

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ НАПОВНЕННЯ СКЛЯНОЇ ТАРИ ХАРЧОВОЮ РІДИНОЮ

Кюрчев С.В., канд. техн. наук, доцент, Змєєва І.М., інженер
Таврійський державний агротехнологічний університет, м. Мелітополь

В статті побудована математична модель процесу розливання харчової рідини в скляну тару та проведено аналіз її гідродинамічної поведінки на основі чисельного моделювання на основі програмного комплексу ANSYS.

The mathematical model of pouring out for distribution into moulds process is considered and analysis of its hydrodynamic behavior is performed using ANSYS.

Ключові слова: фасування харчової рідини, дозатор, чисельне моделювання, нестационарний аналіз, розподіл поля швидкостей, розподіл поля об'ємної фракції.

У період риночної економіки перед харчовим машинобудуванням стоїть задача розробки та випуска універсального високопродуктивного обладнання для розливу харчових продуктів та автоматизованих технологічних ліній, які були б конкурентноспроможними на світовому ринку. Удосконалення обладнання повинне бути направлене на поліпшення технічного рівня та якості, у тому числі на підвищення продуктивності, покращення технологічних характеристик без суттєвого збільшення витрат на виготовлення та експлуатацію обладнання.

Підвищення продуктивності розливного (фасувального) обладнання простим збільшенням кількості розливних механізмів не дозволяє отримати максимальну ефективність, оскільки в цьому разі збільшується маса машини та її енергоспоживання. Тому у збільшенні продуктивності інтенсивним методом, без збільшення кількості розливних механізмів, криються можливості значного підвищення ефективності виробництва.

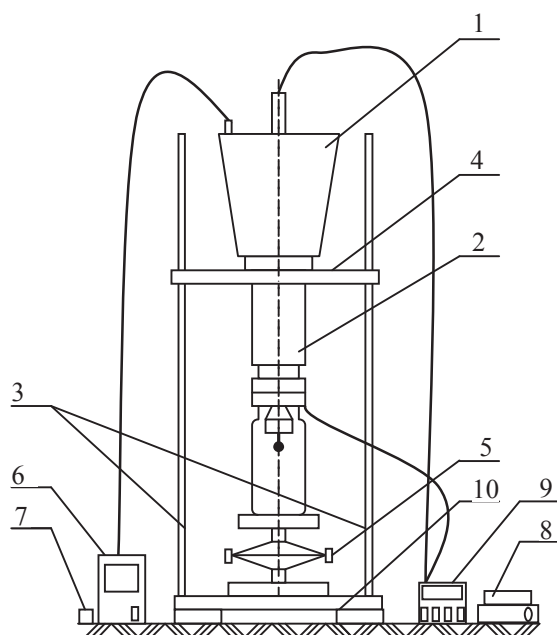
Для створення високопродуктивного розливного устаткування необхідне подальше як теоретичне, так і експериментальне дослідження гідралічних характеристик розливного обладнання та процесу розливу в цілому [1, 2]. В основу сучасних методів розрахунку процесу фасування та фасувальних машин лягли результати досліджень, що проводилися Н.Ф. Харитоновим, П.Н. Галасовим, С.І. Цитовським, К.П. Гетмановим, І.А. Степановим, Д.А. Ярмолинським, В.Г. Студиліним, Ц.Р. Зайчиком, Х. Брандоном, К. Кларком. Частіше всього досліджувалися процеси фасування вин, як найбільш складні, що пов'язано з фізико-механічними властивостями продукту та вимогами, що висувуються до його фасування [3, 4, 5]. Менше уваги приділялося дослідженням процесу фасування соків.

Важливим параметром, що визначає основні розрахункові характеристики фасувальних машин є продуктивність, яка залежить від кінематики механізмів, гідралічних параметрів системи, конструктивних елементів. Гідродинамічні особливості протікання рідких харчових продуктів через насадки вивчались у роботах А.Д. Альтшуля, Е.З. Геллера, Ю.А. Скобельцина та інш.

Аналіз науково-технічної літератури показав, що процеси протікання малов'язких харчових рідин в каналах фасувального обладнання та заповнення тари рідиною потребують подальшого дослідження.

Метою статті є аналіз гідродинамічної поведінки харчової рідини на основі чисельного моделювання процесу розливання харчової рідини в тару. В роботі розглядалися тільки малов'язкі харчові рідини, які з достатньою точністю можна вважати ньютонівськими. У якості базового для дослідження вибрано гравітаційний метод розливу, спосіб формування струменя – “шатром”.

Розглянемо роботу дозувального вузла фасувального пристрою для розливу харчових рідин на прикладі фасування соку у скляні банки.



1 – бак, 2 – розливальний патрон, 3 – опори,
4 – підтримуюча пластина, 5 – механізм
піднімання та опускання тари, 6 – потенціометр
марки КСП1-ПЗ, 7 – секундомір СП-15,
8 – нагрівальний пристрій,
9 – двоканалний цифровий прилад 2ТРМ1,
10 – станина

Рис. 1 – Фасувальний пристрій з дозатором

Принцип роботи фасувального пристрою з дозатором (показано на рис. 1), що дозує рідину за заданим рівнем, полягає у наступному:

- сік при температурі гарячого розливу подається у бак 1, у дні якого встановлено розливальний патрон 2 для розливу рідини за рівнем (дозатор);
- одиниця тари за допомогою піднімального стола 5 піднімається до патрону для розливу 2, торець банки впирається в гумову манжету, стискає її та відкриває циліндричну щілину, через яку рідина із резервуару заповнює вільний простір тари;
- банка заповнюється рідиною до визначеного рівня; при розливі у розливальному патроні утворюється плоске кільце між бічною поверхнею ущільнюючої манжети і конічною поверхнею направляючої, що спричиняє плоске шатрове витікання рідини; повітря, що знаходиться у банці, та піна рідини, яка утворюється при заповненні банки, через повітряну трубку надходять у бак;
- після заповнення тари стіл опускається до крайнього нижнього положення, при цьому стиснута манжета повертається до попереднього стану та перекидає подачу рідини.

Температура рідини в баку фіксується за допомогою потенціометра КСП1-ПЗ, а у місці її витікання з дозатора у банку та у самій банці – за допомогою цифрового приладу 2ТРМ1.

Процес заповнення банки харчовою рідиною є настільки складним, що детально описати його можна або за допомогою феноменологічної теорії або використовуючи чисельне моделювання. Промодельоємо цей процес за допомогою FLOTRAN CFD (Computational Fluid Dynamics) аналізу програмного комплексу ANSYS [6, 7].

Будемо вважати, що рідина при течії не стискується, а режим течії – турбулентний.

При використанні $k - \varepsilon$ – моделі турбулентності математична модель течії рідини має вид:

$$\frac{\partial(\rho V_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y)}{\partial y} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho V_x V_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho V_x V_y) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_e \frac{\partial V_x}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_e \frac{\partial V_x}{\partial y}), \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho V_x V_y) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho V_y V_y) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_e \frac{\partial V_y}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_e \frac{\partial V_y}{\partial y}), \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho V_x k) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho V_y k) = \frac{\partial}{\partial x}(\mu_t \frac{\partial k}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_t \frac{\partial k}{\partial y}) + \mu_t \Phi - \rho \varepsilon, \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho V_x \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho V_y \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) + C_{1\varepsilon} \mu_t \frac{\varepsilon}{k} \Phi - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (5)$$

$$\mu_e = \mu + \mu_t, \quad \mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (6)$$

$$\Phi = 2 \left[\left(\frac{\partial V_x}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial V_y}{\partial y} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_y}{\partial x} + \frac{\partial V_x}{\partial y} \right)^2 \right], \quad (7)$$

де ρ – густина рідини ($\rho = \text{const}$), V_x, V_y – проекції вектора швидкості рідини, p – тиск у рідині, μ – задана фізична (ламінарна) в'язкість ($\mu = \text{const}$), μ_t – турбулентна (вихрова) в'язкість, μ_e – ефективна в'язкість, k – кінетична енергія турбулентності, що віднесена до одиниці маси рідини,

ε – швидкість дисипації у тепло кінетичної енергії турбулентності у одиничному об'ємі рідини, $C_\mu, C_{1\varepsilon}, C_2, \sigma_\varepsilon$ – емпіричні константи $k-\varepsilon$ моделі, $C_\mu = 0.09, C_{1\varepsilon} = 1.44, C_2 = 1.92, \sigma_\varepsilon = 1.3$.

Рівняння неперервності (1) – (2), руху (3) – (4) та рівняння $k-\varepsilon$ моделі (5) – (7) записані у консервативному виді.

Використаємо кінцевий елемент FLUID141 для моделювання нестационарного процесу, що описує динаміку об'єму текучого середовища. Цей елемент має 4 вузли та характеризується такими ступенями свободи у кожному вузлі – VX, VY, VZ (компоненти швидкості у X, Y, Z - напрямках), PRES (відносний тиск), TEMP (температура), ENKE (кінетична енергія турбулентності), ENDS (коефіцієнт дисипації кінетичної енергії турбулентності). Якщо матеріальний номер кінцевого елемента FLUID141 дорівнює одиниці, то цей елемент відповідає елементу, заповненому рідиною, якщо більше одиниці – незаповненому рідиною елементу.

Для виконання аналізу об'єму текучого середовища (VOF) використовується алгоритм адвекції для об'ємної фракції (VFRC). Значення VFRC для кожного кінцевого елемента змінюється від нуля до одиниці, де нуль означає, що елемент пустий (не зайнятий рідиною), а одиниця означає повний (зайнятий рідиною) елемент. Значення між нулем і одиницею означає, що відповідні кінцеві елементи частково заповнені. Таким чином, вільна поверхня рідини визначається розподілом VFRC поля та описується диференціальним рівнянням у частинних похідних

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla} F = 0, \quad (8)$$

де F - об'ємна фракція (VFRC), \vec{u} - переміщення.

Метод VOF дозволяє відслідковувати зміну площі вільної поверхні рідини в часі, тому необхідно активізувати нестационарний аналіз. При виконанні VOF аналізу густина рідини вважається постійною, тому закон збереження маси еквівалентний до закону збереження загального об'єму (загальної площі – у двовимірному випадку) рідини. Для розрахунку використаємо стандартну $k-\varepsilon$ турбулентну модель, так як форма вільної поверхні не являється чутливою до виду турбулентної моделі, яка застосовується.

Оскільки вихідна задача вісесиметрична, то можна розглядати як вісесиметричну, так і двовимірну модель наповнення скляної тари. На рисунку 2 показана двовимірна кінцево-елементна модель скляної банки.

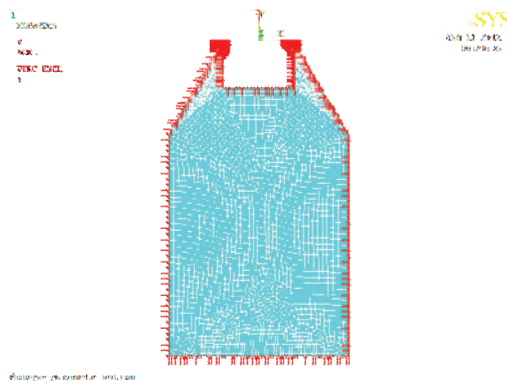


Рис. 2 – Кінцево-елементна модель скляної банки

Для однозначного розв'язання нестационарної задачі необхідно задати початкові та граничні умови. При розливі у розливальному патроні утворюється плоске кільце між бічною поверхнею ущільнюючої манжети і конічною поверхнею направляючої. На цьому кільці швидкість соку, що розливається, становить $VX = 0.65i / \tilde{n}$, $VY = 1.2i / \tilde{n}$, а також $VFRC=1$, $Wetting\ status=1$. На внутрішній поверхні скляної банки та направляючої швидкість рідини дорівнює нулю, $VX = VY = 0$.

В результаті проведення нестационарного аналізу отримуємо розподіл об'ємної фракції та розподіл поля швидкостей рідини у довільний момент часу наповнення банки. Час заповнення банки становить $t = 1.35\ c$.

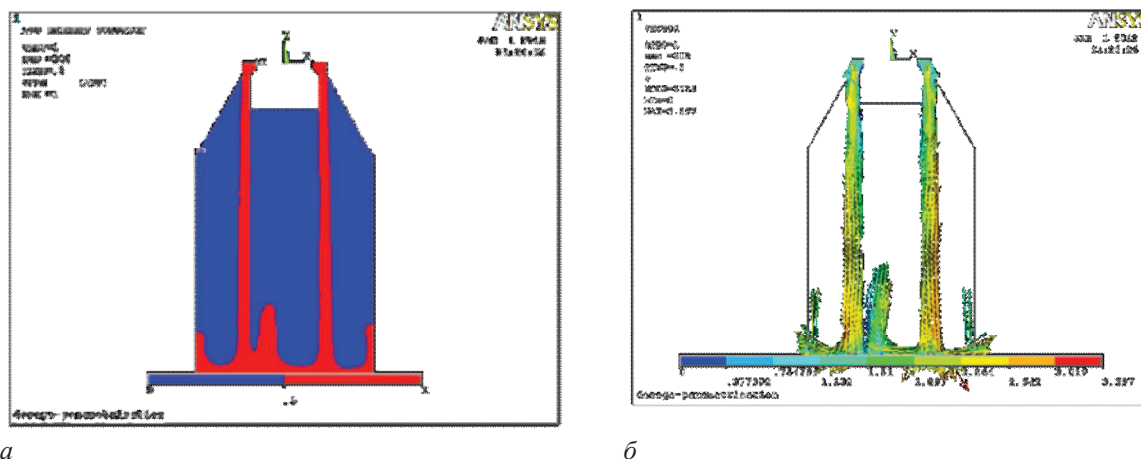


Рис. 3 – Розподіл об'ємної фракції рідини (а) та розподіл поля швидкостей (б) рідини у банці в момент часу $t = 0.3\ c$

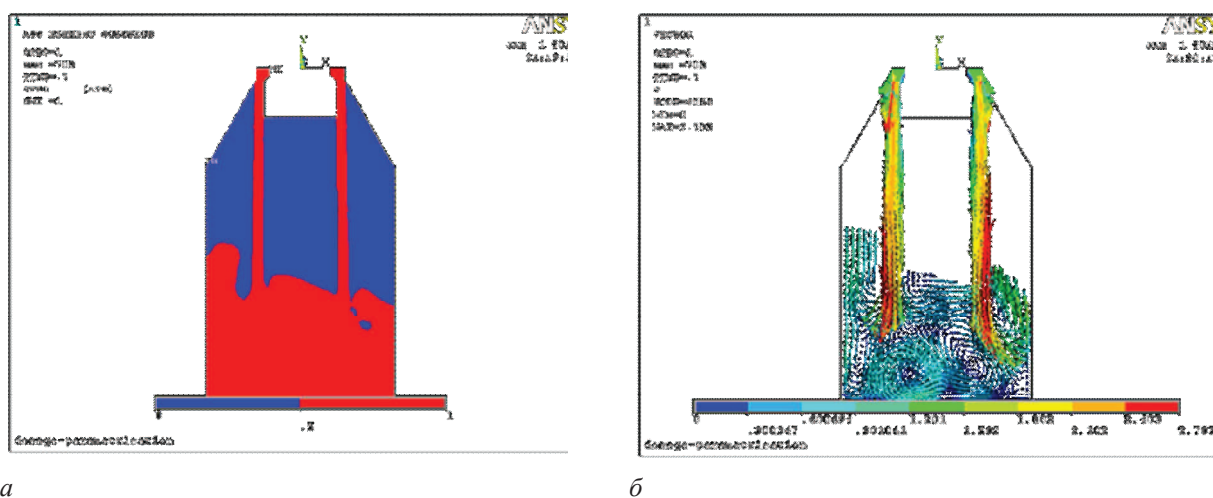


Рис. 4 – Розподіл об'ємної фракції рідини (а) та розподіл поля швидкостей (б) рідини у банці в момент часу $t = 0.7\ c$

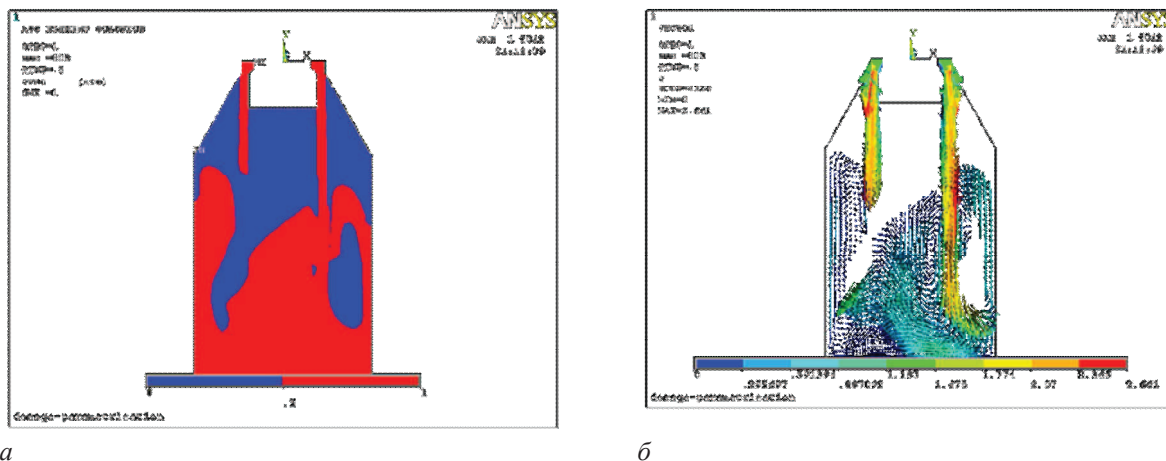


Рис. 5 – Розподіл об'ємної фракції рідини (а) та розподіл поля швидкостей (б) рідини у банці в момент часу $t = 0.8$ с

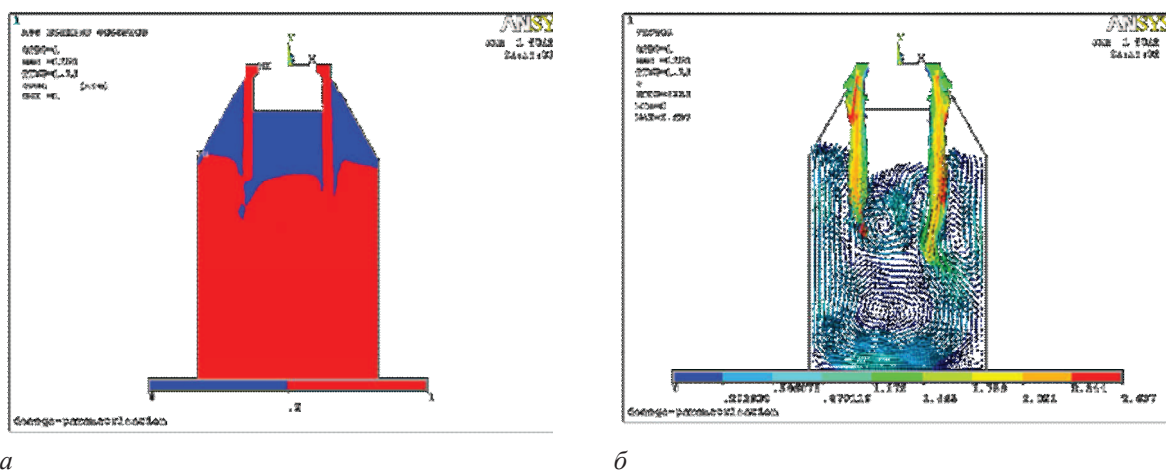


Рис. 6 – Розподіл об'ємної фракції рідини (а) та розподіл поля швидкостей (б) рідини у банці в момент часу $t = 1.15$ с

З рисунків 3 – 6 випливає, що рідина, стікаючи по верхній крайці скляної банки, захоплює за собою повітря, насичується ним і падає на дно склянки. Надалі, при виділенні бульбашок повітря з рідини, об'єм її зменшується.

Важливим параметром, що визначає продуктивність розливального пристрою, є час заповнення банки рідиною до зазначеного рівня, який суттєво залежить від абсолютної величини швидкості витікання рідини, площі живого перерізу зазору між направляючою та ущільнюючою манжетою, через який рідина попадає у банку, геометричних параметрів конструктивних елементів, а також від фізико-хімічних властивостей харчової рідини, яка розливається (в'язкості, густини, теплопровідності, теплоємності). Варіюючи кут нахилу та геометричні розміри направляючої можна досягти максимальної продуктивності при фасуванні певного виду харчової рідини.

Висновки

В статті побудована математична модель процесу розливання харчової рідини в скляну тару та проведено аналіз її гідродинамічної поведінки на основі чисельного моделювання на основі програмного комплексу ANSYS.

Перспективи подальших досліджень у даному напрямку. Чисельне моделювання процесу заповнення тари харчовою рідиною дозволить обґрунтувати вплив конструктивних, технологічних факторів та фізико-хімічних властивостей харчових рідин на критерії оптимізації – продуктивність та точність дозування. Це дозволить розраховувати реальні елементи фасувального обладнання.

Литература

1. Ярмолинский Д.А. Некоторые гидродинамические показатели новых разливающих автоматов / Д.А. Ярмолинский; "Виноделие и виноградарство СССР", 1967, №4, с. 46-50.
2. Ярмолинский Д.А. Причины нарушения точности дозирования вина при разливе / Д.А. Ярмолинский; "Виноделие и виноградарство СССР", 1973, №3, с. 48-51.
3. Ярмолинский Д.А. Элементы конструкций автоматов линий розлива вин (расчет и конструирование) / Д.А. Ярмолинский, Ц.Р. Зайчик; М.: "Машиностроение", 1974.
4. Степанов И.А. Автоматические линии розлива пищевых жидкостей / И.А. Степанов, П.Н. Галасов; М.: «Пищевая промышленность», 1971.
5. Харитонов Н.Ф. Автоматы и поточные линии вин / Н.Ф. Харитонов, Д.А. Ярмолинский; М.: "Машиностроение", 1967.
6. Madenci E., Guven I. The finite element method and applications in engineering using ANSYS. – Springer Science+Business Media, 2006. – 686p.
7. Лавріненко Н.М. Кінцево-елементне моделювання в інженерних розрахунках / Н.М. Лавріненко, В.О. Сукманов, А.О. Авраменко, А.І. Українець, Д.С. Афенченко, А.В. Шульга; Донецьк: Норд-Прес, 2008. – 668 с. – ISBN 978-966-380-268-8

УДК 536.27

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В ТРУБЧАТЫХ ТЕПЛООБМЕННИКАХ С ДИСКРЕТНЫМИ ТУРБУЛИЗАТОРАМИ

Грабов Л.Н., канд. техн. наук, вед. науч. сотр., Чалаев Д.М., канд. техн. наук, вед. науч. сотр.,
Король И.В., инж.-констр.

Институт технической теплофизики НАН Украины, г. Киев

Проведено експериментальне дослідження трубчатого теплообмінника з гофрованою трубою. Отримані робочі характеристики теплообмінника.

The research of the investigation of the corrugated tube heat exchanger was carried out. The data of laboratory experiments of the working characteristics are presented.

Ключевые слова: трубчатый теплообменник, гофрированные трубы, турбулизатор.

В энергетических устройствах и технологической аппаратуре большую роль играют тепломассообменные процессы. Повышение эффективности этих процессов и совершенствование теплообменного оборудования является важной составляющей вопроса рационального использования энергии. Одним из наиболее распространенных типов теплообменного оборудования являются теплообменники трубчатого типа. Достоинством аппаратов этого типа является простота конструкции и меньшая стоимость по сравнению с пластинчатыми аппаратами. Вместе с тем, в последние годы в промышленности и энергетике наблюдается тенденция вытеснения трубчатых теплообменных аппаратов пластинчатыми. Это объясняется тем, что в выпускаемых в настоящее время трубчатых теплообменниках используются в основном гладкотрубные теплообменные поверхности, которые имеют низкие энергетические показатели и не удовлетворяют уровню современных требований.

Дальнейшее совершенствование теплообменного оборудования требует поиска новых методов интенсификации теплопередачи. Одним из способов повышения эффективности этих аппаратов является интенсификация теплоотдачи с помощью различного рода турбулизаторов потока. К ним относятся трубы с ленточными вставками, внутренним оребрением, локальными завихрителями потока, полусферическими лунки и др. Для увеличения интенсивности теплообмена в межтрубном пространстве применяют спиральные ребра, проволочное оребрение, а также переход с продольного обтекания пучков труб на поперечный с помощью винтообразных перегородок [1, 2].

Анализ различных методов интенсификация теплообмена показывает, что большинство из них вызывают турбулизацию потока по всему сечению трубы – как в пристенном слое, так и центральной зоне. Вследствие этого рост затрат энергии на преодоление гидравлического сопротивления превышает рост теплоотдачи. Так, при увеличении теплопередачи через стенку трубы в 2 – 3 раза гидравлическое сопротивление системы растет в 10 – 12 раз.