

УДК 621.1.016: 536.242

О ВЛИЯНИИ ГЕОМЕТРИИ КОРИДОРНОГО ТРУБНОГО ПУЧКА НА ЕГО ТЕПЛОТДАЧУ В ПОПЕРЕЧНОМ ПОТОКЕ*

Канд. техн. наук, доц. СМОЛЯК А. А.

Могилевский государственный университет продовольствия

Теплоотдача пучков труб в поперечном потоке к настоящему времени достаточно хорошо исследована многими авторами. По современным представлениям, при поперечном обтекании коридорного пучка трубки предыдущего ряда закрывают (затеняют) от потока трубки последующего ряда. За обтекаемой трубкой образуется застойная вихревая зона. Движение в этой зоне в значительной мере зависит от относительного продольного шага $\sigma_2 = S_2/d$. При уменьшении продольного шага вихревое движение тормозится. Это приводит к более слабому омыванию кормовой части трубки, более сильному затенению последующей трубки и, следовательно, к уменьшению средней теплоотдачи от поверхности трубки в пучке.

Основной поток жидкости в коридорном пучке течет между трубками рядов без изменения направления. Приближенно этот поток можно рассматривать как движущийся в плоском канале. Ширина канала является определяющим размером для характеристики движения и теплообмена. Поэтому и величина поперечного шага также должна влиять на теплоотдачу коридорного пучка труб. Но такое влияние значительно слабее. По этой причине в уравнениях подобия для коридорных пучков чаще всего предлагается учитывать только влияние продольного относительного шага.

* Публикуется в порядке обсуждения.

Однако имеются крайне противоречивые сведения о влиянии продольного шага на теплоотдачу коридорного пучка труб. В учебной литературе по теплообмену [1–9 и др.], как правило, влияние относительного продольного шага предлагается учитывать множителем

$$\varepsilon_s = (S_2/d)^{-0,15}. \quad (1)$$

с отрицательным показателем степени. В соответствии с этим множителем при уменьшении продольного шага коэффициент теплоотдачи должен возрастать.

Однако это противоречит физическим представлениям, изложенным выше, и не подтверждается специальными исследованиями по этому вопросу. Еще в обобщениях для газов [10] отмечены снижение теплоотдачи коридорного пучка с уменьшением продольного шага, а также некоторое влияние поперечного шага. В работах по теплоотдаче пучков труб в потоке жидкостей [11] также выявлен эффект затенения. Аналогичная, хотя и более сложная, зависимость от продольного относительного шага имеет место, по данным ВТИ и ЦКТИ, для газов [12]. В специальной учебной литературе [13, 14 и др.] влияние относительного шага пучка на теплоотдачу предлагается учитывать с помощью графической информации, взятой из [12].

В учебнике по теплопередаче [1] даются ссылки на источники справочной информации. Множитель (1) в нем приводится со ссылкой на работу [15]. Других оригинальных исследований, в которых подтверждается такой обратный характер зависимости теплоотдачи от продольного шага, нами не найдено.

В [15] для каждого из исследованных коридорных пучков находилось уравнение вида

$$Nu = CRe^n Pr^{0,33} (Pr/Pr_c)^{0,25}, \quad (2)$$

где числа подобия без индексов определялись при температуре потока, а число Прандтля Pr_c – при температуре стенки. Влияние геометрических характеристик пучка определялось по изменению коэффициента C .

Результаты [15] весьма обстоятельны. С ними согласуются данные других более поздних работ [11, 16]. Но в [15] исследована теплоотдача коридорных пучков с тремя продольными относительными шагами в широком интервале их значений: $\sigma_2 = 1,24; 2,0$ и $4,0$. В [10–14] рассматриваются более узкие интервалы продольного относительного шага: $\sigma_2 = 1,33–3,0$. Это ближе к шагам, практически применяемым в теплообменной аппаратуре.

Широкий интервал значений позволяет более надежно выявить зависимость исследуемой величины от данного фактора. Но пучок с продольным относительным шагом $\sigma_2 = 1,24$ уже фактически является тесным пучком. Расстояние между продольными трубками в нем меньше диаметра возникающих вихрей. В тесных коридорных пучках при уменьшении продольного шага вихревое движение между стоящими друг за другом трубками угнетается, трубки все менее обтекаются потоком, а течение приближается к течению в продольном канале с волнистой поверхностью.

Пучок с продольным шагом $\sigma_2 = 4,0$ относится к сильно разреженным пучкам. В нем расстояние между трубками в продольном направлении намного превосходит диаметр вихрей, возникающих за трубкой. В таких условиях имеется возможность как отрыва вихрей за трубкой, так и их частичного затухания до встречи со следующей трубкой. Турбулизирующее воздействие пучка на поток при увеличении продольного шага может меняться немонотонно. Большое расстояние между рядами труб способствует перемешиванию и выравниванию поля скоростей. Течение перестает быть чисто коридорным, и пучок труб превращается в «решетчатый». Обтекание трубок в таком пучке приближается к обтеканию одиночного цилиндра.

Таким образом, крайние из трех значений продольного относительного шага исследованных в [15] коридорных пучков практически выходят за пределы того интервала, для которого хорошо изучены особенности обтекания труб и рекомендуются расчетные критериальные уравнения, подтверждаемые в разных исследованиях. При этих крайних значениях возможны заметные отличия в характере обтекания от уже традиционных представлений. Можно предположить, что это явилось одной из причин получения зависимости теплоотдачи от продольного относительного шага, не подтверждаемой другими авторами. Естественно, что эти предположения требуют дополнительного экспериментального подтверждения в области тесных и сильно разреженных в продольном направлении коридорных пучков.

Заметим, что по рекомендациям [12–14] при $\sigma_2 \geq 1,8$ влияние геометрических характеристик коридорного пучка на теплоотдачу отсутствует и поправочный коэффициент $\varepsilon_s = 1$.

Вызывает некоторые вопросы и форма представления зависимости. Значение $\varepsilon_s = 1$ множитель вида (1) имеет место при $S_2 = d$. Но такая компоновка при коридорном расположении труб, когда отсутствует продольный зазор между трубками, уже не является пучком труб в традиционном представлении. В ней принципиально меняется характер течения, поперечное обтекание труб отсутствует и уравнения для расчета теплоотдачи пучков труб неприменимы.

Предпочтительным представляется множитель вида $\varepsilon_s = (S_1/S_2)^n$ или $\varepsilon_s = (\sigma_1/\sigma_2)^n$, как это применяется для шахматных пучков. При таком виде зависимости базовым пучком отнесения, для которого $\varepsilon_s = 1$, является пучок с одинаковыми шагами $S_1 = S_2$ или $\sigma_1 = \sigma_2$.

Фундаментальные исследования теплоотдачи на большом количестве коридорных пучков, отличающихся шаговыми отношениями, выполнены в [11].

Автором при исследовании теплоотдачи пучков труб в потоке вязких жидкостей [16] дополнительно была исследована теплоотдача четырех коридорных пучков. Пучки состояли из труб диаметром 12 мм и имели относительные шаги $\sigma_1 \times \sigma_2$: 1,67×1,67; 1,67×2,0; 2,0×1,67; 2,0×1,33. Схема установки и методика исследований подробно изложены в [16, 17]. Они аналогичны тем, которые применялись в [11, 15] и других подобных исследованиях. Средняя теплоотдача трубки в пучках определялась методом локального моделирования для глубинных (5-й и 6-й) рядов. Для получения

более достоверных результатов на каждом из пучков была выполнена серия опытов на 8–13 режимах в небольших интервалах чисел Рейнольдса $Re_{ж} = 20–110$ и чисел Прандтля $Pr_{ж} = 760–1335$.

При обработке результатов теплоотдачи пучков с различными относительными шагами представлена в виде относительной величины Nu/Nu_0 . Здесь Nu – число Нуссельта, определенное по результатам измерений на исследуемом пучке; Nu_0 – значение числа Нуссельта для базового пучка с относительными шагами $\sigma_1 \times \sigma_2 = 1,67 \times 1,67$, т. е. при $\sigma_1/\sigma_2 = 1$. Это значение вычислялось при соответствующих значениях чисел Рейнольдса и Прандтля по уравнению, полученному ранее для такого пучка на той же установке [16]. Результаты дополнительных измерений на базовом пучке при этом должны группироваться возле значения $Nu/Nu_0 = 1$. Результаты обработки представлены на рис. 1а, б.

На рис. 1а показана зависимость теплоотдачи от продольного относительного шага $\sigma_2 = S_2/d$. Из рисунка видно, что при уменьшении продольного относительного шага теплоотдача не увеличивается, а уменьшается. Таким образом, полученный результат качественно согласуется с результатами других исследований и противоречит функции (1).

На рис. 1б показана зависимость теплоотдачи от шагового отношения S_1/S_2 . Эта зависимость аппроксимируется выражением

$$\varepsilon_s = (S_1/S_2)^{-0,2}. \quad (3)$$

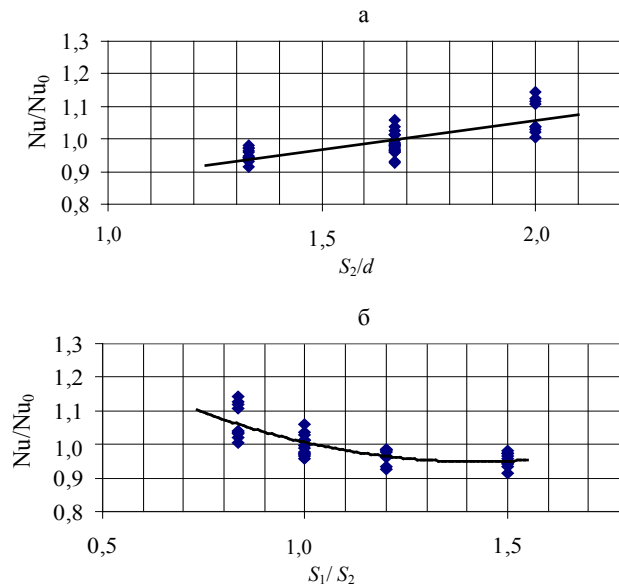


Рис. 1. Влияние геометрических характеристик коридорного трубного пучка на теплоотдачу

Выражение (3) также показывает, что с уменьшением продольного шага теплоотдача коридорного пучка уменьшается. Но оно учитывает и влияние поперечного шага.

Линии тренда, аппроксимирующие полученные результаты, на обоих графиках проходят через значение $Nu/Nu_0 = 1$ при характеристиках базового

го пучка $S_2/d = 1,67$ и $S_1/S_2 = 1$. Это является подтверждением хорошей воспроизводимости условий эксперимента на различных пучках.

Множитель (3) получен для наиболее применяемых в практике шаговых отношений $S_1/S_2 = 0,83-1,5$ и относительных шагов $S/d = 1,33-2,0$. Обобщения по теплоотдаче коридорных пучков в потоке газов [10–12] показывают, что влияние относительных шагов на теплоотдачу труб в коридорном пучке более сложное. Однако численно множитель (3) коррелирует с графическими зависимостями, приведенными в [10–12], при значениях $\sigma_1 = 1,5-2,5$. Учитывая небольшие значения этой поправки, множитель (3) можно рекомендовать для технических расчетов и при $S_1/S_2 < 1,5$. При $S_1/S_2 \geq 1,5$ рекомендуется принимать $\varepsilon_s = 0,95$.

ВЫВОДЫ

1. Анализ литературных источников и результатов исследований автора показывают, что множитель $\varepsilon_s = (S_2/d)^{-0,15}$, учитывающий влияние продольного шага на теплоотдачу труб в коридорном пучке, принятый в учебной литературе на основании [15], не подтверждается другими исследованиями. Результаты исследований других авторов показывают обратную зависимость, т. е. снижение теплоотдачи при уменьшении продольного шага.

2. Для инженерных расчетов предлагается учитывать влияние геометрических характеристик коридорного пучка следующим множителем:

$$\begin{aligned} \text{при } S_1/S_2 < 1,5 & \quad \varepsilon_s = (S_1/S_2)^{-0,2}; \\ \text{при } S_1/S_2 \geq 1,5 & \quad \varepsilon_s = 0,95. \end{aligned}$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Исаченко, В. П. Теплопередача / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.
2. Нащокин, В. В. Техническая термодинамика и теплопередача / В. В. Нащокин. – М.: Высш. шк., 1980. – 469 с.
3. Теплотехника / М. М. Хазен [и др.]; под ред. Г. А. Матвеева. – М.: Высш. шк., 1981. – 480 с.
4. Теплотехника / А. М. Архаров [и др.]; под общ. ред. В. И. Крутова. – М.: Машиностроение, 1986. – 432 с.
5. Теоретические основы хладотехники. Тепломассообмен / С. Н. Богданов [и др.]; под ред. Э. И. Гуйго. – М.: Агропромиздат, 1986. – 320 с.
6. Теплотехника / А. П. Баскаков [и др.]; под общ. ред. А. П. Баскакова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 223 с.
7. Телегин, А. С. Тепломассоперенос / А. С. Телегин, В. С. Швыдкий, Ю. Г. Ярошенко; под ред. Ю. Г. Ярошенко. – М.: Академкнига, 2002. – 454 с.
8. Теплотехника / А. М. Архаров [и др.]; под общ. ред. А. М. Архарова, В. Н. Афанасьева. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – 711 с.
9. Тепло- и массообмен / Б. М. Хрусталева [и др.]; под общ. ред. А. П. Несенчука. – Минск: БНТУ, 2007. – 607 с.
10. Grimson, E. D. Correlation and Utilisation of New Data on Flow Resistances and Heat Transfer for Cross Flow of Gases Over Tube Banks / E. D. Grimson // Trans. ASME. – 1937. – Vol. 59, № 7. – P. 583–594.

11. Ж у к а у с к а с, А. А. Теплоотдача пучков труб в поперечном потоке жидкости / А. А. Жукаускас, В. И. Макаравичюс, А. А. Шланчяускас. – Вильнюс: Минтис, 1968. – 188 с.
12. Т е п л о в о й расчет котельных агрегатов (нормативный метод) / под ред. Н. В. Кузнецова [и др.]. – М.: Энергия, 1973. – 296 с.
13. Р о д д а т и с, К. Ф. Котельные установки / К. Ф. Роддатис. – М.: Энергия, 1977. – 432 с.
14. Л и п о в, Ю. М. Компоновка и тепловой расчет парового котла / Ю. М. Липов, Ю. Ф. Самойлов, Т. В. Виленский. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 208 с.
15. И с а ч е н к о, В. П. Влияние межтрубного расстояния на теплоотдачу коридорных пучков труб, омываемых поперечным потоком воды / В. П. Исаченко, Ф. Соломзода // Теплоэнергетика. – 1960. – № 8. – С. 79–82.
16. С м о л я к, А. А. Экспериментальное исследование теплоотдачи пучков труб в поперечном потоке вязких жидкостей / А. А. Смоляк // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений). – 1978. – № 9. – С. 91–96.
17. С м о л я к, А. А. Экспериментальное исследование теплоотдачи вязких жидкостей при поперечном обтекании цилиндра / А. А. Смоляк // Весці АН БССР. Сер. фіз.-энерг. навук. – 1977. – № 4. – С. 99–104.

Представлена кафедрой теплохладотехники

Поступила 12.12.2008

УДК 532.517; 621.928

ДВИЖЕНИЕ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ В ЗАКРУЧЕННОМ ПОТОКЕ

Канд. техн. наук, доц. ВОЛК А. М.

Белорусский государственный технологический университет

Процессы разделения многофазных систем являются составной частью многих технологических процессов в химической, пищевой, нефтехимической, микробиологической, энергетической и других отраслях промышленности [1, 2].

Вихревые аппараты позволяют значительно интенсифицировать процессы разделения, межфазного тепло- и массообмена, создавать гидродинамические режимы с относительно высокими скоростями частиц и среды, значительными центробежными ускорениями [3, 4].

Математическое моделирование технологических процессов позволяет найти оптимальные соотношения между геометрическими и режимными параметрами, значительно повысить интенсивность и эффективность процессов разделения [5]. Важным моментом для исследования движения частицы в потоке и особенно вблизи проницаемой поверхности является учет