругового цилиндра, аэродинамическое сопротивление тела может резко уменьшиться. При этом, точка отрыва потока может сместиться вниз по потоку. Таким образом, отрывная область за телом будет иметь меньший поперечный размер, что приводит к значительному уменьшению сопротивления давления. Существует ряд методов, как пассивных, так и активных, позволяющих внести возмущения в пограничный слой. К таким методам относятся изменение структуры

потока перед/за плохообтекаемым телом за счет установки направляющих элементов (пластин, тел меньшего размера) [8-13]; нанесение упорядоченной шероховатости [14], нанесение на поверхность плохообтекаемого тела генераторов вихрей [5-8]. Нанесенные на поверхность генераторы вихрей могут не только снизить аэродинамическое сопротивление, но и увеличить теплоотдачу как за счет увеличения площади теплопередающей поверхности, так и за счет уменьшения толщины динамического пограничного слоя (следовательно – и теплового пограничного слоя).

Результаты численных исследований для одиночных труб показали уменьшение аэродинамического сопротивления, но и отсутствие роста теплоотдачи [15,16]. Необходима проверка гипотезы повышения теплогидравлической эффективности для пучков труб.

### 2. ЦЕЛЬ И ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Цель работы – экспериментальное исследование возможности снижения сопротивления пучка теплообменных труб для повышения теплогидравлической эффективности теплообменного аппарата.

Объект исследования – пучки теплообменных труб. Размеры опытных образцов: длина  $0,076$  м, внешний диаметр образцов  $d_m=0,022$  м. Выемки на опытных образцах наносились на внешнюю поверхность в шахматном порядке и занимали  $50, 75$  и  $100$  % от внешней поверхности образца. Увеличение площади поверхности образцов составило  $f=1,21; 1,31; 1,41$ , соответственно. Основные геометрические размеры выемок на опытных образцах: диаметр выемок  $d=0,006$  м,  $h=0,003$  м продольный шаг  $t=0,012$  м, поперечный (по винтовой линии) шаг выступов  $s=0,008$  м (рис.1). В экспериментах исследовались относительно глубокие выемки  $h/d=0,5$ . Опытные образцы, помещенные в рабочий участок, исследовались при коридорной компоновке труб в пучке (рис.2) при продольных  $S_1$  и поперечных  $S_2$  шагах. При шахматной компоновке труб в пучке поперечный шаг  $S_1$  составлял  $0,044$  м и продольный шаг  $S_2$  составлял  $0,022$  м, что обеспечило значение относительных шагов  $a=S_1/d_t$  и  $b=S_2/d_t$  шагов и  $a \times b=2 \times 1$ . При коридор-

ной компоновке труб в пучке исследовались поперечный шаг  $S_1 = 0,044$  м и продольный шаг  $S_2 = 0,044$  м, что обеспечивало относительный  $a = S_1/d_1$  и  $b = S_2/d_1$  шагов и  $a \times b = 2 \times 2$ .

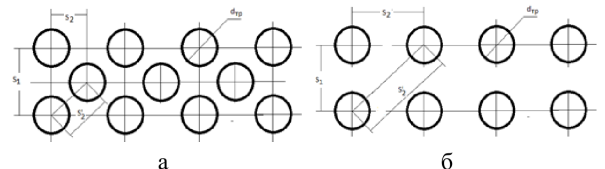
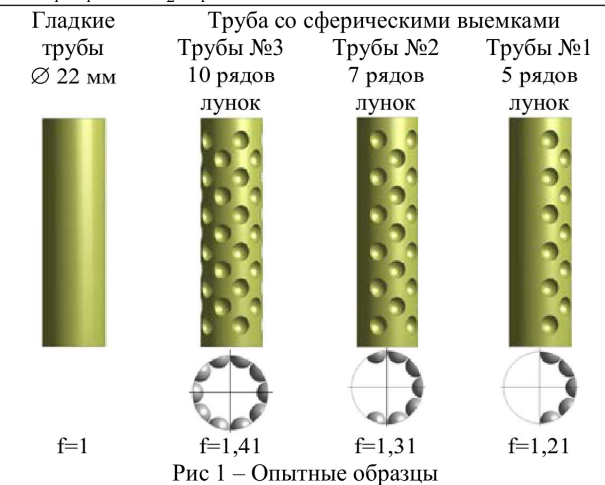


Рис.2 – Схемы расположения опытных образцов в рабочем участке: а – шахматное, б – коридорное

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

#### 3.1. Шахматный пучок

Результаты экспериментального исследования аэродинамического сопротивления в канале с пучками труб шахматной компоновки при различных вариантах нанесения вихрегенераторов представлены на рис.3. Выявлено, что в каналах с пучками труб №1 и №2 сопротивление возросло в среднем в 1,05 – 1,11 раз, что видно из рисунка 3. Сопротивление пучков труб №3 приблизительно равен уровню сопротивления в каналах с пучком гладких труб. Таким образом, нанесение сферических выемок незначительно увеличило коэффициент аэродинамического сопротивления пучков труб при шахматной компоновке.

В целом, в экспериментах не выявлено существенного снижения аэродинамического сопротивления в каналах с пучками труб с вихрегенераторами. Однако прослеживается, что при шахматной плотной компоновке аэродинамическое сопротивление труб №2 и №3, то есть с относительной площадью, занимаемой вихрегенераторами 75% и 100%, имеют сопротивление на уровне гладкого канала.

При исследовании коэффициентов теплоотдачи пучков труб ( $Re=21000$ ) при шахматной компоновке производилось определение местных коэффициентов теплоотдачи на поверхности труб во всех 7 рядах пучка с последующим определением коэффициентов теплоотдачи на трубах в каждом ряду. Показано, что теплоотдача ряда №1 составляет 68%, для ряда №2 – 88% от уровня теплоотдачи

труб третьего и последующих рядов (рис.4). Полученные данные качественно близки к результатам ранее выполненных работ, в которых эти значения составили 60 и 70%, соответственно.

Установленное распределение коэффициентов теплоотдачи характерно как для гладких труб, так и для труб с различными компоновками генераторов вихрей.

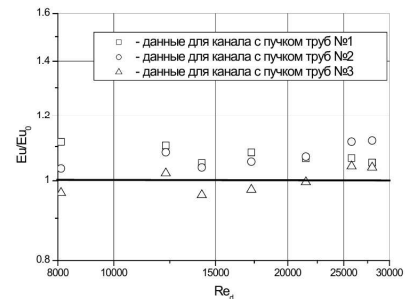


Рис.3. Результаты экспериментального исследования аэродинамического сопротивления в канале с пучком труб при шахматной компоновке

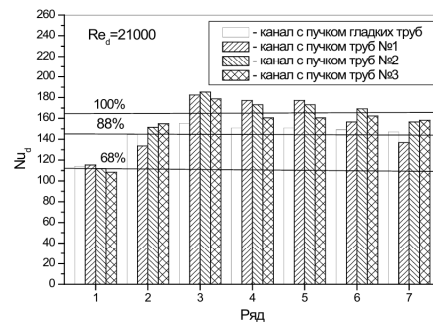


Рис. 4. Теплоотдача в различных рядах пучков труб при шахматной компоновке

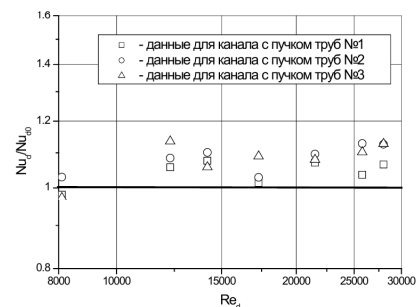


Рис.5. Результаты экспериментального исследования теплоотдачи в канале с пучком труб при шахматной компоновке

На рис.5 представлены результаты экспериментального исследования шахматных пучков труб с генераторами вихрей. Установлено, что наибольшая интенсификация теплоотдачи характерна для труб №3 и составляет 1,06 – 1,14 раз в диапазоне  $Re=(1-3) \cdot 10^4$ . Наименьшая интенсификация теплоотдачи наблюдается в пучках труб №1 и составляет 1,01-1,08 раз. При определении коэффициентов теплоотдачи использовалась площадь гладкого цилиндра. Учитывая, что для труб №1 увеличение

площади теплообмена составляет 1,21; труб №2 – 1,31; труб №3 – 1,41 раза, выявленные уровни интенсификации теплоотдачи в 1,01-1,14 раз показывают, что интенсификация не связана с увеличением площади поверхности теплообмена. Нанесение сферических выемок несколько ухудшило условия теплообмена на поверхности выемок. Однако, как было показано ранее, нанесение выемок снизило прирост аэродинамического сопротивления пучков труб.

Сравнение эффективности пучков теплообменных труб при шахматной компоновке и различными вариантами нанесения вихрегенераторов производилось с использованием безразмерного комплекса  $(Nu_d/Nu_{d0})/(Eu/Eu_0)$  (рис.6). Во всем диапазоне исследуемых чисел  $Re=(8-30)\cdot 10^3$  наибольшая теплоаэродинамическая эффективность характерна для пучков труб №3 с площадью нанесения вихрегенераторов 100%. Теплоаэродинамическая эффективность данных пучков составила  $(Nu_d/Nu_{d0})/(Eu/Eu_0)=1,1$ . Эффективность труб №2 с площадью нанесения вихрегенераторов 75% соответствует уровню гладкого канала. Однако интенсификация теплоотдачи в данных каналах составляет 1,1 раза. Наименьшая эффективность наблюдается у пучка труб №1 с площадью нанесения вихрегенераторов 50%. Уровень эффективности ниже гладкого канала и составляет в среднем 0,95 раз, несмотря на то, что уровень интенсификации теплоотдачи составляет порядка 1,05 раз

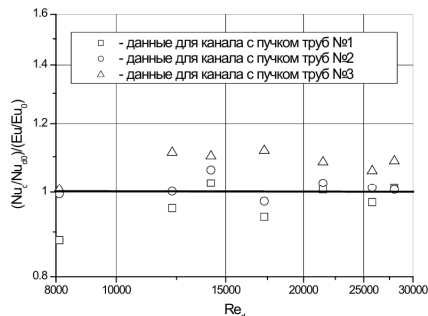


Рис.6. Теплоаэродинамическая эффективность каналов с пучками труб при шахматной компоновке

### 3.2. Коридорный пучок

Результаты экспериментального исследования аэродинамического сопротивления в канале с пучками труб коридорной компоновки при различных вариантах нанесения вихрегенераторов представлены на рис.7. Показано, что в каналах с пучками труб №1 и №2 и №3 сопротивление возросло в среднем в 1,1 – 1,3 раз. Таким образом, нанесение сферических выемок незначительно увеличило коэффициент аэродинамического сопротивления пучков труб при коридорной компоновке. Хотя при подобной компоновке на плоской поверхности увеличение сопротивления составляло бы 2,5 – 4 раза. На рис. 8 показано распределение коэффициентов теплоотдачи в различных пучках труб при коридорной компоновке. Уровень теплоотдачи

ряда №1 составляет 77%, а ряда №2 – 90% от уровня теплоотдачи третьего и четвертого рядов. Это качественно согласуется с литературными данными, в которых указывается, что теплоотдача первого ряда составляет 60%, а второго приблизительно 90% от теплоотдачи третьего и последующего рядов.

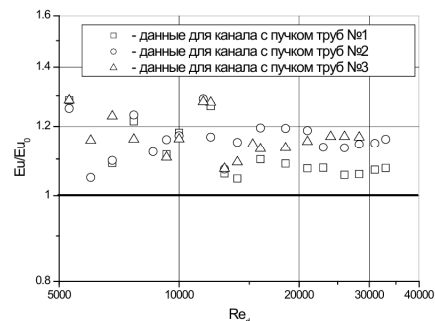


Рис.7. Результаты экспериментального исследования аэродинамического сопротивления в канале с пучком труб при коридорной компоновке

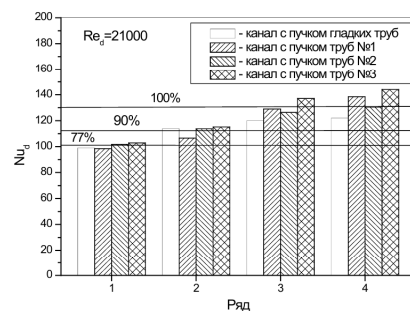


Рис.8. Теплоотдача в различных рядах пучков труб при коридорной компоновке

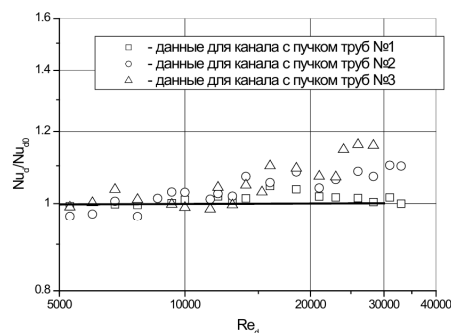


Рис.9. Результаты экспериментального исследования теплоотдачи в канале с пучком труб при коридорной компоновке

Установлено, что наибольшая интенсификация теплоотдачи характерна для труб №3 (рис.9) и составляет 1,05 – 1,16 раз. Наименьшая интенсификация теплоотдачи наблюдается в пучках труб №1 и в среднем составляет 1,02 раз в диапазоне  $Re=(1-3,5)\cdot 10^4$ .

При коридорной компоновке пучков теплообменных труб уровень теплоаэродинамической эффективности (рис.10) во всем диапазоне исследуе-

мых чисел  $Re$  ниже, чем эффективность гладкотрубного пучка. Наименьшая эффективность у пучка труб №1 и №2 и составила в среднем 0,9 в диапазоне  $Re=(15-34)\cdot 10^3$ . Наибольшая эффективность в этом диапазоне  $Re$  у пучков труб №3 с площадью нанесения вихрегенераторов 100% и составляет 0,98 – 1, при этом уровень интенсификации теплоотдачи составляет 1,1-1,16 раз.

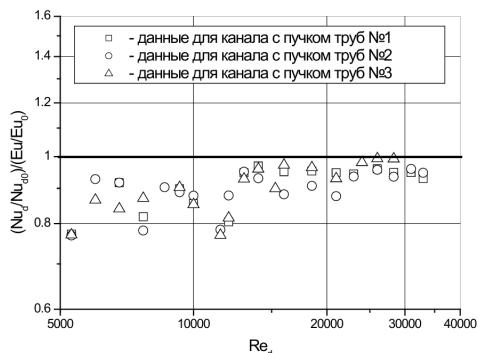


Рис.10. Теплоаэродинамическая эффективность каналов с пучками труб при коридорной компоновке

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено исследование сопротивления шахматных и коридорных пучков труб с различными компоновками вихрегенераторов на поверхностях, распределения локальных коэффициентов теплоотдачи по длине окружности труб, распределения теплоотдачи в рядах труб и средней теплоотдачи пучков труб.

Наибольшая теплоаэродинамическая эффективность выявлена для пучков труб с площадью нанесения вихрегенераторов 100% при шахматной компоновки и составила 1,1. Наименьшая эффективность наблюдается у пучка труб с площадью нанесения вихрегенераторов 50% и составила 0,95, что ниже эффективности гладкого канала.

Наибольшая теплоаэродинамическая эффективность для пучков труб с площадью нанесения вихрегенераторов 100% при коридорной компоновки и составила 0,98 – 1,0. Наименьшая эффективность для пучка труб с площадью нанесения вихрегенераторов 50 и 75% и составила в среднем 0,89.

Исследования сопротивления пучков труб выполнены в рамках соглашения с Министерством науки и образования РФ № 075-03-2020-051/3 (№ гос.рег.НИОКТР АААА-А20-120102190039-6), исследования теплоотдачи – в рамках гранта РФФИ 20-58-04002 и грантах БРФФИ Т21РМ-019 и Ф21МС-011.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Eiffel G.**, Experiences sur la resistance de l'air, Comptes Rendus, Vol. 137, 1903, Pp. 30-32.
2. **Prandtl L.** Hydroaeromechanika. - Izhevsk: SIC "Regular and chaotic dynamics", 2000, - 576 p.

3. **Landau L. D., Lifshits E. M.** Hydrodynamics. Theoretical Physics: in 10 t. t. 6. Moscow: Nauka, 1986. 736c.
4. **Yurchenko N., River R., Pavlovsky R.** Control of the profile aerodynamics using streamwise vortices generated in a boundary layer / Proc. World Congress "Aviation in the XXI-st Century". Kyiv, Ukraine. 2003, Pp.14-16.
5. **Kalinin E.K., Dreitser G.A., Kopp I.Z., Myakotchin A.S.** Efficient Surfaces for Heat Exchangers Fundamentals and design. New-Work, 2002
6. **Gortyshov Yu. F., Popov I. A., Olympiev V. V., Shchelchikov A.V., Kaskov S. I.** Thermohydraulic efficiency of promising methods of heat transfer intensification in heat exchange equipment channels. Intensification of heat exchange: monograph - Kazan: Center of Innovative Technologies, 2009 – - 531 p.
7. **Isaev S. A., Baranov P. A., Gortyshov Yu. F., Guvernyuk S. V., Mazo A. B., Smurov M. Yu., Sudakov A. G., Usachov A. E., Kharchenko V. B.** Aerodynamics of thickened bodies with vortex cells. Numerical and physical modeling. - St. Petersburg: Polytech University Publishing House. 2016 – 215 p.
8. **Zheng P.** Detached currents (in 3 volumes). - Moscow, Mir, 1972 – - 916 p.
9. **Roshko, A.** On the drag and shedding frequency of bluff cylinders. Nat. Adv. Comm. Aero., Wash., Tech. 1954, Note 3169
10. **Igarashi T.**, Correlation between heat transfer and fluctuating pressure in separated region of a circular cylinder, International Journal of Heat and Mass Transfer, Volume 27, Issue 6, 1984, Pp. 927-937.
11. **Zhdanov, V., Kukharchuk, I., Terekhov V.** Velocity field behind a plate installed in the inner region of a turbulent boundary layer. Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 2020. Vol. 93, No. 5, pp. 1233–1239.
12. **Dyachenko A. Yu., Zhdanov V. L., Smulsky Ya. I., Terekhov V. I.** Experimental study of heat transfer in the separation region behind the reverse ledge in the presence of tabs. Thermophysics and Aeromechanics, 2019, volume 26, N 4, 549 – 560
13. **Baranova T. A., Zhdanov V. L., Zhukova Yu.V., Isaev S. A.**, Reduction of Resistance and Heat Transfer Enhancement in Flow Past a Cylinder with Jet and Vortex Generators, Heat Transfer Research, Vol. 41, No. 4, pp. 401-411, 2010.
14. **Zukauskas A. A.** Convective transfer in heat exchangers. Moscow: Mir, 1982.
15. **Баранова Т.А., Данильчик Е.С., Жукова Ю.В., Кадыров Р.Г., Маршалова Г.С., Миронов А.А., Попов И.А., Скрышник А.Н., Чорный А.Д.** Сопротивление и теплообмен одиночной трубы с поверхностными генераторами вихрей // Тепловые процессы в технике. 2021. Т. 13. №11. С. 495–508
16. **Кадыров Р.Г., Миронов А.А., Попов И.А., Жукова Ю.В., Маршалова Г.С., Данильчик Е.С.** Теплоотдача и сопротивление пучков труб с вихрегенераторами // XXXVII Сибирский теплофизический семинар. Тезисы докладов. 14 – 16 сентября 2021. Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН, 2021. С.47.

Маршалова Г.С.<sup>1,2</sup>, Баранова Т.А.<sup>1</sup>, Жукова Ю.В.<sup>1</sup>, Чорный А.Д.<sup>1</sup>, Сухоцкий А.Б.<sup>2</sup>,

Данильчик Е.С.<sup>1,2</sup>, Миронов А.А.<sup>3</sup>, Кадыров Р.А.<sup>3</sup>, Попов И.А.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси,  
220072, Минск, ул. П.Бровки, 15

<sup>2</sup>УО «Белорусский государственный технологический университет», г. Минск  
220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а

<sup>3</sup>ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.Туполева –  
КАИ», 420111, Казань, ул. К.Маркса, 10

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА И АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ АППАРАТОВ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ С ВЫТЯЖНОЙ ШАХТОЙ

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Аппараты воздушного охлаждения (АВО) являются составной частью оборудования тепло-технологических процессов в нефтеперерабатывающей, химической, нефтехимической, газовой и пищевой промышленности, а также применяются на автомобильных газонаполнительных компрессорных станциях [1], в тепло- и электроэнергетике [3, 4], в холодильной технике, в деревообрабатывающей промышленности [5], на атомных станциях [6]. По данным работы [7] в странах Евразийского экономического союза в настоящее время работает около 52 000 АВО с установленной мощностью 1,93·10<sup>6</sup> кВт.

Для оптимизации работы АВО используются различные подходы и методы – как активные (например, установка вентиляторов, ионизация воздуха на входе в камеру АВО), так и пассивные (например, развитие площади теплопередающей поверхности, изменения режима течения в камере АВО за счет профилирования геометрической формы камеры за пучком теплопередающих труб и др.). При профилировании геометрической формы камеры за теплообменным пучком, например, при установке вытяжной шахты, изменяется характер течения воздуха, то есть функционально работа вытяжной шахты в качестве побудителя движения воздуха через теплообменные секции качественно подобна всасывающему действию вентилятора. Принципиальное отличие между способами ускорения потока в камере с теплообменными трубами состоит в том, что установка шахты не требует подвода энергии извне в явном виде и, таким образом, осуществляется интенсификация теплообмена в пучках секций пассивным способом, конечным результатом которого является соответствующая величина энергосбережения. Также применение вытяжной шахты позволяет исключить рециркуляцию воздуха в теплообменнике и повышает срок службы вентиляторов с приводами.

При эксплуатации АВО с вытяжной шахтой необходимо строго соблюдать температурные режимы и точно их регулировать [8]. Для этого необходима достоверная информация о характере теплоотдачи пучков оребренных труб в режимах есте-

ственной и смешанной конвекции воздуха. Однако в настоящее время отсутствуют методики теплового расчета АВО в этих режимах, а известные исследования смешанной конвекции воздуха [9–15] не охватывают распространенные компоновочные параметры пучков, не учитывают влияние аэродинамических характеристик и геометрических параметров вытяжной шахты, не предлагают рекомендаций на проектирование АВО.

При этом проведение экспериментальных исследований по изучению свободной и смешанной конвекции требует значительных расходов на реализацию, высокой мощности оборудования, а также больших временных затрат. Проведение экспериментальной визуализации структуры течения в камере АВО затруднено, поскольку накладываются значительные требования как на соблюдение фиксированного температурного режима, так и на оборудование для визуализации. Поэтому экспериментально охватить весь желаемый диапазон вариантов компоновок пучков, режимов конвективного теплообмена и методов интенсификации теплообмена, а также провести визуализацию структуры течения в камере не представляется возможным. Решением этой проблемы может выступить применение методов вычислительной газодинамики (CFD – computational fluid dynamics), которые позволяют расширить границы экспериментальных исследований.

Целью данной работы является численное исследование конвективного теплообмена четырехрядных шахматных равносторонних пучков аппаратов воздушного охлаждения с вытяжной шахтой, а также оценка влияния вытяжной шахты на теплоотдачу пучков оребренных труб в режимах естественной и смешанной конвекции воздуха.

### 2. РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ

Сопоставление численных исследований с экспериментальными проводились для модели АВО, состоящей из четырех рядов ( $z = 4$ ) шахматно расположенных оребренных труб с диаметром несущей трубы  $d_0 = 0,0264$  м. Поперечный шаг пучка составлял  $S_1 = 0,058$  м (безразмерный шаг  $S_1/d_0 = 2,2$ ). Трубы в пучке имели следующие геометрические параметры: наружный диаметр трубы