

УДК 621.9

## ТЕПЛОТДАЧА И СОПРОТИВЛЕНИЕ ПУЧКОВ ТРУБ С ВИХРЕГЕНЕРАТОРАМИ

Кадыров Р.Г.<sup>1</sup>, Миронов А.А.<sup>1</sup>, Попов И.А.<sup>1</sup>, Жукова Ю.В.<sup>2</sup>, Маршалова Г.С.<sup>2,3</sup>, Данильчик Е.С.<sup>2,3</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, Республика Беларусь, Минск, ул. П. Бровки, 15

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

Г.Эйфелем было обнаружено при  $Re_d=1,5 \cdot 10^5$  явление снижение аэродинамического сопротивления шара из-за возникновения в пограничном слое турбулентного течения и смещения точки отрыва вниз по течению по поверхности шара из-за значительного сужения области застойного течения за телом, и приближения распределения давления за телом обтекания схожим к распределению давления при течении без трения. Л.Прандтль принудительно смещал начало турбулентного течения в погранслое в область умеренных чисел Рейнольдса за счет установки на шар искусственного турбулизатора - проволочное кольцо. Дюбуа подтвердил, что свободная турбулентность потока за телом обтекания вызывает переход к турбулентному движению в пограничном слое.

В работе рассматриваются вопросы повышения теплогидравлической эффективности пучков теплообменных труб за счет развития их поверхности генераторами вихрей, в качестве которых использованы системы сферических выемок.

Объект исследования – цилиндры с генераторами вихрей в виде полусферических выемок при их различной компоновке на поверхности. Предмет исследования – режимы обтекания, сопротивление одиночных и пучков труб со сферическими выемками, локальные и средние коэффициенты теплоотдачи труб в рядах и пучках цилиндров при поперечном обтекании. Методы исследования – экспериментальный с привлечением численного моделирования конвективного теплообмена методом RANS для оценки интегральных характеристик течения и метода LES для оценки структуры течения.



Рис.1. Размеры цилиндров с системами выемок

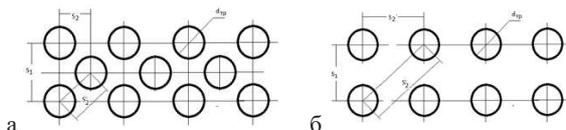


Рис.2. Схемы расположения опытных образцов в рабочем участке: а – шахматное, б – коридорное

Размеры опытных образцов (рис.1): длина 0,076 м, внешний диаметр труб  $d=0,022$  м. Выемки на опытных

образцах наносились на внешнюю поверхность в шахматном порядке и занимали 50, 75 и 100 % от внешней поверхности трубы. Увеличение площади поверхности труб составляет  $f=1,21; 1,31; 1,41$ , соответственно. Основные геометрические размеры выемок на опытных образцах: диаметр выемок  $d_b=0,006$  м, глубина выемок  $h=0,003$  м,  $h/d_b=0,5$ , продольный шаг  $t=0,012$  м, поперечный (по винтовой линии) шаг выступов  $s=0,008$  м.

Пучки труб в рабочем участке исследовались при коридорном и шахматном расположении (рис.2) при продольных  $S_1$  и поперечных  $S_2$  шагах образцов. При шахматном расположении (компоновке) труб в пучке -  $S_1=0,044$  м и  $S_2=0,022$  м,  $a=S_1/d$  и  $b=S_2/d$ ,  $a \times b=2 \times 1$ . При коридорном расположении -  $S_1=0,044$  м и  $S_2=0,044$  м,  $a=S_1/d$  и  $b=S_2/d$  шагов и  $a \times b=2 \times 2$ .

Первоначально проведено численное исследование обтекания одиночных труб. Установлено, что нанесение выемок сохраняет или незначительно увеличивает коэффициент трения и уменьшает средний коэффициент теплоотдачи одиночной трубы с выемками. В ходе численных и экспериментальных исследований выявлено, что точка отрыва за счет нанесения выемок практически при всех схемах их нанесения смещает точку отрыва с позиции  $70-75^\circ$  на позицию  $90-100^\circ$ . Размер зоны отрыва за цилиндрами меняется мало, однако изменяется ее структура – выемки уменьшают формирование мелкомасштабных вихревых структур по границе зоны смешения.

В ходе экспериментального исследования установлено, что при обтекании труб прирост коэффициентов теплоотдачи за счет нанесения выемок при их различной компоновке резко отличается от ранее описанных значений интенсификации на плоских поверхностях и составляет  $Nu/Nu_{пл}=5-30\%$  даже при нанесении относительно глубоких выемок  $h/d_b=0,5$ . Это связано с различием механизмов воздействия генераторов вихрей на поток на плоской поверхности и поверхности цилиндров. Увеличение сопротивления пучков труб было сопоставимо с ростом коэффициентов теплоотдачи, и теплогидравлическая эффективность труб с выемками при их различной компоновке составила  $Nu/Nu_{пл}/(Eu/Eu_{пл})=0,9-1,1$ .

Полученные экспериментальные данные позволили верифицировать алгоритм численного исследования конвективного теплообмена нагретых труб, омываемых потоком воздуха.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант T21PM-019) и Российского фонда фундаментальных исследований (грант 20-58-04002 Бел\_мол\_а)*