

Рис. 7 – Експериментальна залежність $\psi = f [\Delta P_m / (g \cdot de), KW]$

Література

1. Корнієнко Я.М., Гатілов К.О. Гідродинаміка псевдозрідженого шару в процесі одержання багатшарових твердих композитів із заданими властивостями. Одеська національна академія харчових технологій, Наукові праці випуск №35, том 2. – Одеса 2009. – 62 с.
2. Корнієнко Я.М., Магазій П.М., Гатілов К.О., Цюпяшук А.М. Температурне поле в дисперсних системах з інтенсивними процесами переносу. Міжнародний науково-виробничий журнал «Кераміка наука та життя», #4 (6) 2009р., #1 (7) 2010р., С. 7–13.
3. Корнієнко Я.М., Магазій П.М., Гатілов К.О., Сачок Р.В. Визначення температурного поля в дисперсних системах при одержанні кристалічно-аморфних твердих структур. Міжнародний науково-виробничий журнал «Кераміка наука та життя», #4 (6) 2009р., #1 (7) 2010р., С. 13–18

УДК 66.021.4

МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛООБМІНУ ПРИ КИПІННІ РІДИН

Корнієнко Я. М., д-р техн. наук, професор,
Сидоренко С. В. канд. техн. наук, доцент, Гулієнко С. В., Комиш Д. В.
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

Розглянуто проблеми відведення теплоти від нагрітих елементів технологічного обладнання та теплообміну при кипінні. Наведена методика експериментальних досліджень процесу тепловіддачі при кипінні рідин, а також опис експериментального стенда та основних вимірювань.

The problems of heat removing from heated elements of technological equipment and boiling heat transfer are overviewed. The methodology of experimental study of boiling heat transfer and description of experimental bench are represented.

Ключові слова: відведення теплоти, холодоагент, тепловіддача, «криза кипіння», критичний тепловий потік.

Процеси теплообміну відіграють ключову роль в забезпеченні надійного функціонування атомних та теплових електростанцій, промислових печей, радіолокаційних станцій тощо. Безпечна робота таких

об'єктів в багатьох випадках визначається відведенням теплоти від теплонапружених елементів обладнання. В разі недостатньої інтенсивності теплообміну аварійні ситуації можуть виникнути в основному через втрату механічних властивостей конструкційних матеріалів, в першу чергу металів [1]. Для забезпечення необхідної ефективності охолодження технологічного обладнання широко використовують процеси кипіння, які характеризуються значно вищими коефіцієнтами тепловіддачі (2000–24000 Вт/(м²·К)) порівняно з конвективним теплообміном (до 1000 Вт/(м²·К)). Проте основною проблемою успішного вирішення зазначених проблем відведення теплоти є «криза кипіння» — перехід від бульбашкового режиму кипіння до плівкового, що супроводжується різким зменшенням коефіцієнта тепловіддачі. Критичний тепловий потік, при якому досягається «криза кипіння», для традиційних теплоносіїв (вода, етиленгліколь, машинні масла) становить (1,2–1,8)·10⁶ Вт/м² [2]. В окремих випадках їх використання не може гарантувати достатню ефективність відведення теплоти, тому пошук новітніх теплоносіїв для систем охолодження є важливим завданням.

В якості новітніх холодоагентів пропонується використовувати різноманітні органічні речовини (вуглеводні, галогенопохідні від вуглеводнів тощо), а також суміші органічний речовин з водою. Ще одним шляхом підвищення інтенсивності відведення теплоти від нагрітих поверхонь є використання в якості охолоджуючих агентів нанорідин — колоїдних дисперсій наночастинок в базових рідинах, таких як вода [3, 4]. Доступні в джерелах літератури дані з теплообміну при кипінні нанорідин обмежені, але опубліковані дані про результати експериментів демонструють значне зростання критичного теплового потоку, порівняно базовою рідиною. Деякі з них наведені в таблиці 1.

Проте надійного пояснення механізму зростання критичного теплового потоку в нанорідинах наразі немає. Крім того, в доступних в джерелах літератури даних щодо «кризи кипіння» нанорідин наявні протиріччя, в основному стосовно впливу концентрації наночастинок на значення критичного теплового потоку [4, 5]. Тому необхідні подальші дослідження в цій галузі, для встановлення закономірностей зміни критичних теплових потоків нанорідин, порівняно з базовими рідинами.

В основу визначення критичного теплового потоку покладена гідродинамічна теорія криз кипіння, запропонована С. С. Кутателадзе [6]. Згідно неї криза викликається втратою динамічної стійкості двофазного потоку, внаслідок того, що пара відкидає рідину від поверхні теплообміну. Рівняння для визначення критичного теплового потоку має вигляд [6]:

$$q_{кр} = kr \sqrt{\rho_n} \sqrt[4]{g \sigma (\rho_j - \rho_n)} \quad (1)$$

- де g — питома теплота пароутворення Дж/кг;
 ρ_n — густина, парової фази, кг/м³;
 ρ_j — густина рідкої фази, кг/м³;
 g — прискорення вільного падіння, м/с²;
 σ — поверхневий натяг, Н/м;
 k — коефіцієнт стійкості.

Рівняння (1) описує дослідні дані з критичних теплових потоків для неметалевих теплоносіїв в умовах вільної конвекції в великому об'ємі. Порядок величини k знаходиться в межах 0,13...0,16 [6].

Крім гідродинамічної теорії, для визначення критичних теплових потоків використовують теорію сухого мікрошару, теорію взаємодії бульбашок, теорію сухих плям тощо [3].

Таблиця 1 – Зростання критичного теплового потоку в нанорідинах [3]

Тип нанорідини	Тип нагрівача	Максимальне зростання критичного теплового потоку
Al ₂ O ₃ в воді, 0,001–0,025 г/л	Мідна пластина	200 %
SiO ₂ (15–50 нм) в воді, 0,5 об%	Ніхромовая дротина	60 %
Al ₂ O ₃ (38 нм) в воді, 0,037 г/л	Шар титану на склі	67 %
TiO ₂ (27–85 нм) в воді, 0,01–3 об%	Мідна пластина	50 %
Al ₂ O ₃ (70–260) та ZnO в воді	Нержавіюча сталь	200 %
Al ₂ O ₃ в етиленгліколі		
Al ₂ O ₃ (10–100) в воді, 0,5–4 об%	Ніхромовая дротина	50 %
TiO ₂ в воді, 10–5–10–1 об%	Ніхромовая пластина	200 %
SiO ₂ . CeO ₂ . Al ₂ O ₃ . в воді 0,5 об%	Ніхромовая пластина	170 %
Au в воді	Мідна пластина	175 %

Відповідно до вище перелічених теорій на кризу кипіння впливають властивості рідини (густина, в'язкість, теплопровідність, теплоємність, теплота пароутворення, поверхневий натяг), гідродинамічні

умови (розмір бульбашок, швидкість бульбашок, частота відривання), стан поверхні нагріву (насамперед змочуваність).

Метою даної роботи є обґрунтування методики експериментальних досліджень теплообміну і визначення теплових потоків кипінні базової рідини та нанорідин з різною концентрацією наночастинок, та створення експериментальної установки.

Методика проведення досліджень полягає в наступному:

Досліджувана рідина нагрівається до температури кипіння за рахунок допоміжного нагрівача. Після досягнення температури кипіння подається напруга на основний нагрівач заданої довжини, на якому відбувається кипіння рідини. За допомогою автотрансформатора (ЛАТРа) основного нагрівача встановлюється задане значення напруги і вимірюється значення сили струму на основному нагрівачі та температури рідини.

Значення площі поверхні нагрівача визначається за формулою:

$$f = \pi d l \quad (2)$$

де d — діаметр нагрівача, м; l — довжина нагрівача.

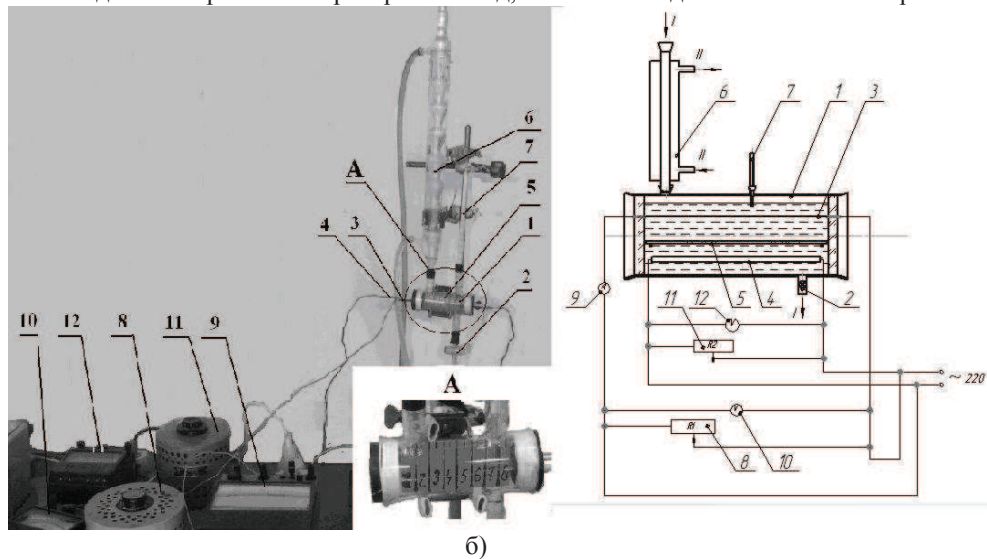
Тоді тепловий потік розраховується як:

$$q = \frac{UI}{f} \quad (3)$$

де U — напруга, В; I — сила струму, А;

При певних значеннях q відбувається перехід поплівкового режиму кипіння, що призводить до погіршення теплопровідності, нагрівач починає розжарюватися, що в результаті призводить до його руйнування. Значення теплового потоку, в при якому це відбувається і є $q_{кр}$.

Запропонована методика передбачає кипіння досліджуваної рідини на поверхні на поверхні електронагрівача, який виконано у вигляді ніхромової дротини. Діаметр дротини становить $(0,2-0,45) \cdot 10^{-3}$ м, довжина – $(0,05-0,08)$ м. Такі розміри електронагрівача дозволяють забезпечити досягнення теплових потоків $q = (0,2-2,0) \cdot 10^6$ Вт/м², при значеннях сили струму $I = 5-15$ А, та напруги $U = 10-20$ В. Особливістю методики є те, що рідина, в яку поміщений основний нагрівач, повинна бути нагрітою до температури кипіння (близько 100 °С), тому при дослідженні використовувався допоміжний нагрівач, потужністю 500 Вт, який виконаний у вигляді ніхромової спіралі. Для реалізації розробленої методики створений лабораторний стенд, загальний вид та схема якого зображена на рис. 1.



1 – експериментальна ємність; 2 – зливна воронка; 3 – основний дослідний нагрівач;
 4 – допоміжний нагрівач; 5 – екран; 6 – конденсатор; 7 – термометр; 8 – ЛАТР основного нагрівача;
 9 – амперметр основного нагрівача; 10 – вольтметр основного нагрівача;
 11 – ЛАТР допоміжного нагрівача; 12 – вольтметр допоміжного нагрівача.
 I – досліджувана рідина; II – охолоджуюча рідина; А – загальний вигляд експериментальної ємності 1.

Рис. 1 – Загальний вид (а) та схема (б) експериментального стенда

Стенд складається з скляної циліндричної експериментальної ємності 1, в якій розміщені основний 3 та допоміжний нагрівачі 4. Для усунення впливу допоміжного нагрівача 4 на процес теплообміну при

кипінні в експериментальній посудині встановлено екран 5. Для підтримання постійного рівня рідини в експериментальній ємності 2 передбачений конденсатор 6, в якому утворена при кипінні пара конденсується охолоджуваною водою і повертається в експериментальну ємність 2.

Передбачена можливість регулювання потужності основного нагрівача 3 за допомогою реостата 8, та допоміжного нагрівача 4, за допомогою реостата 11.

Стенд дозволяє проводити вимірювання температури досліджуваної рідини за допомогою термометра 7 (у разі необхідності запису даних до комп'ютера термометр 7 замінюється на термопару (на схемі не показана) напруги та сили струму на основному нагрівачі за допомогою вольтметра 10 та амперметра 9. Досягнення критичного теплового потоку фіксується візуально та за допомогою фотоапарата в момент утворення плівки на поверхні нагрівача. Внаслідок погіршення умов відведення теплоти відбувалася зміна забарвлення нагрівача від сірого до яскраво червоного та його руйнування (перепалювання) внаслідок втрати механічних характеристик при підвищенні температури. Загальний вид експериментальної ємності за умов досягнення критичного теплового потоку зображена на рис 2.

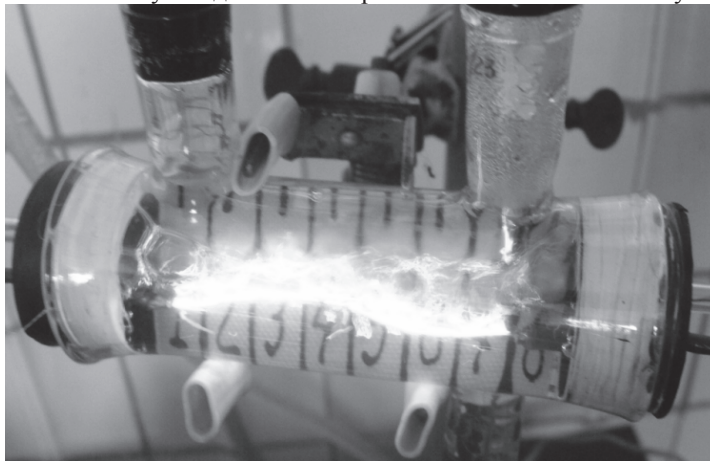
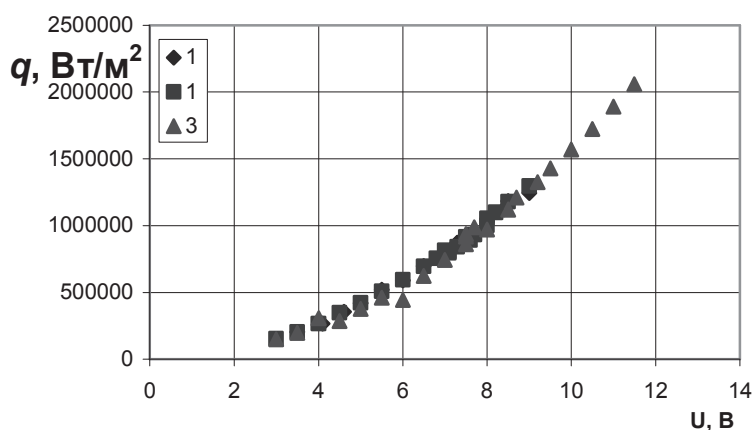


Рис. 2 – Експериментальна ємність 1 при досягненні критичного значення теплового потоку ($q_{кр}=1,2 \cdot 10^6$ Вт/м²)

Проведено апробація проведена апробація методики та експериментального стенда з визначення критичних теплових потоків при кипінні, що дозволить визначити напрямки підвищення ефективності теплообміну для різних типів звичайних і нанорідин.

На рис. 3 представлені графіки залежності теплового потоку від напруги на основному нагрівачі для різних типів рідин.



1 – вода знесолена методом зворотного осмосу; 2 – дистильована вода; 3 – суміш етанол–вода (40%)

Рис. 3 – Графіки залежності теплового потоку від напруги

Досліди проводилися при атмосферному тиску. Для води, очищеної зворотнім осмосом величина критичного теплового потоку становила $q_{кр}=1,24 \cdot 10^6$ Вт/м², а для дистильованої води $q_{кр}=1,29 \cdot 10^6$ Вт/м². Такі результати узгоджуються з даними, наведеними в літературі [6].

Висновки

Обґрунтована методика експериментального дослідження щодо визначення критичних теплових потоків для різного типу рідин з урахуванням способу підготовки базової рідини. Проведена апробація запропонованої методики та експериментального стенда. Запропонована методика дозволяє отримати результати з точністю 5–8 %

Література

1. Кузнецов Ю.Н. Теплообмен в проблеме безопасности ядерных реакторов. – М.: Энергоатомиздат, 1989 – 269 с.: ил.
2. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. Изд. 2-е, М., «Энергия», 1977.
3. In Cheol Bang, Jacopo Buongiorno, Lin-Wen Hu and Hsin Wang. Measurements of key pool boiling parameters in nanofluids for nuclear applications // Journal of Power and Energy Systems. – vol. 2. – No 1, 2008. - pp. 340-351.
4. Xiang-Qi Wang and Arum S. Mujumdar A review on nanofluids – part II: experiments and applications. – Brazilian journal of Chemical Engineering – Vol. 25. – No. 04. – pp. 631-648
5. Das, Sarit Kumar; Choi, Stephen and Patel, Hrishesh. Heat Transfer in Nanofluids – A review. Heat Transfer Engineering, 27: 10, 3-19.
6. Исаченко В.П. Теплопередача. Учебник для вузов, Изд. 3-е, перераб. и доп. М., «Энергия», 1975.

УДК 66.048

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ХОРВАТА И ШУБЕРТА ДЛЯ РАСЧЕТОВ РЕКТИФИКАЦИОННЫХ КОЛОНН ПОЛУЧЕНИЯ ЭТИЛОВОГО СПИРТА ВЫСШИХ КАТЕГОРИЙ КАЧЕСТВА

Калишук Д.Г. канд. техн. наук, доцент, Саевич Н.П. канд. техн. наук
Белорусский государственный технологический университет, г. Минск

Проведен анализ методик графического определения числа теоретических ступеней в колоннах четкой ректификации. Предложено усовершенствование метода Хорвата и Шуберта с целью его использования при расчетах колонн четкой ректификации азеотропных смесей. Приведены примеры расчетов по усовершенствованному методу.

The analysis of techniques of graphic definition of number of theoretical steps in columns of accurate rectification is carried out. Improvement of a method of the Horvath and Schubert for the purpose of its use at calculations of columns of accurate rectification azeotropes mixes is offered. Examples of calculations on an advanced method are resulted.

Ключевые слова: ректификация, этиловый спирт, азеотропная смесь, теоретическая ступень, дистиллят, рабочая линия, равновесная линия.

В химических и смежных производствах, в том числе и пищевых, для разделения жидких гомогенных смесей широко применяют ректификационные колонны. При использовании недостаточно достоверных методик технологических расчетов или ошибках проектировщиков данные аппараты могут вводиться в эксплуатацию как с заниженным, так и с завышенным числом ступеней взаимодействия фаз. Для достижения заданного качества разделения в первом случае колонны должны работать при сниженной производительности и увеличенных флегмовых числах, что влечет за собой увеличение удельного энергопотребления. Во втором случае при заданной производительности требуемое качество разделения достижимо за счет снижения флегмовых чисел. Однако это может быть недопустимо из-за нарушения нормальной гидродинамической обстановки в колонне [1]. Следовательно, усовершенствование методик определения числа ступеней взаимодействия фаз в ректификационных колоннах является актуальной задачей и способствует достижению минимальных приведенных затрат и себестоимости продукции при оптимальных удельных капитальных вложениях и текущих затратах.

В современной практике технологических расчетов ректификационных колонн, в том числе для разделения смеси «этиловый спирт – вода», при определении их высоты одним из наиболее