

УДК 536.24

Определение коэффициента теплоотдачи при поперечном обтекании трубного пучка методами численного моделирования и с помощью критериальных уравнений

Шевелев Денис Владимирович denis.v.shevelev@bmstu.ru

Жинов Андрей Александрович azhinov@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Определен коэффициент теплоотдачи при поперечном обтекании трубного пучка коридорного типа воздушным потоком при сопряженном теплообмене методами численного моделирования и с использованием известных критериальных уравнений. Сравнение полученных результатов для среднего коэффициента теплоотдачи показало значительное их расхождение. Определена погрешность нахождения коэффициента теплоотдачи рассмотренными методами и даны рекомендации по их применению. Полученные результаты могут быть полезны при численном моделировании теплообмена в аппаратах с поперечным обтеканием трубных пучков.

Ключевые слова: конвективный теплообмен, коэффициент теплоотдачи, численное моделирование, CFD, расчетная сетка, трубный пучок, критериальное уравнение, верификация

При проектировании современного теплообменного оборудования для решения сопряженных задач «газодинамика-теплообмен», наряду с традиционными методами, основанными на теории подобия и критериальных уравнениях, все чаще пользуются численными методами [1], заложенными в специализированные компьютерные программы, такие как Star-CCM+, Siemens FLOEFD, FlowVision, OpenFOAM и др.

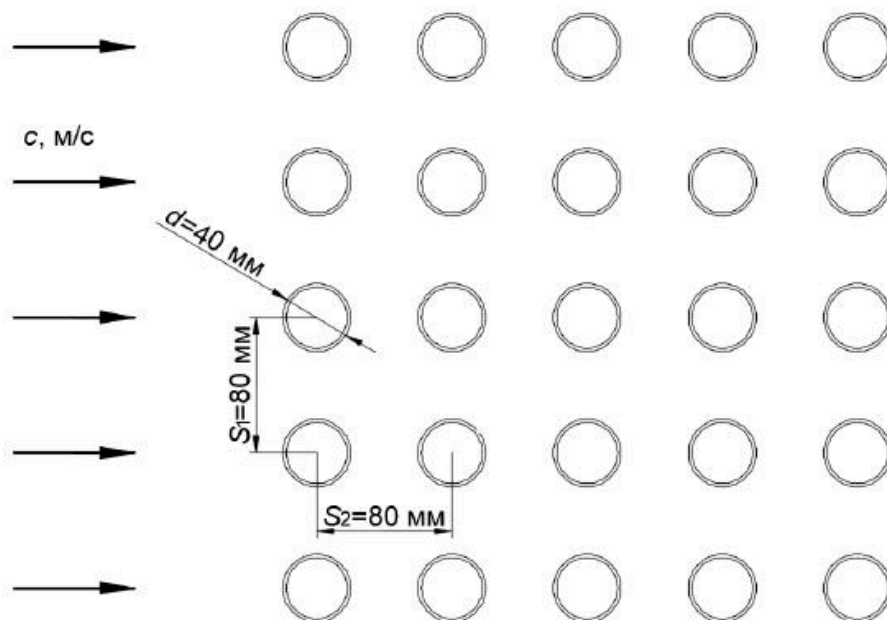
При сложной картине течения в реальных теплообменных аппаратах всегда возникает потребность оценки достаточности степени детализации расчетной сетки, принятой в численной модели, а также оценки адекватности получаемых результатов моделирования. Оценить эту адекватность можно путем сравнения результатов полученного при численном моделировании среднего коэффициента теплоотдачи с аналогичным, полученным с помощью критериальных уравнений, описывающих теплообмен при подобных условиях.

Сложность заключается в том, что вариантов критериальных уравнений для однотипных задач существует, как правило, несколько, и не ясно с чем сравнивать.

В данной работе проведено исследование сопряженного теплообмена при обтекании воздухом трубного пучка, представленного на рисунке.

В качестве граничных условий были выбраны параметры, характерные для воздухоохлаждаемых теплообменных аппаратах [2]. Для натекающего воздушного потока была задана температура $t_{\text{ж}} = 292 \text{ K}$ ($20 \text{ }^{\circ}\text{C}$), наружная

поверхность труб имела температуру $t_{\text{ст}}=333$ К (60 °С). Скорость воздуха, натекающего на трубный пучок, составляла $c = 4,23$ м/с. Теплофизические свойства воздуха при $t_{\text{ж}} = 313$ К (40 °С) определялись согласно [2].



Геометрические характеристики исследуемого трубного пучка

Численное моделирование проводилось при различной густоте расчетной сетки. Расчеты показали, что использование для данной плоской задачи адаптивной сетки со средним количеством ячеек на поверхности одной трубки более 150, дает практически идентичные показатели по коэффициенту теплоотдачи [3]. Средний коэффициент теплоотдачи по характерной трубке (четвертый по ходу воздуха ряд, средняя трубка) составил $\alpha = 51,6\text{--}63,1$ Вт/(м² · К).

Известно несколько работ по определению критериальных уравнений, описывающих конвективный теплообмен при наружном обтекании трубных пучков. Все они определяют уравнение вида

$$\text{Nu} = f(\text{Re}, \text{Pr}). \quad (1)$$

Далее, после нахождения числа Нуссельта Nu , можно рассчитать и коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha = \frac{\text{Nu} \cdot \lambda}{d}. \quad (2)$$

В работе [4] Михеевым М.А. для определения коэффициента теплоотдачи при поперечном обтекании коридорного трубного пучка ($\text{Re} > 1 \cdot 10^3$) рекомендуется уравнение вида

$$\text{Nu} = 0,22 \text{Re}^{0,65} \text{Pr}^{0,36} \left(\frac{\text{Pr}_{\text{ж}}}{\text{Pr}_c} \right)^{0,25}. \quad (3)$$

В работе [5] Жукаускасом А. рекомендуется похожая зависимость

$$Nu = 0,26 Re^{0,65} Pr^{0,33} \left(\frac{d}{s_2}\right)^{0,15} \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_c}\right)^{0,25}. \quad (4)$$

В зависимостях (1) и (2) в качестве определяющего размера принимается наружный диаметр трубы, в качестве определяющей скорости — скорость потока в узком сечении трубного пучка; для определения теплофизических параметров потока, определяющей является средняя температура жидкости

$$T_{cp} = \frac{T_{ж} - T_c}{2}. \quad (5)$$

В работе [6] Бэрм Х. для расчета коэффициента теплоотдачи при обтекании трубного пучка рекомендуется определять число Nu для случая обтекания круглого цилиндра (6) с введением поправочного коэффициента на тип трубного пучка (10):

$$Nu = \sqrt{Nu_{lam}^2 + Nu_{turb}^2}, \quad (6)$$

где

$$Nu_{lam} = \frac{1}{\sqrt{\pi}} Re^{0,5} \varphi_1(Pr()); \quad (7)$$

$$\varphi_1\left(Pr() \frac{Pr^{0,5}}{(1+1,973 Pr^{0,272} + 21,29 Pr^{1/6})}\right); \quad (8)$$

$$Nu_{turb} = \frac{0,037 Re^{0,8} Pr}{1+2,443 Re^{-0,1} (Pr^{2/3} - 1)}; \quad (9)$$

$$f_A = 1 + 0,7 \frac{\frac{b}{a} - 0,3}{\varepsilon^{3/2} \left(\frac{b}{a} + 0,7\right)^2}, \quad (10)$$

где $a = \frac{s_1}{d}$; $b = \frac{s_2}{b}$; $\varepsilon = 1 - \frac{\pi}{4a}$.

При определении числа Рейнольдса, в уравнениях (7) и (9), в качестве определяющего размера используется параметр $l = \frac{d\pi}{2}$, а в качестве определяющей скорости — скорость в узком сечении трубного пучка.

Результаты определения коэффициента теплоотдачи α по критериальным уравнениям и численному моделированию для рассматриваемого трубного пучка, приведены в таблице.

Расчет коэффициента теплоотдачи с помощью критериальных уравнений показал, что различие результатов между методикой Бэра и методикой Жукаускаса около 40 %. Численное моделирование показало лучшее соответствие результатов с методикой, описанной Бэрм. Погрешность определения коэффициента теплоотдачи составила менее 7 %.

Результаты определения коэффициента теплоотдачи α по критериальным уравнениям и численному моделированию для рассматриваемого трубного пучка

Значение коэффициента теплоотдачи α , Вт/м ² ·К	Численное моделирование	По методике Михеева	По методике Жукаускаса	По методике Бэра
	51,6–63,1	83	90	59

Таким образом, для проведения предварительных оценочных расчетов при проектировании воздухоохлаждаемых теплообменников в рассмотренной в работе конфигурации трубных пучков, можно рекомендовать методику Х. Бэра [6], а также численное моделирование с числом расчетных ячеек по поверхности трубок не менее 150 для плоской задачи сопряженного теплообмена.

Литература

- [1] Jianping Zhu. Computational Simulation and Application. Croatia, InTech Press, 2011, 574 p.
- [2] Мильман О.О., Федоров В.А. *Воздушно-конденсационные установки*. Москва, Изд-во МЭИ, 2002, 208 с.
- [3] Шевелев Д.В., Жинов А.А., Юрик Е.А. Исследование густоты расчетной сетки при численном моделировании коэффициента теплоотдачи с поверхности цилиндра при его поперечном обтекании. *Научные технологии в приборостроении и развитии инновационной деятельности в вузе. Всерос. науч.-техн. конф.: материалы*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2024, с. 143–147.
- [4] Михеев М.А. Расчетные формулы конвективного теплообмена. *Известия АН СССР. Энергетика и транспорт*, 1966, № 5, с. 96–105.
- [5] Жукаускас А., Макарявичус В., Шлаичяускас А. *Теплоотдача пучков труб в поперечном потоке жидкости*. Вильнюс, Миитис, 1968.
- [6] Baehr H., Stephan K. Heat and Mass Transfer. Springer, 2011.

Determination of the heat transfer coefficient in transverse flow around a tube bundle using numerical modeling methods and criterial equations

Shevelev D.V.

denis.v.shevelev@bmstu.ru

Zhinov A.A.

azhinov@bmstu.ru

BMSTU (KB), Kaluga, Russia

The heat transfer coefficient for transverse air flow around a corridor-type tube bundle with conjugate heat exchange is determined using numerical modeling methods and known criterial equations. Comparison of the obtained results for the average heat transfer coefficient showed their significant discrepancy. The error in finding the heat transfer coefficient by the considered methods is determined and recommendations for their application are given. The obtained results can be useful in numerical modeling of heat exchange in devices with transverse flow around tube bundles.

Keywords: convective heat transfer, heat transfer coefficient, CFD, computational grid, tube bundle, criteria equation, verification