

Численное моделирование кожухотрубного теплообменного аппарата с кольцевыми и полукольцевыми выемками*

Гуреев В. М., доктор техн. наук, Ермаков А. М., канд. техн. наук
**Казанский национальный исследовательский технический университет
 им. А. Н. Туполева — КАИ**

Мисбахов Р. Ш., канд. техн. наук, Москаленко Н. И., доктор техн. наук
Казанский государственный энергетический университет

Приведены результаты численного моделирования кожухотрубного теплообменного аппарата со спиральными и полукольцевыми выемками на трубках. Полукольцевые выемки приводят к росту теплового потока во всем диапазоне расхода теплоносителя по сравнению с гладкими трубами: при малых расходах — на 42 %, при больших расходах — на 16 %. Основными преимуществами полукольцевых интенсификаторов являются простота изготовления и меньшее количество элементов. Рекомендуется применение полукольцевых выемок вместо кольцевых при больших расходах теплоносителя ввиду более низкого гидравлического сопротивления во всех режимах течения.

Ключевые слова: кожухотрубные теплообменники, кольцевые интенсификаторы теплообмена, моделирование, теплоотдача, структура потока.

Интенсификация теплообмена с целью улучшения технико-экономических характеристик теплообменных аппаратов является актуальной задачей как для энергетической, так и для пищевой и химической отраслей промышленности. При совершенствовании теплообменного аппарата необходимо принимать во внимание множество параметров: габариты, массу, простоту конструкции, эксплуатации и ремонта, надежность и долговечность в работе. Для промышленности наибольшее значение имеют эффективность, стоимость изготовления и эксплуатации, долговечность аппарата и массогабаритные характеристики. Основной задачей совершенствования теплообменного аппарата является поиск баланса между ростом теплового потока за счет увеличения его скорости и ростом гидродинамического сопротивления, зависящего от скорости теплоносителя. Интенсификация теплообмена позволяет при одном и том же расходе теплоносителя увеличить тепловую мощность в заданных размерах теплообменного аппарата.

В данной статье исследованы теплогидравлические характеристики интенсификаторов новых видов — полукольцевых выемок на трубке с параметрами, которые позволяют при меньшем гидравлическом сопротивлении увеличить тепловой поток. Проведен сравнительный анализ эффективности интенсификаторов новых видов и применяемых кольцевых интенсификаторов. Параметры последних выбраны на основе рекомендаций, представленных

в [1–5]. По результатам исследований выявлены оптимальные размеры кольцевых интенсификаторов: $t/h = 2,8$, $h/d = 0,25$ (рис. 1).

Одним из сдерживающих факторов внедрения интенсификаторов новых видов являются значительные финансовые и технические затраты на научные исследования их эффективности и технологические возможности дальнейшего изготовления. Оптимальным подходом может быть применение численного моделирования, позволяющего существенно расширить область прикладных исследований, а также снизить их стоимость. Анализ различных инструментов численного моделирования процессов тепломассообмена и гидродинамики показал, что наиболее корректные результаты достигаются при использовании программного комплекса ANSYS CFX. В нашей работе при проведении численных исследований интенсификации тепломассообмена за счет турбулизации потока спиральными и полукольцевыми выемками использован программный продукт ANSYS CFX (сертификат ANS2011-S015), позволяющий оценить увеличение теплопередачи непосредственно в теплообменном аппарате при различных режимах течения теплоносителя.

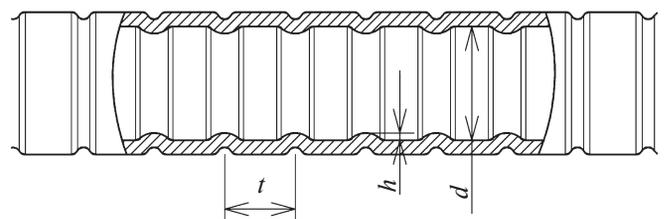


Рис. 1. Схема кольцевого интенсификатора

* Работа выполнена в рамках государственного задания по НИР № 2014/448 (код проекта — 2806).

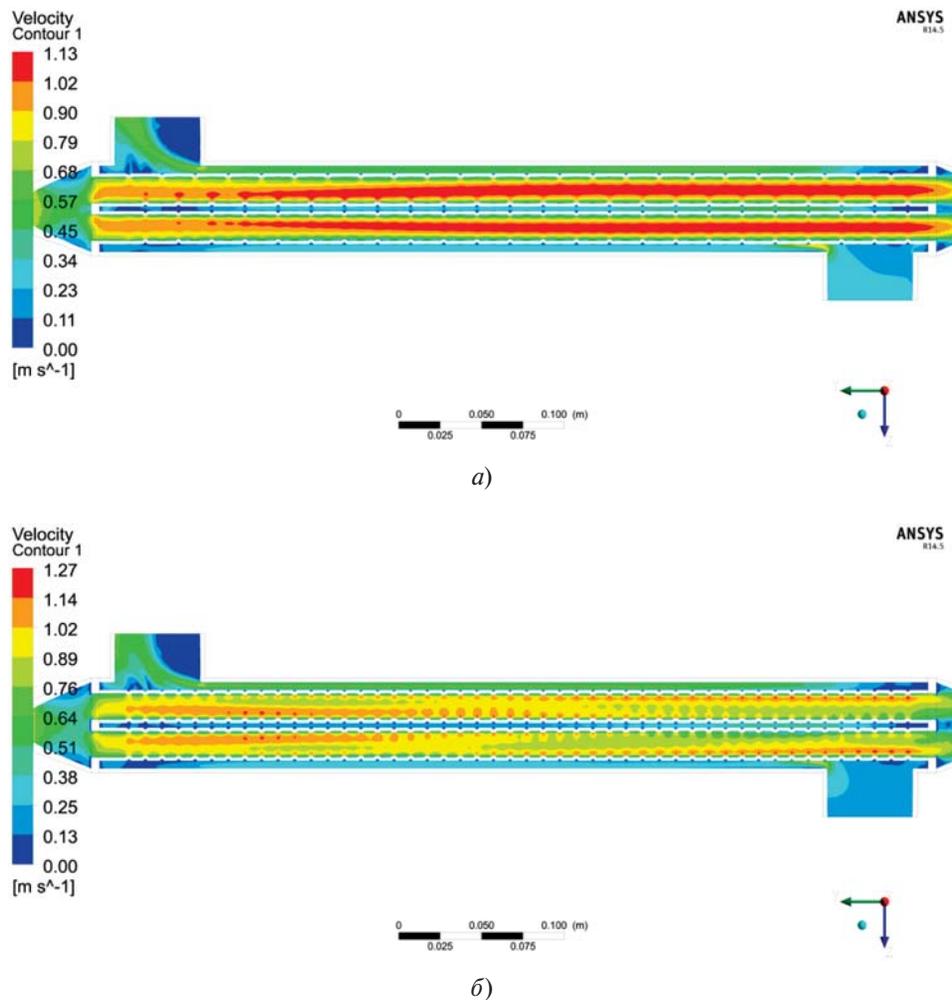


Рис. 2. Поля скоростей в теплообменном аппарате с полукольцевыми (а) и кольцевыми (б) выемками

Прототипом выбран водо-водяной подогреватель со следующими параметрами: число трубок (диаметром 16 мм) — 4, диаметр корпуса — 57 мм, длина — 500 мм. Схема движения теплоносителя — противоток, рабочие расходомеры как для внутреннего, так и для внешнего контура теплоносителей — от 0,1 до 0,7 кг/с с шагом 0,1 кг/с. Температура холодного теплоносителя в трубках — 8 °С, температура горячего теплоносителя в межтрубном пространстве — 95 °С. Выбор параметров прототипа исследований обусловлен применением таких теплообменных аппаратов в индивидуальных тепловых пунктах в сфере ЖКХ и требованиями СНиП для систем отопления.

Конечно-элементная модель теплообменного аппарата сформирована из трех расчетных доменов. При генерации расчетной сетки использованы тетраэдрные элементы, наиболее точно описывающие сложную геометрию. Минимальный размер элемента конечно-элементной сетки — 0,3 мм, что позволяет учесть

особенности обтекания теплоносителем спиральных и полукольцевых выемок, которые имеют незначительные размеры. Расчетная сетка построена с пятью призматическими подслоями для моделирования ламинарного подслоя на стенке трубки. Число элементов с применением методов оптимизации сетки для увеличения точности расчетов составило 35,7 млн. В связи с тем, что объект исследований симметричен, расчеты были проведены на половине теплообменного аппарата.

Для решения поставленной задачи была выбрана $k - \varepsilon$ -модель турбулентности, позволяющая получать наиболее точные результаты для задач подобного класса:

$$k = \frac{3}{2}(U_0 I)^2; \quad (1)$$

$$\varepsilon = C_\mu^{3/4} \frac{k^{3/2}}{l}, \quad (2)$$

где k — энергия турбулентных пульсаций; U_0 — скорость; I — интенсивность турбулентности; ε — скорость диссипации кинетической

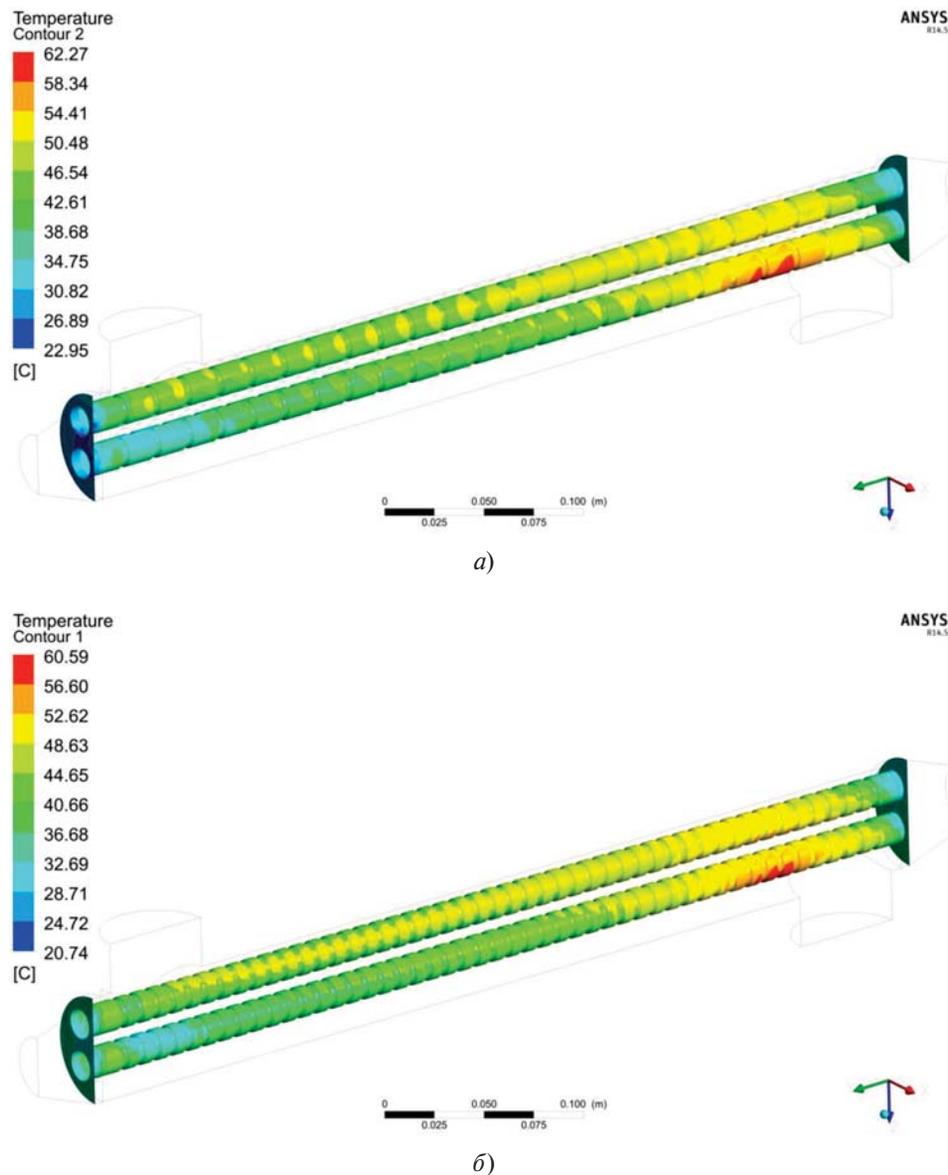


Рис. 3. Поля температур на внутренней поверхности трубок в теплообменном аппарате с полукольцевыми (а) и кольцевыми (б) выемками

энергии; l — значение турбулентного масштаба длины; C_μ — константа.

На рис. 2 приведены результаты численных исследований полей скоростей в межтрубном пространстве теплообменника с кольцевыми и полукольцевыми выемками. Структура полей скоростей при обоих типах выемок схожая и незначительно влияет на общую картину течения теплоносителя. Представленные поля скоростей показывают наличие крупного вихря в выходном патрубке, перекрывающего значительную часть его сечения.

На рис. 3 представлены поля температур на внутренней поверхности трубки при спиральных и полукольцевых выемках. В обоих случаях имеются зона с повышенной температурой около входного патрубка с горячим теплоносителем и зоны с пониженной тем-

пературой напротив входного и выходного патрубков горячего теплоносителя, что соответствует “застойным” зонам на рис. 2 с низкими скоростями и теплообменом.

Для комплексной оценки эффективности применения выемок необходимо сравнить гидравлические потери в теплообменных аппаратах при различных видах выемок. Из анализа графиков изменения давления от расхода на рис. 4, а хорошо видно, что наибольшее влияние выемки оказывают на потери давления внутри трубок, особенно для случая с кольцевыми выемками, когда потери давления возрастают в 3,25 раза, а для случая полукольцевых выемок они повышаются в 2 раза при высоких скоростях движения теплоносителя. Анализ графиков на рис. 4, б показывает, что прирост теплового

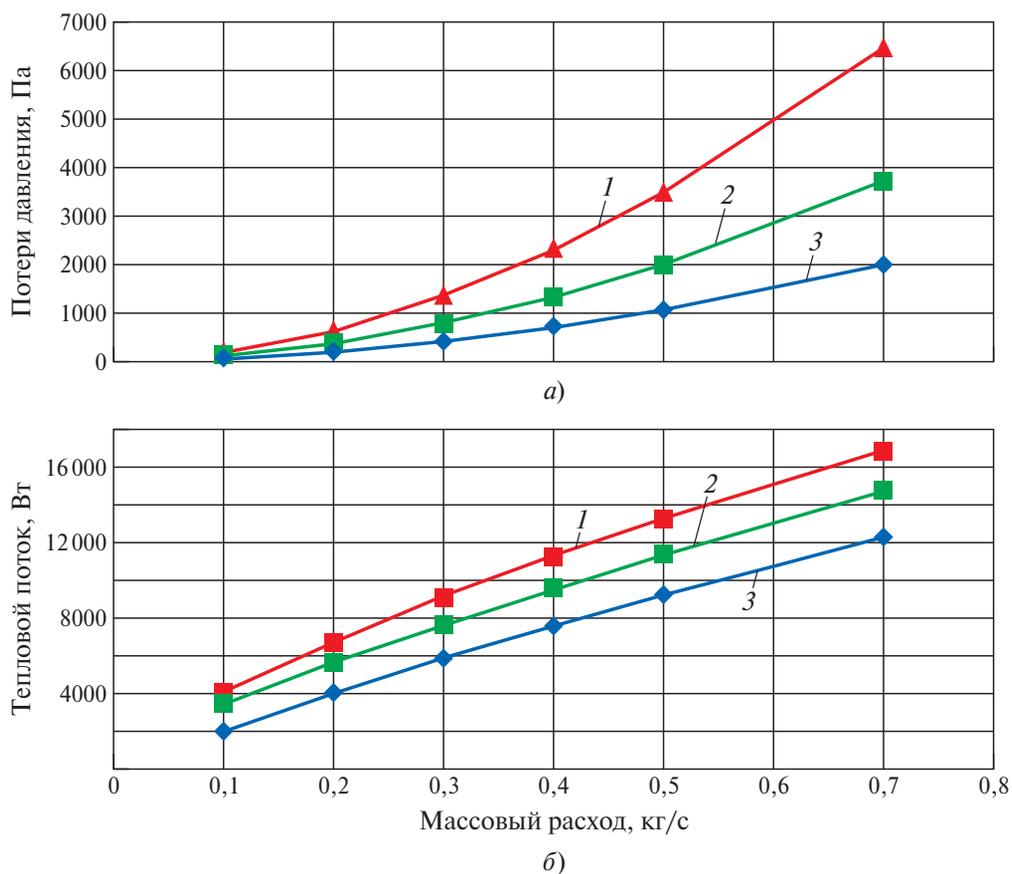


Рис. 4. Графики изменения потерь давления внутри трубок (а) и теплового потока (б) в теплообменном аппарате в зависимости от массового расхода теплоносителя:

1 — для кольцевых выемок; 2 — для полукольцевых выемок; 3 — для гладкой трубы

потока при полукольцевых выемках и малых расходах теплоносителя больше, чем при использовании гладких труб на 42,3 % и уступает приросту при кольцевых выемках на 14,9 % при меньшем гидравлическом сопротивлении полукольцевых выемок на 35,5 %. При больших расходах увеличение теплового потока полукольцевых выемок по сравнению с гладкой трубой составляет 16,6 % при меньшем гидравлическом сопротивлении полукольцевых выемок по сравнению с кольцевыми на 42,4 %.

Применение интенсификаторов обеспечивает увеличение теплового потока во всем диапазоне расходов теплоносителя. Наибольший эффект дает применение кольцевых интенсификаторов, но это приводит к наибольшему росту гидравлического сопротивления. Остальные интенсификаторы примерно одинаково увеличивают тепловой поток во всем диапазоне расходов. Основные преимущества полукольцевых интенсификаторов — простота изготовления и меньшее число элементов для достижения такого же эффекта, как при спиральных и луночных выемках.

Использование полукольцевых выемок позволяет увеличить теплоотдачу во всем диапазоне расходов по сравнению с гладкой трубкой. Рекомендуется также применение полукольцевых выемок вместо кольцевых при больших расходах теплоносителя вследствие более низкого гидравлического сопротивления во всех режимах течения.

Список литературы

1. Калинин Э. К., Дрейцер Г. А., Ярхо С. А. Интенсификация теплообмена в каналах. 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1990.
2. Гортышов Ю. Ф., Олимпиев В. В. Теплообменные аппараты с интенсифицированным теплообменом. — Казань: Изд-во КГТУ, 1999.
3. Гортышов Ю. Ф., Попов И. А., Щелчков А. В. Теплогидравлическая эффективность перспективных способов интенсификации теплоотдачи в каналах теплообменного оборудования. — М.: Центр инновационных технологий, 2009.
4. Oлимпиев V. V., Mirzoev B. G. Energy-efficient intensifiers of laminar heat transfer. — Russian Aeronautics, 2013, № 56 (2).
5. Модернизация серийного маслоохладителя двигателя “КАМАЗ” / В. М. Гуреев, А. П. Сосновский, Р. Р. Юнусов и др. — Вестник КГТУ, 2012, № 3.