

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МАШИНОБУДУВАННЯ
ім. А.М.ПІДГОРНОГО

Круглякова Ольга Володимирівна

УДК 621.175.001.57

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ
ПРОЦЕСІВ ТЕПЛО- ТА МАСООБМІНУ
В КОНДЕНСАТОРІ ЗМІШУЮЧОГО ТИПУ**

05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків –2002

Дисертація є рукописом

Робота виконана на кафедрі теплотехніки Національного Технічного Університету “Харківський політехнічний інститут” Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Братута Едуард Георгійович,
Національний технічний університет “ХПІ”
професор кафедри теплотехніки;

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Горбенко Геннадій Олександрович,
Державний аерокосмічний університет
ім. М.Є.Жуковського “ХАІ”,
завідуючий кафедрою аерокосмічної теплотехніки;
кандидат технічних наук, доцент
Алексахін Олександр Олексійович,
Харківська державна академія міського господарства,
доцент кафедри теплохладопостачання.

Провідна установа: Національний технічний університет України “КПІ”,
кафедра АЕС і інженерної теплофізики

Захист відбудеться “30” травня 2002 р. о _14_ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.180.02 в Інституті проблем машинобудування ім. А.М.Підгорного НАН України за адресою 61046, м. Харків, вул. Дм. Пожарського, 2/10.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Інституту проблем машинобудування ім. А.М.Підгорного НАН України за адресою 61046, м. Харків, вул. Дм. Пожарського, 2/10.

Автореферат розісланий “_23_” квітня 2002 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
кандидат технічних наук

О.Е.Ковальський

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

В останні роки у світовій енергетиці намітилася така тенденція: фактор збільшення економічності енергоблоків, що домінував раніше, починає поступатися вимогам підвищеної експлуатаційної надійності та екологічної безпеки. У ряді випадків ці вимоги реалізуються навіть ціною збільшення капітальних витрат на спорудження електростанцій і за рахунок підвищених питомих витрат палива при її експлуатації.

Одним з найважливіших об'єктів ТЕС і АЕС, що істотно впливає на їх техніко-економічні показники, надійність, а також на навколишнє середовище, є конденсаційно-охолоджувальний комплекс.

Як відомо, термічний ККД циклів сучасних паротурбінних установок становить 0,42 - 0,44. У зв'язку з чим близько 60 % підведеної в циклі теплоти повинно бути відведене з охолоджувальною водою в навколишнє середовище. При цьому більше 97 % води, що надходить на ТЕС і АЕС, використовується для відводу теплоти з конденсаторів турбін і тільки 2-3 % споживається в технологічному циклі.

Дефіцит водних ресурсів, політика розміщення ТЕС і АЕС далі від великих населених пунктів (щоб уникнути наслідків можливих аварій), а також великі обсяги водопостачання на станціях потребують нетрадиційних для енергетики рішень в організації процесу конденсації пари і використанні охолоджувальної води.

З цього погляду самостійною проблемою в перспективному розвитку теплової й атомної енергетики України є проблема оптимального рішення науково-технічних та інженерних задач оборотного водопостачання.

У зв'язку з цим перспективним уявляється використання замкненого конденсаційно-охолоджувального комплексу, основу якого становить конденсатор змішуючого типу, в єдиному контурі з "сухою" градирнею Геллера.

Головна перевага такої системи – повне виключення витрат циркуляційної води через випаровування і механічне унесення (що має місце в звичайних градирнях) і непов'язаність охолоджувального комплексу з природними джерелами водопостачання.

Конденсатор змішуючого типу (КЗТ) є однією з головних складових замкненого конденсаційно-охолоджувального комплексу.

У КЗТ безпосередній контакт парової і рідинної фаз обумовлює практично нульову різницю температур нагрітої води і сконденсованої пари, у той час як у конденсаторах рекуперативного типу має місце недогрів конденсату внаслідок термічного опору теплопереносу. Через зменшення недогріву рідини кратність циркуляції та витрати охолоджувальної води знижуються, що також є дуже важливим фактором у зменшенні енерговитрат на привід циркуляційних насосів.

Процеси перенесення теплоти і маси в контактних конденсаторах – надзвичайно складні. Їх дослідження й розрахунок ускладнюють такі фактори, як взаємопов’язаність тепло- і масообмінних процесів, зміна в часі та просторі поверхні взаємодії пари і краплинного середовища, статистичний характер розподілу крапель за розмірами і брак відомостей щодо механізму конденсації пари на краплях. Існуючі до цього часу методи розрахунку ґрунтуються на використанні об’ємних коефіцієнтів тепловіддачі або різноманітних коефіцієнтів ефективності, що отримані експериментально для даного конкретного досліджуваного апарата і не можуть бути перенесені навіть на геометрично подібні апарати з іншими режимно-експлуатаційними характеристиками.

Таким чином, дисертаційна робота присвячена створенню математичної моделі, що зможе описувати процеси тепло- і масообміну в контактному конденсаторі, який працює при довільному сполученні режимно-геометричних характеристик.

Актуальність теми полягає у вирішенні завдань ресурсозбереження й охорони навколишнього середовища шляхом розробки наукових основ для проектування одного з важливих блоків конденсаційно-охолоджувальних комплексів ТЕС і АЕС, яким є конденсатор змішуючого типу, що працює у схемі з “сухою” градирнею Геллера.

Зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалася відповідно до пріоритетного напрямку розвитку науки і техніки України “Енергоефективні та ресурсозберігаючі технології у промисловості й агропромисловому комплексі” у межах виконання держбюджетних тем: М1609 “Математичне моделювання стаціонарних і нестаціонарних процесів конденсації пари на полідисперсній поверхні тривимірного потоку диспергованої рідкої фази” (№ держ. реєстрації 0197 v 001928) та М1612 “Розробка математичної моделі тепло- і масообміну в дисперсних потоках з урахуванням трансформації дисперсного складу компонентів, що обумовлена фазовими перетвореннями і кінематичною коагуляцією” (№ держ. реєстрації 0100 v 001687).

Мета і задачі дослідження. Мета роботи полягає в розробці методики розрахунку форсункових КЗТ при довільних геометричних і режимних характеристиках апарата.

Задачами дослідження, обумовленими метою роботи, постали:

- створення математичної моделі процесу конденсації пари у форсунковому КЗТ;
- розробка методики проведення числового експерименту;
- проведення комплексних числових досліджень впливу на інтенсивність конденсації режимно-геометричних характеристик конденсатора;
- узагальнення результатів числового експерименту і формування головних розрахункових співвідношень.

Об'єкт дослідження - форсунковий конденсатор змішуючого типу парових турбін ТЕС і АЕС.

Предмет дослідження - процеси тепло- і масообміну при конденсації пари у форсунковому КЗТ.

Методи дослідження. Використано метод математичного моделювання процесів тепло- і масообміну, а також метод планування багатофакторного експерименту для узагальнення результатів числової реалізації математичної моделі.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Вперше розроблено математичну модель процесу конденсації пари у форсунковому КЗТ з довільними схемними рішеннями зрошувальної системи, де єдиною емпіричною інформацією є функція розподілу об'ємів крапель охолоджувальної води за діаметрами.

2. Запропоновано удосконалену методику числової реалізації математичної моделі, яка дозволила стосовно полідисперсного ансамблю розпиленої рідини визначити розподіл ступеня сухості пари за висотою конденсатора при висхідно-спадному напрямку руху дисперсної фази.

3. Вперше на основі методів планування багатофакторного експерименту отримано кореляційне рівняння, яке дозволяє визначити ступінь впливу кожного з факторів на висоту зони конденсації.

4. Запропоновано нову модель трансформації дисперсного складу крапель при взаємодії з сітковими насадками стосовно більш надійного в експлуатації використання форсунок грубого розпилу.

5. Вперше проведено детальний аналіз взаємозалежного впливу практично усіх визначальних факторів на інтенсивність процесів тепломасообміну в форсунковому КЗТ.

Практичне значення одержаних результатів.

1. Створена розрахункова база, яка дозволяє в широкому діапазоні режимних параметрів вести проектування і розробку форсункових КЗТ сучасних парових турбін з довільними схемними рішеннями зрошувальної системи.

2. Розроблене програмне забезпечення, яке дозволяє проводити варіативні передпроектні й остаточні розрахунки форсункових КЗТ з урахуванням взаємозалежного впливу різноманітних факторів.

Впровадження результатів роботи здійснене:

– на ВАТ “Турбоатом” при перспективному проектуванні форсункових КЗТ парових турбін, які працюють у комплексі з “сухими” градирнями Геллера (Акт про впровадження від 8.02.2002);

– на кафедрі теплотехніки НТУ “ХПІ” у навчальному процесі (Акт від 04.02.2002).

Особистий внесок автора. Проведено обчислювальний експеримент та виконано аналіз впливу дисперсного складу на тепло- і масообмін у КЗТ [1]; виконана розрахункова оцінка правомірності вибору типу крайових умов тепло- і масообміну [2]; здійснена постановка задачі про формування математичної моделі, що не містить емпіричних залежностей [3]; запропонована модель дроблення крапель при їх взаємодії з сітковою насадкою [4], наведено оцінку впливу внутрішньої циркуляції в краплині на інтенсивність тепло- та масообміну [5]; проведено розрахунковий експеримент і виконано аналіз результатів [6]; здійснена постановка задачі й розробка програми [7].

Апробація результатів роботи. Результати роботи було повідомлено на міжнародній науково-технічній конференції “Комп'ютер: наука, техніка, технологія, здоров'я” (м. Харків, 1993 р.); міжнародній науково-технічній конференції “Комп'ютер: наука, техніка, технологія, здоров'я” (м. Харків, 1994 р.); міжнародній науково-технічній конференції “Удосконалювання енергетичних і транспортних турбоустановок методами математичного моделювання, обчислювального і фізичного експериментів” (м. Харків, 1994 р.); IV міжнародній науково-технічній конференції “Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я” (Харків, 1996 р.); 10th International TERMO Conference 18-20 June, 1997, Budapest, Hungary; V міжнародній науково-технічній конференції “Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я” (Харків, 1997 р.).

Публікації. Головні результати роботи опублікована в 5 друкованих працях у виданнях, затверджених ВАК України, у 2 тезах доповідей на міжнародних конференціях.

Структура й обсяг дисертації. Робота складається з вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел з 125 найменувань і 3 додатків.

Загальний обсяг дисертації становить 135 сторінок основного тексту, 30 рисунків, 4 таблиці, усього 184 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дослідження, сформульовано мету, задачі, наукову новизну і практичну значущість роботи.

У **першому розділі** наведено огляд теоретичних та експериментальних робіт, які присвячені дослідженню тепло- та масообміну при контактній конденсації пари на краплинах і струменях охолоджувальної рідини. Розглянуто питання визначення кінематичних характеристик диспергованої рідини, зокрема вигляду та розв'язанню рівняння руху краплин, існуючих функцій розподілу діаметрів краплин за розмірами та взаємодії дисперсних потоків в об'ємі апарата. Також наведено аналіз основних типів конденсаторів змішуючого типу.

Другий розділ присвячено опису розробленої математичної моделі процесів тепло- та масообміну в КЗТ. На основі зроблених у першому розділі висновків сформульовано мету роботи й обгрунтовано постановку задачі дослідження.

Відповідно до відомих конструктивних рішень КЗТ процес конденсації пари здійснюється в загальному випадку в трьох головних формах реалізації тепло- і масообміну з охолоджувальною водою: конденсація пари на полідисперсній поверхні крапель, які продуцуються форсунками зрошувальної системи; конденсація на тих струменях води прикореневої частини факела форсунок, що не розпалися; конденсація на поверхні плівки води, яка утворилась при осадженні крапель диспергованої рідини на внутрішніх стінках корпусу КЗТ.

У загальній постановці кінцевим результатом числової реалізації математичної моделі повинно стати визначення розмірів конденсатора, що при заданих витраті пари, його параметрах, початковій температурі охолоджувальної води і вихідній функції розподілу крапель за розмірами, дозволяють забезпечити повну конденсацію пари при заданому ступеню недогріву конденсату до температури насичення і кратності конденсації. Крім того, можливість визначення розрахунковим шляхом впливу всіх режимно-геометричних характеристик апарата дозволить вибрати ті найраціональніші характеристики, при яких мінімізується як розмір апарата, так і енерговитрати, пов'язані з функціонуванням його зрошувальної системи.

У загальному схемному рішенні КЗТ розглядається у вигляді вертикального каналу з прямокутним поперечним перерізом (площа якого дорівнює площі поперечного перерізу вихлопного патрубку турбіни) з верхньою подачею пари і розміщеною усередині зрошувальною системою, яка складається з розбризкувачів, факели яких можуть мати довільну орієнтацію щодо напрямку прямування пари. При розрахунках приймався напрям руху рідини знизу вгору.

Основу математичної моделі у викладеній постановці становлять такі рівняння: функція розподілу крапель за розмірами; рівняння руху краплі; рівняння тепло- і масообміну між парою і відповідними структурами поверхонь охолоджувальної води; балансне співвідношення для взаємодіючих середовищ; термодинамічні співвідношення для зміни стану водяної пари; ряд додаткових співвідношень щодо кінематичної взаємодії окремої краплі та їх сукупності з паровим середовищем; рівняння, що визначають зміну функції розподілу крапель за розмірами як при взаємодії суміжних факелів, так і при взаємодії крапель з перешкодами; рівняння нерозривності парового середовища.

Головною інформацією, що залучається на основі експериментального дослідження процесу диспергування рідини у факелі форсунки, є неперервна диференціальна функція $v(D)$ розподілів об'ємів крапель за діаметрами, що має вигляд

$$v(D) = \frac{2}{3\pi} \beta^4 D^3 K_1 \delta D, \quad (1)$$

де β – параметр розподілу, що визначається експериментально; D – діаметр краплі; K_1 – функція Бесселя другого роду уявного аргументу першого порядку.

Для визначення траєкторії руху краплі i -го інтервалу дискретизації функції розподілу $\nu(D)$, а відповідно і часу її перебування в робочому просторі апарата, використовується рівняння руху у вигляді

$$m_k \frac{d\vec{W}_k}{dt} = \pm \vec{m}g - C_D \Psi(D) \rho_p f_k \frac{|\vec{U}|U}{2}, \quad (2)$$

де m_k – маса краплі; g – прискорення сили тяжіння; C_D – коефіцієнт аеродинамічного опору; $\Psi(D)$ – функція, що враховує деформацію краплі; ρ_p – густина пари; f_k – площа міделевого перерізу краплі; $U = W_p - W_k$ – відносна швидкість краплі; тут W_p, W_k – швидкості краплі та пари.

Рівняння теплового балансу між парою та краплями, тим струменем прикореневої ділянки факела форсунки, який не розпався, і плівкою рідини, яка стікає по внутрішніх поверхнях КСТ, має вигляд

$$M_{п0} i_1 - i_2 = Q_k + Q_c + Q_{пл} + \Delta Q, \quad (3)$$

де $M_{п0}$ – витрата пари; i_1 та i_2 – ентальпії пари на вході й виході з конденсатора; $Q_k, Q_c, Q_{пл}$ – теплота, яка сприйнята відповідно краплями, струменем рідини та плівкою; ΔQ – теплота, яка передана через зовнішню поверхню стінки конденсатора.

На першому етапі побудови математичної моделі кількість теплоти, переданої від пари до крапель, розраховувалась при крайових умовах I-го роду шляхом розв'язання задачі щодо нестационарної теплопровідності краплі в припущенні відсутності внутрішнього перемішування.

Проте виконані оцінки показали, що при тих середніх розмірах крапель, що мають місце при розпилюванні води в конденсаторі, необхідно враховувати перемішування рідини в краплях. У цьому випадку сумарний тепловий потік від пари до окремої краплі з урахуванням внутрішнього перемішування в ній визначається за формулою, запропонованою Б.Чао:

$$Q_{ki} = 0,5\pi D^2 \int_0^\pi q \sin \theta d\theta = \frac{2\sqrt{\pi} D \lambda_s (t_s - t_k) \overline{Pe}^{0,5}}{1 + \beta} I, \quad (4)$$

де I – інтеграл, що описує розподіл відносної густини теплового потоку вздовж кола краплі; β – величина, що залежить від теплофізичних характеристик води та пари; θ – полярний кут в сферичній системі координат; Pe – критерій Пекле.

Загальна кількість теплоти, сприйнята краплями, знаходиться як

$$Q_k = \sum_{i=1}^{i=n} Q_{ki} \frac{6M_{в0} \int \nu(D) dD}{\pi D^3 \rho_v}, \quad (5)$$

де $M_{в0}$ - сумарна продуктивність розпилювачів; n – число інтервалів дискретизації функції $\upsilon(D)$.

Витрата рідини в плівці визначалася, як сума витрати пари $\Delta M_{п.плл}$, сконденсованої на плівці рідини, витрати крапель рідини $\Delta M_{к.плл}$, що випали на поверхню плівки, та витрати пари $\Delta M_{пк}$, сконденсованої на краплях за час їх польоту до стінки КЗТ.

З траєкторних розрахунків польоту крапель, отриманих у результаті числового інтегрування рівняння (2), витрату крапель рідини можна знайти як

$$M_{к.плл} = M_{в0} \int_{D_{к1}}^{D_{к2}} \upsilon(D) D \bar{d}D, \quad (6)$$

де $D_{к1}$ і $D_{к2}$ - мінімальний і максимальний діаметр крапель, що досягли поверхні плівки.

Припускаючи, що зовнішня поверхня плівки має температуру насичення, і, нехтуючи тепловим потоком через стінку конденсатора, визначається зміна середньої температури плівки з рівняння теплопровідності для симетричної необмеженої пластини.

Початкова температура плівки обчислюється як середньомасова температура крапель, що дісталися до плівки. При цьому усереднена температура крапель, що осіли на плівці,

$$\bar{t}_к = \frac{\sum_{i=i_1}^{i=i_2} \bar{t}_{кi} \upsilon(D) \bar{\Delta}D}{\sum_{i=i_1}^{i=i_2} \upsilon(D) \bar{\Delta}D}, \quad (7)$$

де i_1 та i_2 – номери інтервалів мінімальних і максимальних діаметрів крапель у границях $i_1 \rightarrow i_2$ дискретизованої функції розподілу (1), що осіли на плівці відповідно до траєкторних розрахунків.

Розрахувавши зміну середньої температури плівки через момент часу $\Delta\tau_{плл}$, знаходили витрату пари, сконденсованої на плівці:

$$\Delta M_{п.плл} = C_p (\Delta M_{к.плл} + \Delta M_{пк}) t_{плл} \left[\Delta\tau_{плл} - t_{плл0} \right] / r, \quad (8)$$

і, відповідно, кількість теплоти, передана від пари до плівки, буде $Q_{плл} = \Delta M_{п.плл} \cdot r$.

Таким чином, загальна витрата пари, що сконденсувалася на краплях, плівці і початковій ділянці струменя, є:

$$\Delta M_{п} = \Delta M_{к} + \Delta M_{п.плл} + \Delta M_{с}, \quad (9)$$

де $\Delta M_{с} = Q_{с} / r$.

Кінцевий ступінь сухості пари обчислюється як

$$\chi = \frac{M_{п0} \chi_0 - \sum \Delta M_{п}}{M_{п0}}. \quad (10)$$

Кінцева температура конденсату в конденсатозбірнику КЗТ

$$t_{\text{кон}} = \frac{1 - \chi_0 \bar{M}_{\text{п0}} t_s + M_{\text{пл}} \bar{t}_{\text{пл}} + M_{\text{к}} \bar{t}_{\text{к}}}{M_{\text{п0}} (1 - \chi_0) + M_{\text{пл}} + M_{\text{к}}}, \quad (11)$$

де $M_{\text{к}}$ - витрата краплинної маси рідини, що продуціюється усіма форсунками, яка припадає на частку крапель, що не осідають на стінках та дістаються до конденсатозбірника.

Середня температура крапель з витратою $M_{\text{к}}$ визначається як

$$\bar{t}_{\text{к}} = \frac{1}{M_{\text{к}}} \sum_{i=1}^{i=2} M_i t_{\text{ки}}, \quad (12)$$

де M_i – витрата маси крапель i -го розряду.

Крім того у другому розділі наведено математичну модель трансформації функції розподілу крапель за розмірами при взаємодії факела розпилювача з сітковими насадками. Використання сіток на шляху руху краплинного потоку при відповідному сполученні режимних та геометричних параметрів дає можливість збільшити сумарну поверхню краплин за рахунок їх вторинного дроблення без додаткових енергетичних витрат і таким чином підвищити ефективність роботи апарата в цілому.

В основі цієї математичної моделі лежить гіпотеза про те, що діаметр краплі, яка зіштовхується з сіткою, приймається як максимальний у тому спектрі осколків краплі, які утворюються після взаємодії краплини з сіткою. Вірогідність утворення краплин за сіткою складається з вірогідності зіткнення краплини з сіткою та вірогідності дроблення краплини при взаємодії її з сіткою. Ця математична модель дає можливість шляхом розрахунку вибрати дистанцію до сітки та розмір вічка сітки, при яких взаємодія з нею краплі є найбільш ефективною, а також встановити функцію розподілу краплин за розмірами після їх вторинного дроблення.

Третій розділ присвячено числовій реалізації математичної моделі. При числовій реалізації моделі були прийняті такі допущення:

- функція розподілу крапель подавалась у вигляді кусково-сталого апроксимації з точністю менше 5%, а розрахункова похибка була віднесена до крапель максимального діаметра;
- паровий об'єм конденсатора розбивався площинами, які є нормальними щодо напрямку руху пари, на ряд зон (до 30), і в межах кожної зони швидкість пари вважалась сталою (див. рис. 1);
- як початкове приближення задавалась лінійна залежність швидкості парового середовища за глибиною конденсатора з подальшим визначенням реального розподілу швидкості з урахуванням конденсації пари;
- на поверхні краплин задавалися крайові умови I-го роду.

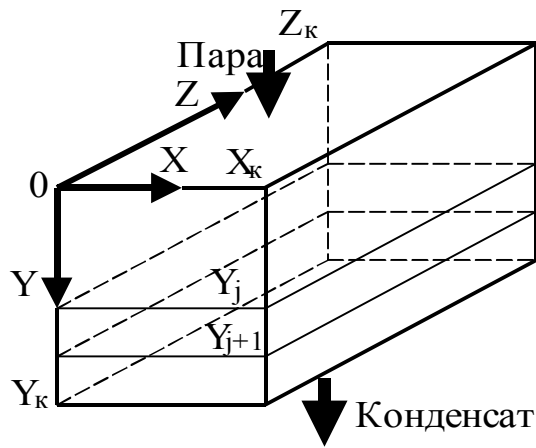


Рис. 1. Схема області розв'язання

Як один з прикладів впливу визначальних факторів на інтенсивність теплообміну в конденсаторі наведено рис. 2, з якого можна зробити наступні висновки.

Рис. 2. Залежність температури краплі \bar{t}_i від режимно-геометричних характеристик

1. В міру збільшення швидкості пари вплив напрямку руху крапель γ істотно зменшується. Так, при швидкості пари 76,5 м/с зміна напрямку γ на 80° приводить до різниці в ступені прогріву, що не перевищує 0,1-0,2 $^\circ\text{C}$ (для краплі $D_i = 3$ мм).

2. Встановлений вплив напрямку руху крапель γ при різній швидкості пари дозволяє в ряді випадків істотно спростити розрахункову схему при числовій реалізації математичної моделі для реальної конструкції КЗТ. Практично всі типи розбризкувачів утворюють факел диспергованої рідини, що має складний просторовий характер. При цьому, крім розходження напрямків руху крапель периметром поперечних перерізів факела (що досягає в ряді випадків 60° відносно осі факела), істотним виявляється і розподіл кутів γ за діаметрами крапель у тому самому факелі. Швидкість пари на вході в конденсатор парової турбіни коливається від 60 до 80 м/с, тому без помітних похибок потік краплинного середовища, що продуціюється розбризкувачем, можна приймати одновимірним, спрямованим, приміром, уздовж його осі.

Результати чисельного експерименту з зіставлення акумульованої краплею теплоти з урахуванням внутрішнього перемішування та без нього, з використанням рівняння руху краплі подані на рис. 3.

Рис. 3. Залежність акумульованої краплею теплоти від часу перебування τ , діаметра краплі D , напрямку її руху відносно руху пари φ :

Q_k - теплосприйняття краплі з урахуванням перемішування вихорами Хілла; Q_t - те ж саме для моделі твердої сфери;

—◆—	— $D = 2$ мм, $\varphi = 0$ рад.;	——◆	— $D = 4$ мм, $\varphi = 0$ рад.;
--◆--	— $D = 2$ мм, $\varphi = 0,8$ рад.;	--◆--	— $D = 4$ мм, $\varphi = 0,8$ рад.;
—■—	— $D = 1$ мм, $\varphi = 0$ рад.;	——■	— $D = 6$ мм, $\varphi = 0$ рад.;
--■--	— $D = 1$ мм, $\varphi = 0,8$ рад.;	--■--	— $D = 6$ мм, $\varphi = 0,8$ рад.

Аналіз цих даних показує, що для крапель малого діаметра (~ 1 мм) вплив внутрішнього перемішування підвищує теплосприйняття тільки в початковий період. У той же час для крапель більшого діаметра ($2 \div 6$ мм) перемішування дещо істотніше збільшує теплосприйняття (до 4-разового зростання) і має місце протягом усього часу перебування краплі в паровому середовищі.

З цих же даних виходить, що відносний напрямок руху краплі (стосовно напрямку руху пари) практично не позначається на кількості акумульованої теплоти.

На основі усього сказаного було зроблено висновок, що при реалізації математичної моделі КЗТ варто враховувати вплив внутрішнього перемішування в краплях, викликане вихорами Хілла, на розмір акумульованої теплоти.

Таким чином, загальний алгоритм числового розв'язання задачі конденсації пари в КЗТ набуває такого вигляду:

- за наявним розподілом швидкості пари за глибиною парового простору конденсатора проводиться траєкторний розрахунок руху краплинного середовища, що продуціюється форсунками;
- у процесі цього розрахунку визначається: мінімальний номер розрахункового шару (перерізу) конденсатора, у який потрапляють краплі форсунок, і номер шару (перерізу), починаючи з якого краплинне середовище випадає на стінки конденсатора;
- розраховується пошарова конденсація пари на краплях і на плівці конденсату;
- розраховується, виходячи з пошарового розрахунку конденсації, новий розподіл швидкості пари за глибиною конденсатора;
- порівнюється початковий та отриманий розподіл швидкості пари за глибиною конденсатора, і при похибці, що перевищує допустиму, весь розрахунок повторюється.

Перевірка збігу розв'язання проводилася виходячи з рівняння теплового балансу конденсатора. При заданих параметрах і витраті пари у вихлопному патрубку турбіни, а також початковій температурі охолоджуючої води і недогріві води в конденсаторі до температури насичення з рівняння теплового балансу визначалася необхідна витрата охолоджуючої води.

Як об'єкт порівняння був вибраний конденсатор змішуючого типу Угорської фірми EGI, що

працює з турбіною K200–130 НВО ЛМЗ.

Заклавши у математичну модель режимні параметри роботи конденсатора, а також результати експериментального визначення функції розподілу обсягів крапель за діаметрами для заданих форсунок, що утворюють зрошувальну систему конденсатора, можна розрахувати його головну характеристику – глибину, тобто відстань від площини фланцевого рознімання між турбіною і конденсатором до рівня води в конденсатозбірнику.

Параметр розподілу β у рівнянні (1) приймався (за даними роботи Е.Братути та Л.Заночкіна) на основі експериментального дослідження дисперсного складу крапель, що продуцуються форсункою розглянутого конденсатора при тиску охолоджувальної води 1,5 бар.

Розбіжність між значеннями глибин тестового конденсатора та одержаних з розрахунку на основі математичної моделі становило 7,7%, що свідчить про достатню адекватність математичної моделі.

У четвертому розділі описані результати аналізу впливу дисперсних та кінематичних характеристик краплинного середовища на інтенсивність процесу конденсації пари в КЗТ.

Був обгрунтований вибір таких початкових даних для числового аналізу, як початкова температура охолоджувальної води $t_{1в}$, тиск охолоджувальної води перед форсунками ΔP_{ϕ} , кут розкриття факела форсунки γ , максимальний діаметр крапель D_{max} та кратність конденсації m .

Враховуючи велику кількість факторів, які впливають на інтенсивність тепломасообміну, для скорочення обсягу розрахунків було використано планування багатофакторного експерименту.

Для обробки результатів був залучений метод Бокса та Бенкена, що відрізняється високою точністю результатів узагальнення при мінімальній кількості окремих експериментів. Ще однією позитивною якістю методу є мінімальна похибка апроксимації, яка безпосередньо закладена в алгоритмі методу.

Згідно з матрицею планування було проведено 41 окремий розрахунковий експеримент. Як результат обробки даних одержано узагальнююче кореляційне рівняння, яке є справедливим в такому діапазоні зміни режимних параметрів: $D_{max} = 1\text{--}3$ мм; $\Delta P_{\phi} = 1\text{--}2$ бар; $\gamma = 20\text{--}60^{\circ}$; $t_{1в} = 10\text{--}20$ °С; $m = 50\text{--}70$. Рівняння має вигляд

$$\begin{aligned} H = & 3,09 - 0,214\gamma + 0,8075\Delta P_{\phi} - 0,07m + 1,13D_{max} + 0,405t_{1в} - 0,07\gamma^2 - \\ & - 0,106\Delta P_{\phi}^2 + 0,08m^2 - 0,4D_{max}^2 + 0,005t_{1в}^2 - 0,06\gamma\Delta P_{\phi} - \\ & - 0,0175\gamma m - 0,025\gamma D_{max} + 0,1125\gamma t_{1в} - 0,022\Delta P_{\phi} m + \\ & + 0,445\Delta P_{\phi} D_{max} + 0,04\Delta P_{\phi} t_{1в} - 0,147m D_{max} - 0,0375m t_{1в} + 0,19 D_{max} t_{1в}. \end{aligned} \quad (12)$$

На підставі рівняння (12) було проаналізовано вплив режимних параметрів на інтенсивність

процесу конденсації.

На основі математичної моделі також проведено розрахунок локальних об'ємних коефіцієнтів теплообміну за висотою конденсатора. Показано, що в тій зоні конденсатора, де має місце максимальний рівень об'ємної концентрації дисперсної фази, локальний об'ємний коефіцієнт теплообміну досягає найбільших значень.

Значення середнього об'ємного коефіцієнта тепловіддачі, отримані розрахунковим шляхом з використанням універсальної математичної моделі (рис. 4), можуть бути використані для різних типорозмірів конденсатора без проведення натурних експериментів.

При цьому, якщо поперечний переріз конденсатора завжди є заданим (відповідно до розмірів перерізу вихлопного патрубку турбіни), то розрахунок необхідного об'єму робочого простору однозначно визначає і висоту конденсатора.

Рис. 4. Залежність об'ємного коефіцієнта тепловіддачі від впливаючих факторів:

1 – $\Delta P_{\phi} = 1$ бар; 2 – $\Delta P_{\phi} = 2$ бар.

ВИСНОВКИ

1. На основі аналізу літературних джерел зроблено висновок про перспективність використання конденсаторів змішуючого типу у блоці з “сухими” градирнями Геллера, що дозволяє розміщати ТЕС і АЕС далі від природних джерел водопостачання. Їх застосування обумовлене, зокрема, зростаючими вимогами до економії водних ресурсів і до забезпечення екологічно безпечної експлуатації ТЕС і АЕС.

2. У доступній автору літературі відомості про методики розрахунку або математичні моделі форсуноквих конденсаторів змішуючого типу відсутні. Існуючі методи розрахунку КЗТ ґрунтуються на емпіричних залежностях, отриманих для даного конкретного досліджуваного апарата, і не можуть бути перенесені навіть на геометрично подібні апарати з іншими режимно-експлуатаційними характеристиками. У зв'язку з цим математичне моделювання процесу конденсації пари в конденсаторі контактного типу, вільне від необхідності застосування експериментальних даних, пов'язаних з конкретними режимно-геометричними характеристиками апарата, є найбільш доцільним методом формування розрахункової методики.

3. Сформовано математичну модель процесів тепломасообміну при контактній конденсації пари у форсунковому КЗТ, що дає можливість визначення кількості сконденсованої пари на всіх структурних фрагментах охолоджуючої рідини (краплі, плівка, ділянка струменя, що не розпалась) і не містить емпіричних співвідношень (крім функції розподілу краплин за розмірами, яка одержується з експериментального дослідження форсунок).

4. Розроблено методику числової реалізації математичної моделі з розрахунковим обґрунтуванням ступеня дискретизації функції розподілу крапель за розмірами і робочого простору апарата при наперед заданій похибці у визначенні ступеня недогріву охолоджувальної води.

5. Запропоновано математичну модель трансформації краплинного потоку при взаємодії його з сітковими насадками, що дозволяє при проектуванні конденсатора мінімізувати число розпилюючих пристроїв і підвищити надійність їх роботи при забезпеченні необхідного дисперсного складу розпилюючої рідини.

6. Показано, що стосовно умов конденсації пари в КЗТ, застосування моделі “вихору Хілла” для врахування теплосприйняття краплі при її русі у власній парі дозволяє одержати дещо інший розв’язок задачі.

7. У результаті проведення тестового обчислювального експерименту, в якому закладалися початкові режимні характеристики КЗТ угорської фірми EGI, розрахункова висота конденсатора, отримана з використанням запропонованої в роботі методики, відрізнялася від висоти реального апарата на 7,7 %, що свідчить про достатню адекватність математичної моделі.

8. З використанням методики планування багатofакторного експерименту було отримано кореляційне рівняння, що дозволило установити взаємозалежний вплив усіх визначальних параметрів на висоту робочої зони конденсатора.

9. З’ясовано, що найсильніше на висоту робочої зони впливають перепад тиску охолоджувальної води перед форсунками, дисперсний склад рідини та її початкова температура, у той час як вплив кратності конденсації і кута розкриття факела форсунки виявляється істотно меншим.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ З ТЕМИ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Влияние дисперсно-кинематических характеристик капельной среды на интенсивность теплообмена при контактной конденсации пара / Р.Г.Акмен, Э.Г.Братута, О.В.Круглякова, Т.И.Ярошенко // Вестн. Харьк. гос. политехн. университета. – Харьков: ХГПУ. – 1998.– Вып. 13. – С. 41-44.

2. Братута Э.Г., Акмен Р.Г., Круглякова О.В. Выбор краевых условий теплообмена при математическом моделировании процессов конденсации пара на поверхности капель диспергированной жидкости // Интегровані технології та енергозбереження. – 1999. – №1. – С. 31–37.

3. Математическая модель конденсации пара в аппарате контактного типа / Э.Г.Братута, Т.И.Ярошенко, Р.Г.Акмен, О.В.Круглякова // Электронное моделирование. – 1999. – №4. – С. 28–34.

4. Братута Э.Г., Круглякова О.В. Трансформация функции распределения капель по

размерам при взаимодействии факела распылителя с сеточной насадкой // Проблемы машиностроения. – 2000. – № 1-2. – С. 46–52.

5. Акмен Р.Г., Братута Э.Г., Круглякова О.В. Влияние внутренней циркуляции в капле на тепловосприятие капельной среды в конденсаторе смешивающего типа // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2001. – №3. – С. 18–22.

6. Братута Э.Г., Акмен Р.Г., Круглякова О.В. Зависимость интенсивности тепломассообмена в конденсаторе смешивающего типа от взаимного направления движения сред // Труды межд. научно-техн. конф. “Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье”. – Харьков: ХГПУ. – Ч.2. – 1997.– С.16–18.

7. Bratuta E.G., Yaroshenko T.I., Krugliakova O.V. The influence of interacting surface structure and irrigation scheme on heat and mass transfer in direct contact condenser // Proc. 10th International TERMO Conference 18–20 June, 1997, Budapest, Hungary. – P. 327–330.

АНОТАЦІЯ

Круглякова О.В. Математичне моделювання процесів тепло- та масообміну в конденсаторі змішуючого типу. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – технічна теплофізики та промислової теплоенергетика. Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України. – Харків, 2002.

Дисертацію присвячено розробці методики розрахунку форсункових конденсаторів змішуючого типу (КЗТ) при довільних геометричних і режимних характеристиках апарата. Подано опис розробленої математичної моделі, яка включає рівняння тепломасообміну, гідродинаміки та теплового балансу при взаємодії пари з полідисперсною поверхнею краплин, а також плівок і тих частинок прикореневої ділянки факелу розпилювачів, що не розпалися. Сформовано математичну модель трансформації дисперсного складу краплин при взаємодії факелу розпилювача з сітковими насадками. Проведено перевірку адекватності математичної моделі реальним процесам тепломасообміну в контактному конденсаторі Угорської фірми EGI. На основі методики планування числового експерименту з використанням методу Бокса та Бенкена одержано узагальнююче кореляційне рівняння для визначення робочої висоти конденсатора в залежності від режимних і геометричних характеристик апарата. Наведено результати числових досліджень інтенсивності теплообміну із застосуванням запропонованої математичної моделі та виконані розрахунки локальних і середніх об'ємних коефіцієнтів теплообміну.

Ключові слова: конденсатор, контактний тепломасообмін, полідисперсна дискретна фаза, математична модель.

АННОТАЦИЯ

Круглякова О.В. Математическое моделирование процессов тепло- и массообмена в конденсаторе смешивающего типа. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.06 – техническая теплофизика и промышленная теплоэнергетика. – Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины. – Харьков, 2002.

Диссертация посвящена разработке методики расчета форсуночных конденсаторов смешивающего типа (КСТ) при произвольных режимных и геометрических характеристиках аппарата. Представлено описание разработанной математической модели, которая включает уравнения тепломассообмена, гидродинамики и теплового баланса при взаимодействии пара с полидисперсной поверхностью капель, а также пленок и нераспавшейся части прикорневых зон факела распылителя. Функция распределения капель по размерам задавалась однопараметрическим уравнением, в котором параметр распределения для форсунок оросительной системы конденсатора устанавливался экспериментально. Математическая модель была реализована с использованием граничных условий I-го рода при теплообмене между паром, каплями и пленкой воды. Принималось также, что вторичное дробление и коагуляция дискретной фазы не оказывают влияния на интенсивность тепло- и массообмена.

Приведена математическая модель трансформации дисперсного состава капель при взаимодействии факела распылителя с сеточными насадками, в основе которой лежит гипотеза о том, что столкнувшаяся с сеткой капля, является максимальной в распределении ее осколков. Эта гипотеза базируется на результатах многочисленных экспериментов, выполненных на кафедре теплотехники НТУ “ХПИ”, в которых было установлено, что независимо от способа и режима дробления капель произведение максимального диаметра капель в ансамбле на параметр распределения используемой функции есть величина постоянная. Вероятность образования капель за сеткой складывается из вероятности столкновения капель с сеткой и вероятности существования капли данного размера в общем спектре после взаимодействия с сеткой. Необходимость решения такой задачи была обусловлена тем, что использование сеточных насадок позволяет реализовать необходимый спектр распыла капель при увеличенных проходных сечениях форсунок, а следовательно, при сокращении их числа в конденсаторе.

Основные расчеты при реализации математической модели процессов тепло- и массообмена в конденсаторе были выполнены для схемы с нижним расположением оросительной системы и встречном движении пара и капель.

Для установления адекватности предложенной в работе математической модели был выполнен численный эксперимент, для которого дисперсный состав капель, продуцируемых

распылителями, параметры и расход пара и циркуляционной воды на входе в конденсатор, площадь входного сечения конденсатора принимались такими же, как в действующем в условиях станции конденсаторе Венгерской фирмы EGI. В результате расчета в соответствии с предложенной в работе методикой обнаружено, что расчетная рабочая высота конденсатора, на которой завершается процесс конденсации, отличается от этой величины в конденсаторе фирмы EGI не более, чем на 7,7%, что явилось основанием считать предложенную математическую модель адекватной реальным процессам конденсации. Проведенные расчеты подтвердили, что применение модели “вихря Хилла” для учета тепловосприятости капли при ее движении в собственном паре позволяют существенно уточнить математическую модель конденсации пара в КСТ.

На основе методики планирования численного эксперимента с использованием метода Бокса и Бенкена получено обобщающее корреляционное уравнение для высоты конденсатора в зависимости от начальной температуры охлаждающей воды, перепада давления на форсунке, угла раскрытия факела, кратности конденсации и максимального диаметра капель в распыле.

На основе предложенной математической модели получены результаты численных исследований интенсивности теплообмена в функции всех определяющих параметров. Установлено, что наиболее сильное влияние на высоту рабочей зоны конденсации оказывают перепад давления на форсунках, дисперсный состав капель и начальная температура охлаждающей жидкости, в то время как влияние кратности конденсации и угла раскрытия факела форсунки оказывается существенно меньше.

Для проведения инженерных расчетов в предпроектный период предложены зависимости, позволяющие определить значения объемных коэффициентов тепло- и массообмена и проанализировать их изменение в зависимости от основных параметров и объемной концентрации капель.

Так как в предложенной математической модели единственной эмпирической величиной является параметр функции распределения капель по размерам, который не зависит от конкретных режимно-геометрических характеристик рассчитываемого аппарата, то можно считать, что предложенная расчетная методика носит универсальный характер и может быть использована не только для расчета КСТ паровых турбин, но и для ряда других контактных тепломассообменных аппаратов.

Ключевые слова: конденсатор, контактный тепломассообмен, полидисперсная дискретная фаза, математическая модель.

ABSTRACT

Kruglyakova O.V. Mathematical simulation of heat and mass transfer in direct contact condenser.
– Manuscript.

Thesis for submitting of the scientific degree of Candidate of Technical Science in specialty 05.14.06 – Technical Thermal Physics and Industrial Heat Power Engineering. – F.M. Podgorny Institute for Mechanical Engineering Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine: Kharkov, 2002.

The thesis is devoted to the working out the method of calculation of spraying contact condenser in case of arbitrary combination of regime and geometrical condenser characteristics. The mathematical model including equations of heat and mass transfer, hydrodynamics and heat balance in case of steam interaction with polydispersed drops surface, films and unbreaking spray cone zone is given. The mathematical model of drops dispersed structure transformation under the spray cone interaction with grid mouthpieces is developed. Adequacy of the model to the real heat and mass transfer processes in EGI direct contact condenser is proved. The generalizing correlating equation for condenser working height as a function of regime and geometrical characteristics is obtained on the basis of calculation experiment planning using Box and Benken method. The results of calculating investigation of heat exchange intensity using the model are presented. The calculations of local and average heat transfer volume coefficients are made.

Key words: condenser, contact heat and mass exchange, polydispersed discrete phase, mathematical model.

Відповідальний за випуск к.т.н. , доц. Акмен Р.Г.

Підп. до друку 12.04.2002 р. Формат видання 145x215.

Формат паперу 60x90/16. Папір Морга. Друк – ризографія.

Обсяг 0,9 авт. арк. Тираж 100 прим. Зам. № 22.

Видавничий центр НТУ “ХП”. Свідоцтво ДК № 116 від 10.07.2000 р.

Друкарня НТУ “ХП”, 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21
