

На рис. 3, окрім зазначених, наведено також густину теплового потоку  $q''$  до дисперсної суміші при сухій стінці трубки ( $x > x_{гр}$ ). Як видно, величина  $q''$  значно менша за  $q_{max}$  і тим більше  $q_{max}$ , що власне й спричиняє низьку теплову ефективність випарників з повним випаровуванням. Оскільки згідно з даними експериментальних досліджень ряду авторів пара в дисперсній суміші перегріта відносно крапельної рідини [4, 5], то там само наведено значення  $q$  та  $q''$  при перегріві пари  $\Delta t_n = 10$  °С. Як видно, останнє призводить до додаткового зниження  $q$ . На підставі наведених на рис. 2 і 3 результатів розрахунку можна зробити висновок про підвищення теплової ефективності випарників з переходом на неповне випаровування приблизно на 20 %. Завдяки відповідному скороченню температурного напору  $\theta$  і зростанню температури кипіння на 2...3 °С холодильний коефіцієнт зростає приблизно на 10 %.

**4. Висновки та перспектива використання результатів дослідження.** Енергетична ефективність автономного кондиціонера залежить від теплових потоків і температурних напорів у випарнику — охолоджувачу повітря. Вони визначають енергетичні втрати в холодильному циклі від зовнішньої необоротності і залежать від способу організації фазового переходу у випарнику — з повним або неповним випаровуванням.

Встановлено, що при неповному випаровуванні густина теплового потоку у випарнику збільшується на 20 %, холодильний коефіцієнт кондиціонера — приблизно на 10 %.

Розроблена методика теплового розрахунку випарників — охолоджувачів повітря, яка оснований на наявності двох зон кипіння з різною інтенсивністю тепловіддачі: зони інтенсивної тепловіддачі від стінки до рідини, що її омиває, та зони з вкрай низькою інтенсивністю тепловіддачі від сухої стінки до пари з краплями рідини, винесеної з пристінного шару в першій зоні. Наведено основні положення методики розрахунку оптимальної масової швидкості киплячого холодильного агента в трубках випарника, яка забезпечує максимальну густину теплових потоків і відповідно високу енергетичну ефективність автономного кондиціонера.

1. Захаров Ю.В. Судовые установки кондиционирования воздуха и холодильные машины. — СПб., 1994.
2. Hewitt G. F., Govan A.H. Phenomenological modelling of non-equilibrium flows with phase change // Int. J. Heat Mass Transfer. — 1990. — Vol. 33. — P. 243—252.
3. Slipcevic B. Berechnung der druckverluste in rohrbundel warmeaustauschern. — Die Kalte. — 1966. — № 10. — S. 556—564.
4. Ужанский В.С. Автоматизация холодильных машин и установок. — М., 1982.

УДК 621.1

М. Радченко, Л. Клименко, О. Сирота  
Миколаївський державний гуманітарний університет  
імені Петра Могили

## ЕНЕРГООЩАДНІ ТЕХНОЛОГІЇ НА БАЗІ ЕЖЕКТОРНИХ УСТАНОВОК

© Радченко М., Клименко Л., Сирота О., 2004

**A low efficient consumption of heat is supposed to be the reason of its non-rational supply in industries. The efficient heat consumption by ejector steam circulation in technological consumers concept is proposed. Some necessary actions to realize this concept are introduced.**

**Аналіз проблеми та постановка задачі дослідження.** Термін окупності капіталовкладень у енергоощадні технології на порядок менший, ніж у енергоресурсовидобувні галузі. Потенціал економії в цьому напрямку та передусім у процесах споживання пари та транспортних ланцюгах її подачі на

технологічні процеси та відводу відпрацьованого пароконденсату оцінюється в 60 %\*. Повторне використання тепла конденсату, пари, що не сконденсувалася в споживачах, та пари вторинного скипання при дроселюванні конденсату у зворотному конденсатопроводі, а також випару (“сокової” пари) рівнозначно поновлюванню паливно-енергетичних ресурсів, до того ж без будь-яких шкідливих наслідків для довкілля, на відміну від традиційної енергетики.

Найбільшими споживачами пари є підприємства хімічної та нафтохімічної, паперової та харчової промисловості. Близько половини споживаної ними теплової енергії скидається в довкілля у вигляді тепла, води, пари та газу. Скидні теплоносії, як правило, включають домішки шкідливих та отруйних речовин.

**Проблема** скорочення як теплових викидів, так і викидів самих теплоносіїв є найгострішою не тільки в енергетичному, але і в екологічному аспектах.

Всі технологічні споживачі, як правило, живляться із заводської котельної або ТЕЦ з тиском гострої пари 1...5 МПа. Водночас необхідний тиск на вході більшості споживачів пари не перевищує 0,4...0,8 МПа. Знижують тиск до робочого дроселюванням гострої пари. Потенційна енергія пари високого тиску не використовується.

Різні відкладення (накип тощо), які утворюються під час тривалої експлуатації, збільшують термічний опір теплопередачі в технологічному обладнанні і, як наслідок, частку несконденсованої (“пролітної”) пари до 40 % і вище. Застосування конденсатовідвідників не дає істотного покращання ситуації, оскільки через їхнє знесення або невдалу конструкцію, а також через всілякі відкладення кількість “пролітної” пари, яка проривається через них, сягає 20...30 %.

Головними в технологічному ланцюгу тепlopостачання є ланки споживання та транспортування, причому не стільки подачі пари до споживачів, скільки відведення “залишків”, які сягають половини виробленого тепла. Через віддаленість споживачів або забруднення конденсату, який відводиться від технологічного обладнання, він часто не повертається до котельної. Застосування охолоджувачів конденсату та конденсаторів “пролітної” пари пов’язане зі значними затратами як енергії (в градирнях), так і охолоджуючої води, яка вже давно стала дефіцитом, і на обсяги теплових втрат майже не впливає, а під відстійники, які займають великі площі, вилучаються цінні угіддя. Не зменшується також навантаження на довкілля. До того ж при розширенні конденсату в протяжних конденсатопроводах від технологічних споживачів пари до збірників конденсату, температура в яких влітку сягає 80 °С, та його охолоджувачів утворюється пара вторинного скипання, яка є також джерелом скидного тепла.

**Метою дослідження** є економія енергоресурсів у системах паропостачання, причому не за рахунок усунення якихось конструктивних прорахунків, недоробок, неправильної експлуатації теплоспоживаючого обладнання, а впровадженням принципово нової технології паропостачання на базі ежекторних установок.

**Аналіз ефективності виробництва пари низького тиску в ежекторних тепловикористовуючих установках.** Для встановлення природи походження “пролітної” пари в конденсатопроводі (оборотці) проаналізуємо сумісну роботу споживача пари та конденсатовідвідника. При застосуванні останнього повинно відбуватись переохолодження конденсату на 50 °С і більше (залежно від типу конденсатовідвідника: термодинамічного, поплавкового, “з пам’яттю форми”). Випробування варильних котлів на кондитерських фабриках показали, що близько третини часу конденсатовідвідники знаходяться в положенні “закрито”, решта — “відкрито”. Варильні котли працюють швидше як ємності, аніж ефективні теплообмінники: при закритому конденсатовідвіднику в них накопичується конденсат, вилучаючи пару з контакту із охолоджуваною поверхнею, а при відкритому конденсатовідвіднику пара скидається в конденсатопровід. Через вкрай низьку інтенсивність тепловіддачі до практично нерухомого конденсату (на порядок нижчу порівняно з її величиною до сировини, що нагрівається) теплопередача теж неінтенсивна і здійснюється, на відміну від конвективної, переважно за рахунок підвищеної різниці температур (високого тиску пари), тобто

---

\* Доброхотов В.И. К проблеме воздействия энергетики на окружающую среду // Теплоэнергетика. — 1995. — № 2. — С. 2—5.

енергетично затратним механізмом. Це значно збільшує тривалість технологічного процесу, а велика різниця температур призводить до спікання сировини. Тому оператори-технологи часто вдаються до скидання конденсату, обминаючи конденсатовідвідник. Така, так би мовити, технологічна причина наявності “пролітної” пари в конденсатопроводі, частка якої в міру обростання стінок різними відкладеннями та збільшення їхнього термічного опору стає все вагомішою.

Сумісна робота трубчастих теплообмінників із конденсацією як усередині, так і в міжтрубному просторі (бойлери — нагрівники води тощо) з конденсатовідвідниками ще менш ефективна і все з тієї самої причини — накопичення конденсату в їхній хвостовій частці, яка становить 30...50 %. Використання майже половини трубного пучка як акумулюючої конденсат ємності вкрай нераціонально.

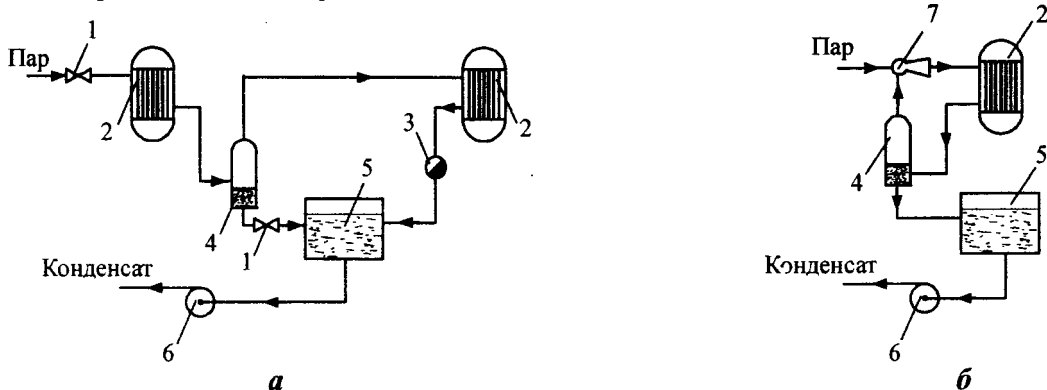
Розв’язання проблеми низької ефективності роботи теплообмінника сумісно з конденсатовідвідником — у переході на принципово відмінний спосіб циркуляції пари, задовольняє взаємовиключні, на перший погляд, вимоги: реалізації неповного фазового переходу і відсутності “пролітної” пари у відповідному конденсатопроводі. Це стає можливим завдяки рециркуляції в теплообміннику несконденсованої пари, тобто утилізації скидного тепла.

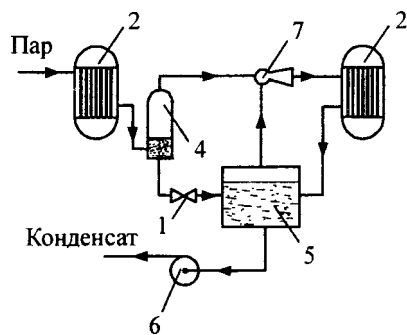
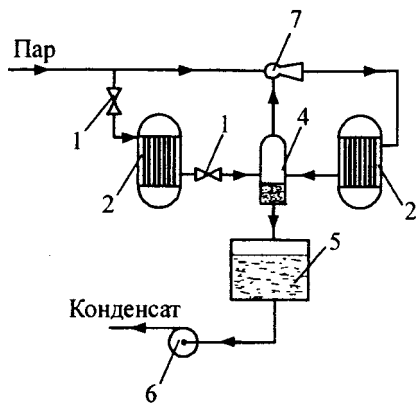
Доречно звернути увагу на ту обставину, що в котлах, особливо високонапружених, багаторазова циркуляція води забезпечує інтенсивне відведення тепла. Функцію сепаратора виконують пароводяні колектори. Критична ситуація в теплозабезпеченні загострює питання застосування технічного рішення, відомого з багатьох галузей.

Розглянемо два види джерел скидного тепла. Перший — відпрацьована (“пролітна”) пара та пара вторинного скипання при розширенні конденсату в конденсатовідвідниках і конденсатопроводах, тиск якої хоча і вищий за атмосферний, та все ж недостатній для повторного використання в технологічному процесі. Другий — це випар, або “сокова” пара, який утворюється під час випаровування вологи з вихідної сировини під вакуумом у випарниках-концентраторах. Сюди слід зарахувати також охолоджуючі середовища (частіше воду) з температурою понад 70 °С, тобто близькою до температури випару. Якщо в першому випадку ежектор служить для підвищення тиску відпрацьованої пари, виконуючи функцію бустер-компресора, то у другому — до неї додається ще функція створення вакууму, достатнього для випаровування води при температурі 70 °С і нижче. Відповідно й умови роботи ежектора в останньому випадку напруженіші і часто вимагають застосування багатоступінчастого ежекування.

Розв’язання обох задач стає можливим завдяки використанню в ежекторі “безкоштовної” потенційної енергії гострої пари високого тиску, яка звичайно втрачається при її дроселюванні від тиску в заводській магістралі до тиску пари в технологічних споживачах. Повторне використання відпрацьованої пари та конденсату, а також охолоджуючої води в тому самому технологічному процесі не потребує їхнього очищення від супутніх запахів і домішок. Знижується також навантаження на очисні споруди.

Для відокремлення “пролітної” пари та пари вторинного скипання від конденсату застосовують сепаратори, які встановлюють зразу ж після теплообмінників — споживачів пари або на конденсатній лінії у місцях збору здросельованої пароконденсатної суміші (рис. 1, а). Такі вузли добре відомі зі ступінчастих випарних установок нафтохімічної промисловості. Приклади ступінчастої конденсації є в паперовій галузі. Залишається тільки замкнути такий сепаруючий вузол на споживач по паровій лінії ежектором.





Запропоновані схемні рішення систем паропостачання:

1 — регулюючий (дросельний) клапан; 2 — теплообмінник-споживач пари; 3 — конденсатовідвідник;  
4 — сепаратор пари; 5 — конденсатозбірник; 6 — живильний насос; 7 — ежектор

На рисунку б—з наведено схеми підключення ежекторів та сепараторів до споживачів пари. Схема на рисунку б є найбільш простим і типовим випадком рециркуляції у технологічному споживачі відпрацьованої (“пролітної”) пари ежектором. Споживачем пари може бути реакторний, випарний, плавильний апарати, нагрівник, дистиляційна установка, куб ректифікаційної колони, десорбер, сушильні плити картону, пластику та іншої продукції або група будь-яких споживачів, від яких пароконденсат відводиться до сепаратора або іншого збірника.

Ефективну експлуатацію двох споживачів із неповною конденсацією, причому другого — з ежекторною циркуляцією пари, забезпечує схемне рішення на рисунку в. У разі нижчих параметрів пари у другому споживачі силовим (робочим) потоком в ежекторі може бути пара порівняно високого тиску із сепаратора після першого споживача (рисунок з). При недостатній кількості або низьких параметрах відпрацьованої пари на вхід ежектора або споживача подають гостру пару з магістралі або котла.

Нижче наведено параметри пари (тиск робочої — гострої пари  $P_p$ , неробочої, “пролітної” або пари вторинного скипання,  $P_n$  та їхньої суміші після ежектора — на вході споживачів  $P_c$ ), коефіцієнти ежекції  $U$  (відношення витрат неробочої, вторинної, пари та робочої — гострої пари) та економія гострої пари від котлів  $E$  за рахунок впровадження ежекторних установок.

$P_p$ , МПа	$P_n$ , МПа	$P_c$ , МПа	Кількість ступенів ежектора	$U$	$E=U/(1+U)$	Об'єкт
3,0	1,3	1,5	1	1,4	0,58	1
3,0	0,1	0,3	1	0,32	0,24	1
2,0	0,6	0,7	1	1,8	0,64	2
1,8	1,0	1,1	1	1,0	0,50	4
1,8	0,5	0,6	1	1,6	0,60	3
1,4	1,0	1,1	1	0,8	0,44	3
1,4	0,5	0,6	1	1,2	0,55	3
1,0	0,5	0,6	1	0,7	0,41	3
0,7	0,3	0,4	1	0,4	0,28	2
0,7	0,1	0,14	1	1,3	0,56	5
1,3	0,02	0,2	2	0,16	0,14	1
1,3	0,01	0,2	3	0,16	0,14	1

Примітка. Дані наведені для об'єктів: 1 — ВО “Фарбовик”, м. Рубіжне; 2 — завод “Зоря”, м. Рубіжне; 3 — ВО “Азот”, м. Сєверодонецьк; 4 — ВО “Склопластик”, м. Сєверодонецьк; 5 — содовий завод, м. Лисичанськ.

Результати обстеження ряду виробництв хімічних підприємств Донбасу (м. Рубіжне, Сєвєродонецьк, Лисичанськ) показали, що близько 40 % споживаної ними теплової енергії скидається в довкілля. Перепади тиску на вводах цехів і в розподільних колекторах від 0,6 до 1,5 МПа (при тиску в споживачах від близького до атмосферного до 1,5 МПа, а в магістральних паропроводах від 0,7 до 3,0 МПа) свідчать про значні резерви використання “безкоштовної” енергії дроселювання. Через велику довжину розгалуженої системи конденсату відсоток його повернення до котельної дуже низький. Розвантаження магістрального конденсатопроводу за допомогою замкнутих контурів циркуляції пари в групах споживачів вирішило б проблему транспортування тепла.

На хімічному заводі “Зоря” (м. Рубіжне) гостра пара тиском 2,0 МПа дроселюється до 0,7 МПа. Після споживачів пароконденсат скидається в пункт збору (відкритого типу). Окрім великих витрат “пролітної” пари, при багаторазовому розширенні конденсату на шляху до конденсатозбірника утворювалась значна кількість пари вторинного кипіння. Використання енергії дроселювання від 2,0 до 0,7 МПа для ежектування вторинної пари в споживачах забезпечує скорочення витрат гострої пари на 20...30 %.

На Лисичанському содовому заводі в цеху хлористого кальцію застосування ежекторної установки для стиснення до 0,14 МПа відпрацьованої пари від апаратів плаву, яка звичайно скидається в атмосферу, та подання суміші знову на споживачі (котел-утилізатор “сокової” пари) забезпечує майже подвійне скорочення споживання гострої пари. Економія пари не менше ніж 30 % передбачається від впровадження ежекторної циркуляції у випарних апаратах і теплообмінниках дистиляційної установки під час виробництва карбаміду (сечовини) на ВО “Азот” (г. Сєвєродонецьк). Велика кількість і високий тиск (близько 1,0 МПа) “пролітної” пари після першого ступеня установки дає змогу застосовувати її як силову для ежектора другого ступеня, виключивши зовсім споживання ним гострої пари.

У розглянутих випадках після споживачів пари необхідне встановлення сепараторів для відокремлення несконденсованої пари від конденсату. Але за наявності магістралі повернення відпрацьованої пари її забір ежектором можна робити безпосередньо зі зворотного паропроводу. Так, на сєвєродонецькому ВО “Склопластик” впровадження ежекторної установки в цеху пароводопостачання звелось до врізання ежектора безпосередньо у зворотний трубопровід пари, відпрацьованої в кубах ректифікаційних колон.

Слід зауважити, що рециркуляція несконденсованої пари є лише одним із варіантів реалізації неповного фазового переходу. В багатьох практичних випадках може виявитись цілком достатньо ступінчастої конденсації (рисунк *a*).

**Висновки та перспектива подальшого використання результатів.** Застосування ежекторної циркуляції відпрацьованої пари та пари вторинного кипіння в технологічних споживачах забезпечує скорочення споживання гострої пари на 20...40 %.

Завдяки простоті конструкції, надійності, вибухо- та пожежобезпечності ежектори найпридатніші для хімічних, нафтохімічних виробництв підвищеної небезпеки. Відсутність рухомих деталей, які передусім виходять із ладу, дає змогу використовувати забруднену пару та пару, яка містить сторонні включення (наприклад, відпрацьовану пару, “пушінку”, в процесах автоклавної обробки цегли та бетону). Повторне використання забрудненої пари різко знижує навантаження на відстійники конденсату, а отже, і довкілля. Це важливо для підприємств хімічної промисловості та будівельних матеріалів. Істотно скорочується забір прісної води на живлення котлів.

Рециркуляційний паровий контур повинен стати невід’ємною периферією крупних або об’єднаних у групи дрібних споживачів пари близького тиску. Необхідно позбавитися стереотипного підходу — обов’язкової повної конденсації пари у споживачах. Охолодження конденсату можна здійснювати після відокремлення від нього пари в допоміжному теплообміннику при вищих швидкостях порівняно з основним теплообмінником.

Ежекторним установкам властива така незаперечна перевага, як мала трудомісткість монтажних робіт, що дозволяє здійснити їх під час зупинки на плановий відновний ремонт або протягом робочої зміни. Такі установки особливо привабливі при модернізації діючих виробництв та виробництв з практично безперервним технологічним циклом.

З питань впровадження установок слід звертатися за адресою: 54003, Україна, м. Миколаїв, вул. 68 Десантників, Миколаївський державний гуманітарний університет ім. Петра Могили, тел.: 0512/50-03-33; 21-41-46; 56-74-31.

УДК 628.322:661.43

**І. Тимофєєв<sup>1</sup>, В. Скіра<sup>2</sup>, А. Молчанов<sup>3</sup>, І. Карпінська<sup>3</sup>**  
Національний університет "Львівська політехніка",

<sup>1</sup>кафедра теплотехніки та теплових електричних станцій,

<sup>2</sup>кафедра техногенно-екологічної безпеки,

<sup>3</sup>Вармінсько-Мазурський університет в Ольштині, Польща,  
кафедра будівництва та інженерії довкілля

## **КОНДИЦІОНУВАННЯ ВОДИ АБСОРБЦІЄЮ КИСНЮ У ПЛІВКОВОМУ РЕЖИМІ**

© Тимофєєв І., Скіра В., Молчанов А., Карпінська І., 2004

**Researches of hydrodynamics and kinetics of absorption of oxygen in a film mode are carried out. The mathematical model of kinetics of process allowing to determine mass diffusion coefficient is received. Results of research enable to calculate and to pick up an absorber for preliminary conditioning of water.**

**Постановка проблеми.** Кондиціонування води, тобто забезпечення її якісних характеристик згідно з вимогами споживача, санітарними нормами та правилами, є надзвичайно актуальним питанням сьогодення. З цією метою здійснюється пошук методів і засобів ресурсощадних процесів та апаратів для попереднього часткового кондиціонування води в найпростіших безнасадкових абсорберах, зокрема для абсорбції кисню  $O_2$ . Результати дослідження гідродинаміки та кінетики абсорбції  $O_2$  в краплинному режимі наведено в [1].

Метою роботи було дослідження гідродинаміки та кінетики абсорбції кисню плівкою води у безнасадковому абсорбері. Задачею дослідження гідродинаміки процесу було одержання характеристик стікання плівки по внутрішній поверхні труби з різних висот при різній густині зрошення. Задачею дослідження кінетики процесу було визначення ступеня насичення плівки рідини компонентом газової суміші та одержання розрахунково-експериментально значень коефіцієнтів масовіддачі. Виконання цих завдань необхідне для розрахунку основних геометричних розмірів плівкового абсорбера.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Залежно від значення  $Re$  існують три режими течії плівки: ламінарний ( $Re < 30$ ), ламінарний з хвилястою поверхнею або перехідний ( $Re = 30 - 1600$ ), турбулентний ( $Re > 1600$ ). У досліджених нами умовах експериментальні результати одержано в перехідному режимі за наявності хвиль на поверхні плівки. У [2] наведено огляд основних фізичних моделей течії плівки з утворенням хвиль. Навіть при дуже малих числах Рейнольдса існують хвилі, які мають малі амплітуди і великі довжини, що ускладнює їхню фіксацію візуально і приладами. Реальна течія плівки супроводжується нерегулярними хвилями тривимірної форми різної амплітуди та частоти, які взаємодіють між собою та трансформуються. П.Л. Капіца вважав, що течія плівки нагадує стікання краплин розтягнутої форми. Е.Г. Воронцов запропонував модель "поршневого насоса", згідно з якою рідина рухається за рахунок надлишкового тиску на поверхні плівки. Перенесення маси в рідкій плівці в таких умовах відбувається шляхом молекулярної дифузії та конвекції одночасно [3].

**Виклад основного матеріалу.** Для дослідів була використана стандартна пластмасова труба діаметром  $d=80$  мм і висотою  $H=6,5$  м, що істотно перевищує висоту труб ( $H \leq 1,5$  м), використаних у відомих експериментальних дослідженнях [2, 3]. Отже, можна припустити, що масовіддача відбувалась в умовах гідродинамічної стабільності плівки. Як і в усіх відомих теоретичних роботах,