

УДК 662.995

ст.наук.співр. **Анатолій Макаров**,
Stefanovich makarov.anatoly@kmbp.com.ua,
голова наглядової ради **Андрій Ходос**,
khodos@kmbp.com.ua,
заступник директора **Михайло Кирієнко**,
mihail_kirienko@ukr.net,
ПрАТ «Калинівський машинобудівний завод», м. Калинівка, Україна
к.т.н., доц. **Михайло Сенчук**,
smp_21@ukr.net, ORCID: 0000-0001-8968-7336,
Київський національний університет будівництва і архітектури, Україна

ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ БАГАТОКОРПУСНОЇ ВАКУУМ-ВИПАРНОЇ УСТАНОВКИ

Проаналізовано сферу застосування багатокорпусних вакуумно-випарних установок для концентрування розчинів та перспективність їх впровадження в молочній, крохмально-патоковій та інших галузях промисловості для згущення продукту з високою в'язкістю, виробництва сухих молочних продуктів, молочних консервів з цукром, а також в умовах низької вартості пари при спалюванні місцевих палив чи при комбінованому виробництві електричної і теплової енергії. Запропоновано удосконалену методичку розрахунку багатокорпусної вакуум-випарної установки з паровою компресією для згущення молочних продуктів, особливістю якої є комірчаста структура розрахункової моделі у вигляді розрахункових таблиць, сформованих за окремими технологічними та конструктивними параметрами установки. Наведено результати модернізації чотирикорпусної вакуум-випарної установки з паровою компресією фірми «Альфа_Лаваль Шефферс», виконаної на підставі аналізу даних багаторічної її експлуатації по концентруванню молочних продуктів та розрахункових, експериментальних і пуско-налагоджувальних досліджень з метою удосконалення основних функціональних вузлів для забезпечення надійної і ефективної роботи. Викладено виконані дослідження за напрямками: удосконалення функціональної схеми установки; удосконалення методички теплового розрахунку у відповідності до прийнятої функціональної схеми; визначення розрахункових теплових і гідравлічних характеристик роботи установки; аналіз існуючих способів зрошення поверхні випарних труб з падаючою плівкою, відпрацювання на моделях конструкції вузла зрошування і режимів його роботи; встановлення методів надійного відведення конденсату і модернізація конденсатопроводів. Ефективність реалізованих технічних рішень підтверджено результатами пуско-налагоджувальних випробувань

модернізованої установки та під час її подальшої експлуатації. Набутий науково-технічний досвід ПрАТ «Калинівський машинобудівний завод» (м. Калинівка, Вінницька обл.) по модернізації та введення в експлуатацію згаданої чотирикорпусної установки у сукупності з досвідом виробництва високоефективних однокорпусних вакуумно-випарних установок з механічною компресією ВВУ-Мк і двокорпусних з комбінованою компресією ВВУ-Мк-Пк є основою для організації виробництва в Україні багатокорпусних випарних установок з паровою компресією.

Ключові слова: багатокорпусна вакуум-випарна установка; концентрування; згущення продукту; механічна компресія; парова компресія; нагрівна пара; вторинна пара; екстрапара; удосконалена методика розрахунку.

Вступ. Молочно-консервна промисловість України потребує для модернізації виробничого процесу на молокозаводах новітнього ефективного обладнання. Зокрема, впровадження енергоефективних випарних установок для згущення незбираного і знежиреного молока в молочно-консервних виробництвах, молочної сироватки, соків та інших рідин. Парк установок на молокозаводах України складається з застарілих циркуляційних двокорпусних установок Wiegandt та невеликої кількості три- і чотирикорпусних установок плівкового типу. За останні роки на ПрАТ «Калинівський машинобудівний завод» освоєно виробництво високоефективних однокорпусних вакуумно-випарних установок з механічною компресією ВВУ-Мк і двокорпусних з комбінованою компресією ВВУ-Мк-Пк [1], а також високоефективних повітрянагрівачів для сушильних установок [2]. Разом з тим існує сфера, де багатокорпусні установки з паровою компресією зберігають свою перевагу. Це згущення продукту з високою в'язкістю, виробництво молочних консервів з цукром, а також в умовах низької вартості пари при спалюванні місцевих палив чи при комбінованому виробництві електричної і теплової енергії. Виробництво таких вакуум-випарних установок для молочної промисловості в Україні відсутнє. Впроваджені в експлуатацію закордонні зразки установок вичерпали експлуатаційний ресурс, тому аналіз досвіду їх багаторічної експлуатації та модернізації основних вузлів є важливим для можливої організації вітчизняного виробництва багатокорпусних установок з паровою компресією.

Актуальність дослідження. Вакуумно-випарні установки з паровою компресією широко використовуються для згущення при виробництві сухих молочних продуктів. Підвищення ефективності роботи вакуум-випарних установок для технологічних процесів концентрування продуктів молочно-консервних виробництв із забезпеченням економічності та надійності конструкцій протягом тривалої експлуатації є важливим завданням для

прогресивного розвитку галузі.

Дослідження виконувались з метою модернізації чотирикорпусної вакуумної випарної Альфа-Лаваль Шефферс, яка використовувалася для концентрування незбираного, знежиреного молока і молочної сироватки, та включають: удосконалення функціональної схеми установки; розробку методики теплового розрахунку у відповідності до прийнятої функціональної схеми; визначення розрахункових теплових і гідравлічних характеристик роботи установки; аналіз існуючих способів зрошення поверхні випарних труб з падаючою плівкою, відпрацювання на моделях конструкції вузла зрошування і режимів його роботи; встановлення методів надійного відведення конденсату і модернізація конденсатопроводів.

Останні дослідження та публікації. При модернізації і внесенні змін в конструкцію вакуумно-випарної установки важливими є:

- функціональна схема і методи її теплового розрахунку;
- дані по інтенсивності тепловіддачі при плівковій конденсації і плівковому випаруванні на поверхні кожухотрубчастого теплообмінника;
- гідравлічна схема парового тракту і визначення складових величин гідравлічної депресії [1];
- способи рівномірного плівкового зрошення поверхні випарних труб;
- методи надійного відведення конденсату і використання його тепла.

Існуючі функціональні схеми і методики теплових розрахунків наведено в сучасних довідниках і підручниках [3, 4], в яких вважаються актуальними і використовуються методи розрахунку запропоновані Х.З. Классеном, І. А. Тищенко, М.А. Кичигиним. Загальний огляд схем вакуумно-випарних установок і методи розрахунків процесі теплопередачі в них приведено в [5], вимоги до облаштування конструкцій їх теплообмінників в [6]. Більш пізні дослідження роботи багатокорпусних випарних установок направлені на застосування для теплових розрахунків сучасних прикладних програм [7], або знаходження динамічних характеристик установок в процесі забруднень від тривалої експлуатації чи змінюваної кількості екстра-пари [8].

Дані по інтенсивності тепловіддачі при плівковій конденсації і плівковому випаруванні приведені в [9]. Нові дослідження направлені на уточнення розрахунків теплопередачі і розширення сфери переробки продуктів наведено в [10, 11, 12]. Процес і способи зрошення випарних труб з падаючою плівкою детально описані в [13]. Проаналізовані зокрема зрошувальні пристрої щільні, переливні, струменеві, розбризкувальні. У [14] приведені порівняння конструкцій вузлів зрошення вакуумних випарних установок для згущення молока, в тому числі чотирикорпусної вакуумно-випарної Альфа-Лаваль Шефферс.

Формулювання цілей статті. Аналіз результатів тривалої експлуатації багатокорпусної установки фірми «Альфа-Лаваль», розробка удосконаленої методики теплового розрахунку установки із застосуванням сучасних прикладних програм, дослідження і вдосконалення основних функціональних вузлів, проведення модернізації, пуско-налагоджувальних випробувань та введення установки в експлуатацію. Набутий науково-технічний досвід по модернізації та введення в експлуатацію згаданої установки у сукупності з досвідом виробництва одно- і двокорпусних вакуумно-випарних установок може бути основою для організації виробництва в Україні багатокорпусних установок з паровою компресією.

Основна частина. У роботі розглянуто багатокорпусну вакуум-випарну установку для згущення молочних продуктів [14, 15], модернізацію якої після її тривалої роботи проведено з метою підвищення надійності та ефективності роботи на підставі теоретичних та експлуатаційних досліджень.

1. Схема багатокорпусної вакуум-випарної установки

Чотирикорпусна вакуумно-випарна установка плівкового типу «Альфа-Лаваль» з паровою компресією містить (рис. 1):

- випарні колони (ЕО1...ЕО3, ЕО4а і ЕО4б), насоси (1МО) для примусової циркуляції продукту, сепаратори (С11...С14), винесені камери нагрівання вхідного продукту (Pr21...Pr24) – теплообмінники змієвикового типу для підігрівання вторинною паровою (екстрапаровою), парові компресори ТК-1 і ТК-2;

- теплообмінник пластинчатого типу 1 ТН01 для підігрівання вхідного продукту конденсатом;

- теплообмінники змієвикового типу Pr25 та Pr26 на вході у першу випарну колону для кінцевого нагрівання вхідного продукту за допомогою парових компресорів ТК-1 та ТК-2 сумішшю гострої і вторинної пари;

- конденсатор С 01;

- трубопроводи вхідного продукту, концентрованого продукту, гострої пари, вторинної пари, конденсату, охолоджувальної води. Продуктові трубопроводи, паропроводи та конденсатопроводи утворюють відповідні контури в технологічній схемі багатокорпусної установки.

Продуктовий контур. Вхідний продукт (знежирене молоко з вмістом сухих речовин 8,0 % та температурою 8 °С) в установку поступає через трубну панель в балансний бак, а далі в теплообмінник Pr21 кінцевого випарного апарата ЕО4, в якому підігрівається вторинною паровою (екстрапаровою з сепаратора С14) до температури 27,1 °С, а в теплообміннику 1 ТН01 підігрівається сумішшю конденсату з конденсатора С 01 та конденсатозбірника 5R01 до температури 41,9 °С. Далі сировинний продукт попередньо підігрівається за послідовного проходження в теплообмінниках Pr21...Pr26. Нагрітий продукт до температури

80,6 °С з вмістом сухих речовин 8,0 % надходить у випарну колону EO1, де розпочинається процес концентрування до вмісту сухих речовин ~ 11,0 %. З першого корпусу продукт надходить в другий, потім послідовно до останнього, проходячи концентрування до потрібної величини вмісту сухих речовин. У кожній з випарних колон EO4a і EO4б продукт проходить послідовно по дві секції пучків труб. З випарної колони EO4б з кінцевою концентрацією 48 % готовий продукт подається до вихідної панелі установки.

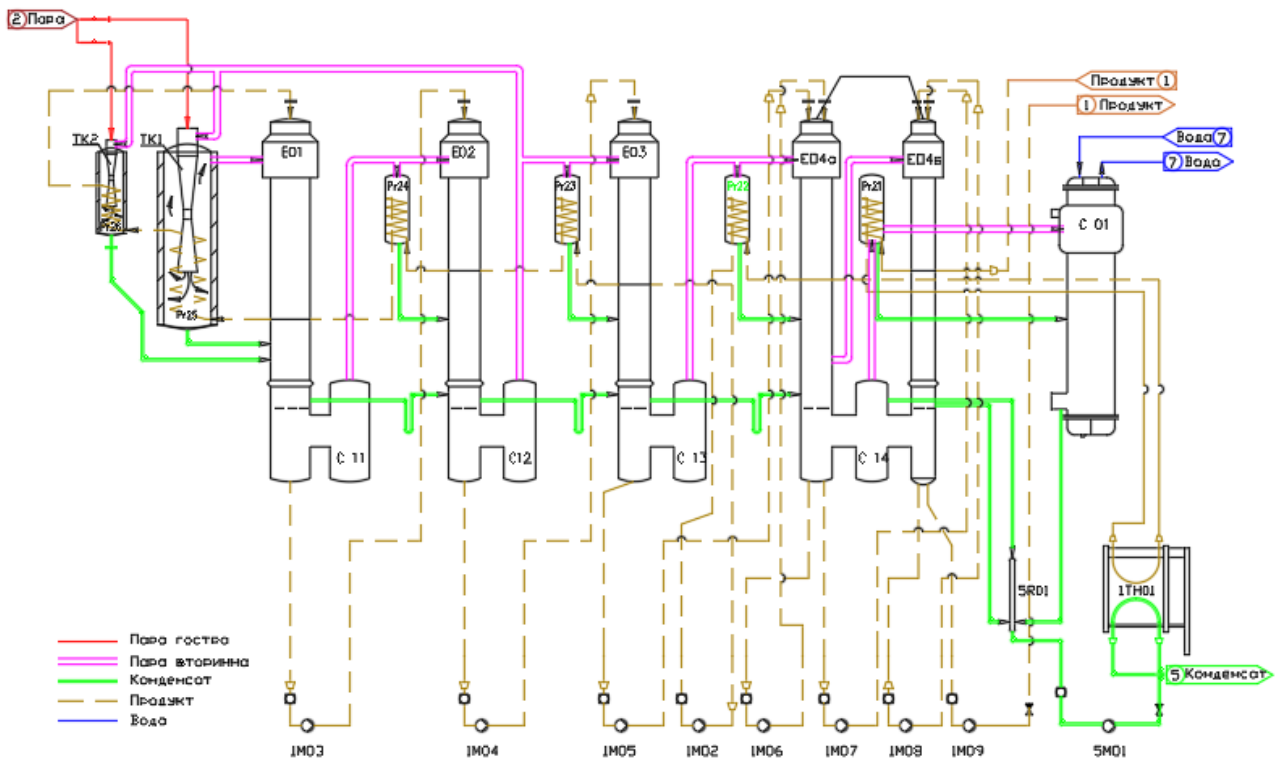


Рис. 1. Функціональна схема багатокорпусної вакуум-випарної установки

Контур пари. У технологічній схемі випарної установки застосовують гостру і вторинну пару. Гостра пара з колектору пари і екстрапара з сепаратора С12 надходить в парові компресори ТК-1 і ТК-2, утворюючи пару нагріву для теплообмінників Pr25 і Pr26, в яких проводиться кінцеве підігрівання вхідного продукту. Основна кількість пари нагріву з теплообмінника Pr 25 подається у міжтрубний простір нагрівної (гріючої) камери першої випарної колони. Вторинна пара, утворена в першому випарному апараті, використовується для обігріву в другому і так далі випарна пара кожного апарата використовується в наступному (крім EO4б). Рештки вторинної пари після теплообмінника Pr21 відводиться в конденсатор С 01.

Контур конденсату. Конденсат, утворений при передачі тепла від пари до продукту в теплообмінниках попереднього підігрівання, нагрівальних камерах випарних колон та конденсаторі пари подається послідовно в наступні колони та

конденсатор, а з крайньої колони ЕО4б і конденсатора – в конденсатозбірник 5R01, з якого насосом 5M01 подається в теплообмінник 1ТН01 попереднього підігрівання сировинного продукту і відводиться за межі установки.

Контур охолоджувальної води. Вода для охолодження і конденсації пари, що надходить після теплообмінника Pr21 в міжтрубний простір корпусу конденсатора, рухається в трубах за чотириходовою схемою. За розрахункового режиму роботи випарної установки перепад температур води на вході-виході конденсатора складає ~ 10 °С.

Нижче наведено результати модернізації чотирикорпусної вакуум-випарної установки з паровою компресією фірми «Альфа-Лаваль Шефферс» (Швеція), виконаної на підставі аналізу даних багаторічної експлуатації установки. Головними причинами неефективної експлуатації згаданої багатокорпусної установки та вимушеного припинення її роботи були критичне руйнування випарних труб у випарних колонах ЕО4б і ЕО4б, крайніх за рухом продукту і пари, із-за недостатньої загальної інтенсивності зрошення в них, а також за недосконалої системи подачі продукту на зрошення та неефективності системи зливу конденсату з трьома окремими насосними лініями. Технічні рішення з модернізації основних функціональних вузлів прийняті з урахуванням результатів експериментальних досліджень на моделях та на підставі розрахункового аналізу за розробленою удосконаленою методикою теплового розрахунку багатокорпусної випарної установки з автоматизованим зведенням матеріального і теплового балансу, а також знаходженням розподілу температур в паровому, конденсатному і продуктовому трактах.

2. Удосконалення методики перевірконого теплового розрахунку багатокорпусного випарного апарата

Приведені в літературі методи розрахунку багатокорпусних випарних установок [3, 4 та ін.] за широкою різноманітності мають спільну основу:

- визначення загальної кількості випаруваної вологи, розподілення її між корпусами, складання теплових балансів корпусів на базі нормативних навантажень поверхонь випаровування;
- попередній розрахунок і розподілення сумарної корисної різниці температур його між корпусами з урахуванням величин поверхонь нагріву і інтенсивності теплопередачі;
- для зменшення об'єму розрахунків приймається рівність витрати нагрівної пари і випаруваної вологи, не завжди враховується самовипаровування перегрітого продукту і конденсату;
- використовуються узагальнені дані по тепловим навантаженням, інтенсивності теплопередачі, гідравлічній депресії, які відповідають конкретним типовим конструкціям установок;

- комплексні характеристики, експлуатаційні показники і значення теплофізичних величин відображені в численних довідкових матеріалах і передбачають ручний спосіб користування ними.

Як правило, прийняті попередні умови розрахунків при першому обчисленні не дають узгоджених результатів і остаточне рішення заходиться методом наближень шляхом ручних варіантних розрахунків.

Сучасні прикладні розрахункові програми з вбудованими складовими по автоматичному знаходженню узгодженого рішення дають можливість створити методіку розрахунку з використанням загально прийнятих розрахунків матеріального і теплового балансу процесів згущення в розмірному вигляді, з актуальними теплофізичними параметрами робочих речовин та необхідними критеріальними залежностями для розрахунку процесів теплопередачі.

Удосконалення методіки розрахунку виконано в ході виконання модернізації чотирикорпусної установки Шефферс, а за основу прийнято метод розрахунку, запропонований в [7]. Методика враховує особливості функціональної схеми модернізованої установки, її технологічних режимів, а також конструктивних параметрів апаратів. Ураховується відбір пари на підігрів продукту в теплообмінниках (екстрапара), скипання перегрітого продукту, самовипаровування конденсату.

Базовими складовими удосконаленої методіки є автономні розрахунки у вигляді окремих таблиць комп'ютерної програми Excel, визначення невідомих величин шляхом ітераційного зведення балансу таблиць та система зв'язків (узгоджень і завдань) між таблицями.

Загальний розрахунок багатокорпусної вакуум-випарної установки включає 11 таблиць: 1) зведена таблиця, 2) тепловий розрахунок теплообмінників нагріву продукту, 3) тепловий баланс окремих випарних колон, 4) матеріальний баланс згущення, 5) баланс скипання перегрітого продукту, 6) тепловий розрахунок згущення у випарних колонах, 7) побудова графіка температур пари і продукту, 8) баланс зливу конденсату, 9) тепловий розрахунок конденсатора, 10) фізичні властивості води, 11) фізичні властивості водяної пари. Прийнято, що розрахунок після його складання і налагоджування є зведеним за типових вихідних даних. Усі величини в розрахунку є раціональними, чинними і ув'язаними.

Відповідно до завдання на модернізацію установки згущення вихідної сировини з вмістом сухих речовин $x_1 = 8 \%$ здійснюється до концентрованого продукту з вмістом сухих речовин $x_2 = 48 \%$, кількість випаруваної вологи рівна 12000 кг/год. Подача вихідної сировини складає

$$S = \frac{12000}{1 - \frac{x_1}{x_2}} = \frac{12000}{1 - \frac{8}{48}} = 14400 \frac{\text{кг}}{\text{год}}$$

Зведена таблиця 1 включає вихідні дані, результати розрахунків невідомих величин з усіх таблиць і взаємну передачу знайдених значень на відповідні таблиці, як завдання.

Таблиця 2 – тепловий розрахунок теплообмінників нагрівання продукту як стандартний розрахунок парового нагрівача з горизонтальними продуктовими трубами. Баланс кількості тепла від конденсації пари і кількості тепла по рівнянню теплопередачі за відомих витраті продукту, його температурі на вході та температурі нагрівної пари зводиться шляхом ітераційної зміни кількості нагрівної пари. Результатом є кількість нагрівної пари (екстрапара E) і температура продукту на виході.

Таблиця 3 – тепловий баланс окремих колон в системі розрахункових таблиць є базовим розрахунком.

Тепловий баланс випарного апарата (рис. 2).

Кількість тепла на вході у випарний апарат:

$$Q_{\text{вх}} = S_{X_{i-1}} c_{X_{i-1}} t_{X_{i-1}} + (W_{i-1} - E_{i-1}) i_{D_{i-1}} + K_{i-1} i_{K_{i-1}} + K_{Ti} i_{Ti}, \quad (1)$$

де параметри на вході випарного апарата: $S_{X_{i-1}}$ – масова витрата вхідного продукту, кг/год; $c_{X_{i-1}}$ – теплоємність вхідного продукту, кДж/(кг °С); $t_{X_{i-1}}$ – температура вхідного продукту, кДж/(кг °С); $W_{i-1} - E_{i-1} = D_{i-1}$ – масова витрата нагрівної пари, кг/год; W_{i-1} – масова витрата вторинної пари (випаруваної вологи), кг/год; E_{i-1} – масова витрата екстрапари на теплообмінник, кг/год; $i_{D_{i-1}}$ – тепловміст нагрівної пари, кДж/кг; $K_{K_{i-1}}$ – масова витрата конденсату апарата, кг/год; i_{Ti-1} – тепловміст конденсату апарата, кДж/кг; K_{Ti} – масова витрата конденсату теплообмінника, кг/год; i_{Ti} – тепловміст конденсату теплообмінника, кДж/кг.

Кількість тепла на виході з випарного апарата:

$$Q_{\text{вих}} = S_{X_i} c_{X_i} t_{X_i} + W_i i_{W_i} + K_i i_{K_i}, \quad (2)$$

де параметри на виході випарного апарата: S_{X_i} – масова витрата концентрованого продукту, кг/год; c_{X_i} – теплоємність концентрованого продукту, кДж/(кг °С); t_{X_i} – температура концентрованого продукту, кДж/(кг °С); $W_i - E_i = D_i$ – масова витрата нагрівної пари, кг/год; W_i – масова витрата вторинної пари (випаруваної вологи), кг/год; i_{W_i} – тепловміст вторинної пари, кДж/кг; K_i –

масова витрата конденсату апарата, кг/год; i_{Ki} – тепловміст конденсату апарата, кДж/кг.

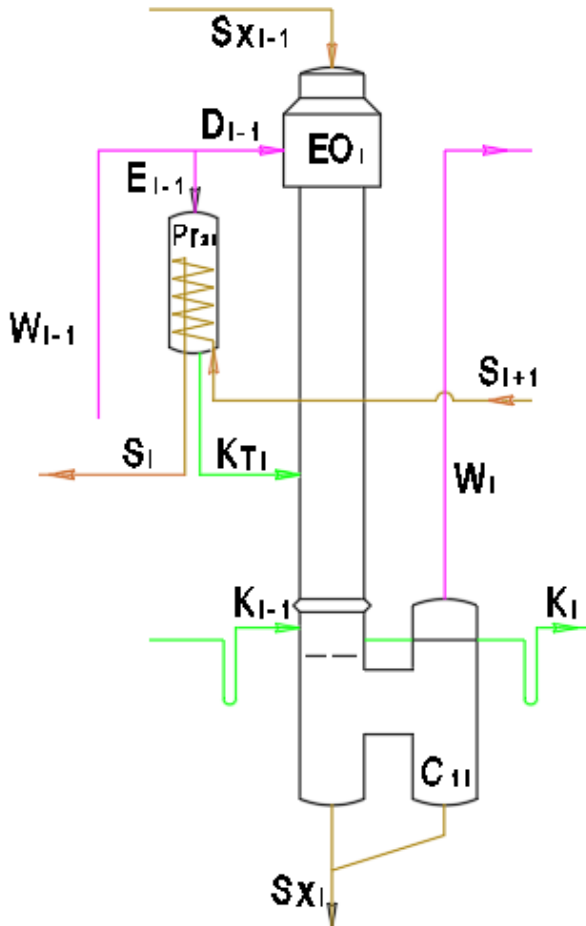


Рис. 2. Схема до розрахунку теплового балансу випарної колони:
 EO – випарна колона; С – конденсатор;
 Pr – теплообмінник; S – витрата розчину; Sx – витрата концентрованого розчину;
 W – вторинна пара; E – екстрапара;
 D – пара нагріву до випарної колони;
 K_T – конденсат з теплообмінника;
 K – конденсат з випарної колони

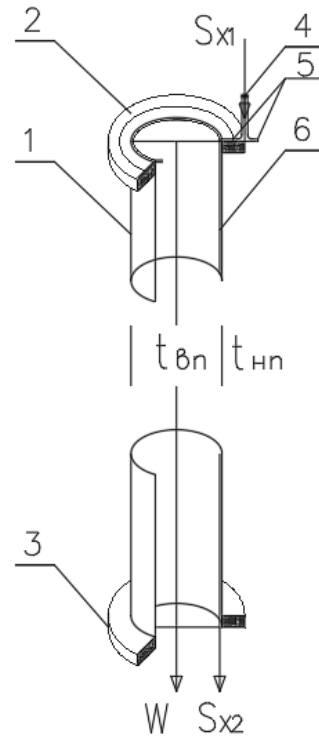


Рис. 3. Схема до розрахунку теплопередачі випарних труб:
 1– випарна труба; 2 – трубна дошка верхня; 3 – трубна дошка нижня; 4 – струмінь продукту з камери постійного рівня; 5 – плівка продукту на трубній дошці; 6 – плівка продукту на випарній трубі;
 S_{x1}, S_{x2} – витрата розчину на вході та виході випарної труби;
 t_{нп} – температура нагрівної пари;
 W – вторинна пара; t_{вп} – температура вторинної пари

Невідомим в даному випадку є тільки витрата вторинної пари W . Рівність тепла на вході і виході апарата досягається за рахунок знаходження витрати з

нього вторинної пари W_i . Для цього перевіряється відношення $Q_{i_{вх}}/Q_{i_{вих}}$: якщо $Q_{i_{вх}}/Q_{i_{вих}} < 1$, то $W_i + d_{Wi}$, якщо $Q_{i_{вх}}/Q_{i_{вих}} > 1$, то $W_i - d_{Wi}$. За досягнення рівності $Q_{i_{вх}}/Q_{i_{вих}} = 1$ витрата вторинної пари на виході апарата рівна W_i – розрахунок завершено. Знайдена величина W_i є розрахунковою величиною вторинної пари на вході наступного апарата. При визначенні масової витрати нагрівної пари на вході третьої колони, крім екстрапари на теплообмінник, враховується відбір пари на термокомпресор.

У результаті закінчення розрахунків теплових балансів всіх апаратів визначається сумарна кількість випаруваної вологи, порівнюється з заданою величиною 12000 кг/год і за допомогою ланцюжка циклічного розрахунку уточнюють прийняту раніше витрату пари на вході в установку.

Таблиця 4 – матеріальний баланс згущення. Після кожного циклу розрахунку з табл. 2 в табл. 4 надходить величина випаруваної вологи в кожному апараті. За цими даними розраховується вміст сухих речовин і витрата продукту на виході з кожного апарату. Отримані дані по витраті продукту повертаються в розрахунок теплового балансу, що забезпечує ув'язку матеріального і теплового балансу. У результаті зведення матеріального і теплового балансів випарних колон формується завдання на теплові розрахунки процесу згущення.

Процеси згущення відображаються у двох таблицях:

Таблиця 5 – баланс скипання перегрітого продукту. За попередньо відомих температур продукту на вході і вторинної пари в колоні, на підставі теплового балансу розраховуються витрата пари скипання, кількість продукту на виході та вміст в ньому сухих речовин. Вважається, що з верхньої камери колони пара скипання входить у випарні труби і разом з вторинною парою згущення поступає в сепаратор.

Таблиця 6 – тепловий розрахунок згущення у випарних колонах. У розрахунку є наперед відомі складові теплового балансу згущення: витрата продукту та вміст в ньому сухих речовин на вході (з балансу скипання перегрітого продукту), витрата продукту і вміст сухих речовин на виході (з матеріального балансу), а також випарувана волога. Температури процесу узгоджуються в ході розрахунку. Завданням розрахунку є знаходження необхідної кількості тепла на згущення, коефіцієнта теплопередачі і кількості тепла за рівнянням теплопередачі при відомій поверхні теплопередачі та попередньо прийнятому робочому перепаді температури – різниці температури нагрівної пари і вторинної пари.

Розрахунки коефіцієнтів тепловіддачі при конденсації пари на зовнішній поверхні випарних труб виконані за методикою Кутателадзе С.С [16].

Число Рейнольдса на нижній кромці плівки

$$Re_{пл} = q_{зовн} H / (r \rho v), \quad (3)$$

де $q_{зовн}$ – тепловий потік на зовнішній поверхні стінки, кВт/м²; H – висота труби, м; r – теплота пароутворення, кДж/кг; ρ – густина конденсату, кг/м³; v – кінематична в'язкість конденсату, м²/с.

Коефіцієнт тепловіддачі, α , Вт/(м² К), для ламінарного режиму плівки ($Re_{пл} < 100$)

$$\alpha = 1,18 \lambda \left(\frac{9,81}{v^2} \right)^{1/3} Re_{пл}^{-1/3}, \quad (4)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м °К).

Коефіцієнт тепловіддачі для турбулентного режиму плівки ($Re_{пл} \geq 100$)

$$\alpha = \lambda \left(\frac{9,81}{v^2} \right)^{1/3} 0,16 Pr^{1/3} Re_{пл} / (Re_{пл} - 100 + 63,2 Pr^{1/3}), \quad (5)$$

де Pr – критерій Прандтля.

Гідродинамічні та теплові характеристики плівки продукту на внутрішній поверхні випарних труб визначено за даними [9, С. 196].

Фактична щільність зрошування, $\Gamma_{факт}$, м²/с

$$\Gamma_{факт} = G_{пр} / (\rho_{пр} \Pi), \quad (6)$$

порівнюють з мінімальною щільністю зрошування, $\Gamma_{мін}$, м²/с

$$\Gamma_{мін} = v_{пр} \left(\frac{\sigma}{v_{пр}^{4/3} \rho_{пр} 9,81^{1/3}} \right)^{0,625}, \quad (7)$$

де $G_{пр}$ – витрата продукту середня, кг/год; $\rho_{пр}$ – густина продукту, кг/м³; Π – периметр труб внутрішній (периметр зрошування), м; $v_{пр}$ – кінематична в'язкість продукту, м²/с; σ – поверхневий натяг, Н/м.

Середнє значення критерія $Re_{пл}$:

$$Re_{пл} = 4 G_{пр} / (\rho_{пр} \Pi v_{пр}), \quad (8)$$

Середня товщина плівки, $\delta_{пл}$, м, при значенні ($Re_{пл} < 1200$) становить

$$\delta_{пл} = \left(0,75 Re_{пл} \frac{v_{пр}^2}{9,81} \right)^{0,33}, \quad (9)$$

Швидкість продукту середня, $V_{\text{пр}}$, м/с

$$V_{\text{пр}} = G_{\text{пр}} / (3600 \rho_{\text{пр}} \Pi \delta_{\text{пл}}), \quad (10)$$

Число Нуссельта для тепловіддачі від стінки труби до плівки

$$Nu = \left(\frac{1,35}{Re_{\text{пл}}} + 10^{-4} Re_{\text{пл}}^{0,7} Pr \right)^{1/3}, \quad (11)$$

Відповідно коефіцієнт тепловіддачі

$$\alpha = Nu \lambda (9,81 / v_{\text{пр}}^2)^{1/3}, \quad (12)$$

При визначенні коефіцієнта теплопередачі враховується термічний опір стінки труби і термічний опір експлуатаційних забруднень.

Робочий перепад температури $dT_{\text{роб}} = t_{\text{нп}} - t_{\text{вп}}$ ($t_{\text{нп}}$ – температура нагрівної пари, °С; $t_{\text{вп}}$ – температура вторинної пари, °С) знаходиться в процесі циклічних розрахунків по зведенню (за $dT_{\text{роб}}$) кількості тепла за рівнянням теплопередачі до необхідної кількості тепла на випаровування продукту

$$Q_{\text{тепл}} = dT_{\text{роб}} k F_{\text{тр сер}}, \quad (13)$$

де k – коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м² К); $F_{\text{тр сер}}$ – поверхня труб внутрішня середня, м².

$$Q_{\text{баланс}} = W_i i_{Wi} + S_{Xi-1} c_{Xi-1} t_{Xi-1} - W_{i-1} i_{Wi-1}, \quad (14)$$

Корисний перепад температури

$$dT_{\text{кор}} = dT_{\text{роб}} - dt_{\text{фк депр}}, \quad (15)$$

де $dt_{\text{фк депр}}$ – фізико-хімічна депресія продукту [17].

Таблиця 7 – побудова графіка температур пари і продукту.

Температурний графік (температурний каскад) випарної установки містить в собі дані для кожного апарата по температурі нагрівної пари, продукту і вторинної пари та дозволяє використовувати у розрахунку в режимі ітерацій актуальні фізичні характеристики робочих речовин води, пари та продукту. Складовими для побудови температурного графіка є прийнята температура

конденсації в конденсаторі (40 °С – табл. 9), корисні перепади температур поверхні випаровування, величини фізико-хімічної депресії (таблиця 6), а також величини гідравлічної депресії (табл. 7).

Основну складову гідравлічної депресії складає гідравлічний опір сепараторів вторинної пари, який розраховувався за [18, С. 735] на основі відомих конструктивних характеристик сепараторів, витраті і густині пари. Гідравлічний опір сепараторів становить від 362 Па до 703 Па. Для переводу перепаду тиску в різницю температур використовувались апроксимаційні залежності тиску водяної пари від температури насичення, знаходився тиск після сепаратора і перед сепаратором, після чого виконувалось перетворення величини тиску в температуру. Гідравлічна депресія є в межах 0,2-1,51 °С.

Таблиця 8 – баланс зливу конденсату. Використання тепла конденсату враховано в тепловому балансі випарних колон. Вважається, що пара скипання конденсату конденсується на поверхні нагріву, а при зливі витрата конденсату дорівнює витраті на вході. Тому основну частину розрахунку становить матеріальний баланс зливу конденсату. Виключенням є визначення температури суміші конденсатів з випарних колон ЕО4а і ЕО4б та конденсатора СО1 в збірник конденсату 5RO1, яка складає 52,4 °С.

Таблиця 9 – тепловий розрахунок конденсатора, який за конструкцією є вертикальний кожухотрубний теплообмінник з рухом охолоджувальної води в трубах (чотири ходи) і конденсацією вихідної пари на зовнішній поверхні труб. Витрата пари на вході і відповідно кількість тепла за балансом визначається випаруваною вологою в колонах ЕО4а і ЕО4б за мінусом пари, використаній в теплообміннику Pr21. Температура охолоджувальної води 28 °С, витрата води приймається з розрахунку її нагріву до 38 °С і температури конденсації пари в корпусі до 40 °С.

Таблиця 10 – фізичні властивості води, *таблиця 11* – фізичні властивості водяної пари. Використані з [19] таблиці теплофізичних характеристик води і водяної пари залежно від температури з інтервалом через 5 °С. Таблиці з числовими даними доповнена блоком обробки, в якому для всіх базових температур процедурами вибірки і лінійної інтерполяції знаходяться актуальні значення фізичних констант.

Розрахунок містить вихідні дані по технологічному режиму переробки продукту, конструктивні характеристики випарних колон, теплообмінників, сепараторів вторинної пари за паспортом та обстеженням і замірами багатокорпусної установки.

Досвід користування методикою показав, що при заміні відносних величин їх прямими фізичними значеннями, стійкість процедури отримання зведеного результату не погіршилась, легко здійснюються зміни завдання по режиму

переробки продукту і по геометричним характеристикам обладнання. Результати розрахунку наведено у зведеній табл. 1, яка містить дані по випаруваній волозі у кожній з випарних колон, їх сума становить 12000 кг/год, температури пари нагрівання 78 °С...54 °С, температури вторинної пари 73,3 °С...41,5 °С, а також дані по корисним перепадам температур, фізико- хімічній і гідравлічній депресії.

Таблиця 1. Основні результати теплового розрахунку випарної установки

№ пп	Назва	Позн.	Од. вим.	E01	E02	E03	E04a	E04b	Всього
1	Витрата продукту на вході	S_{Xi-1}	кг/год	1440 0	1079 1	6751	4708	2409	
2	Вміст сухих речовин	x_i	%	8	11	17	24	39	48
3	Випарена волога	W	кг/год	3609	4040	2043	1276	792	12010
4	Температура пари нагріву	$t_{нп}$	°С	77,89	72,23	64,44	54,27	54,27	
5	Температура вторинної пари	$t_{вп}$	°С	73,3	65,6	54,5	41,5	41,5	
6	Корисний перепад температури	$dT_{кор}$	°С	4,4	6,2	9,5	12,1	11,7	32,1
7	Фізико хімічна депресія	$dt_{фк деп}$	°С	0,3	0,4	0,5	0,7	1,1	2,1
8	Гідравлічна депресія		°С	1,0	1,2	0,2	1,5		3,9
9	Інтенсивність зрошення периметра труб		кг/год /м	325,3	296,5	576,2	932,3	1165	

Результати розрахунку теплових балансів апаратів наведено на рис. 4, а на рис. 5 та рис. 6 – графіки температури пари нагріву і вторинної пари, на яких також приведено експлуатаційні дані та показники модернізованої багатокорпусної установки.

Основні висновки розрахункового аналізу:

- завдяки внесенням змін в конструкцію забезпечений режим переробки продукту – випарена волога 12000 кг/год при згущенні продукту з 8 % до 48 % сухих речовин;

- сумарний перепад температури парового каскаду в розрахунках і при випробуваннях становить 35,6 °С і 36,6 °С проти величини 30 °С, вказаній у паспорті виробника. Одна з причин розходження полягає в тому, що виробник установки приймав температуру пари нагрівання рівною температурі вторинної пари попередньої колони і не враховував гідравлічну депресію в сепараторах пари, сума якої становить 3,7 °С.

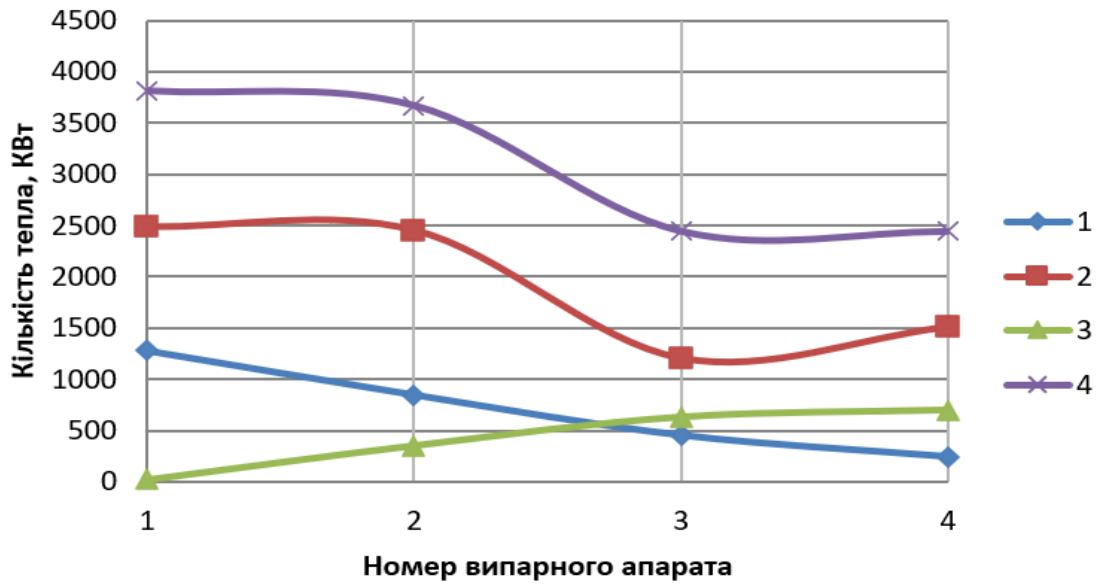


Рис. 4. Тепловий баланс випарних колон багатокорпусної ВВУ.

Надходження теплоти в апарати з:

- 1 – продуктом;
- 2 – парюю нагрівання;
- 3 – конденсатом;
- 4 – сумарна

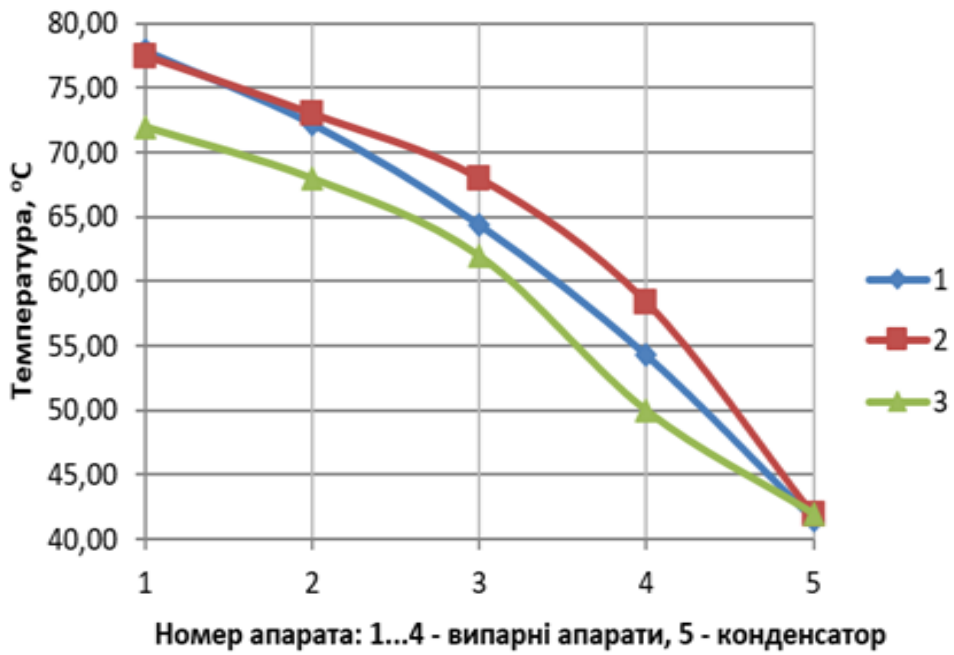


Рис. 5. Температура пари нагрівання:

- 1 – розрахункова;
- 2 – робоча;
- 3 – паспортна

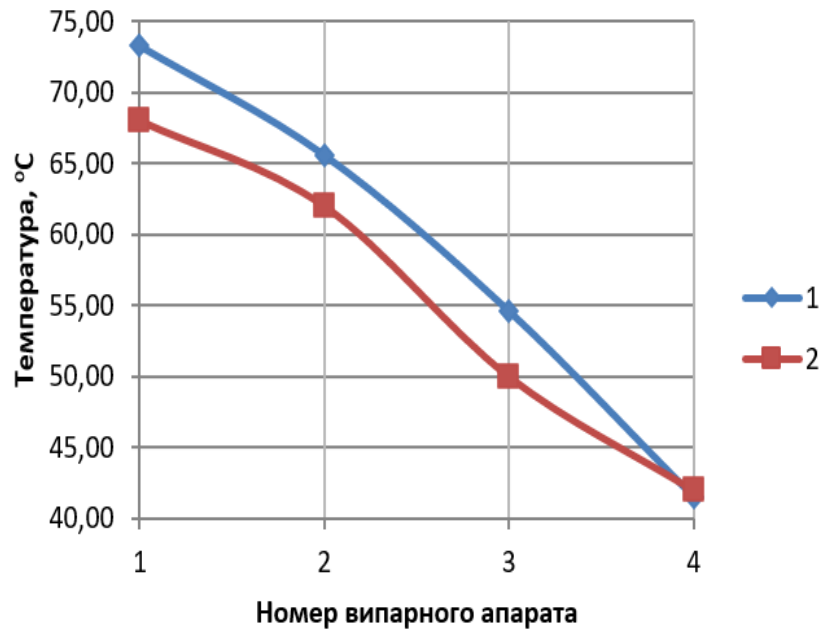


Рис. 6. Температура вторинної пари:
1 – розрахункова; 2 – паспортна

3. Модернізація системи зрошення продуктом випарних труб

Однією з причин припинення експлуатації ВВУ Альфа-Лаваль Шефферс було критичне руйнування труб в корпусах 4а і 4б із-за недостатньої загальної інтенсивності зрошення в цих колонах, а також недосконалої системи подачі продукту на зрошення. Характерно, що корпуси 4а і 4б працюють як один корпус у відношенні паралельного ходу первинної і вторинної пари, а по продукту корпуси сполучені послідовно. Очевидно, що в період створення установки ще не було практики розміщення в одному корпусі декількох ходів продукту.

При реконструкції установки у кожному з корпусів 4а і 4б за рахунок виконання двох ходів продукту було збільшено в два рази загальну інтенсивність зрошення. Верхня та нижня камери колон поділені на дві частини, виконано по два підводи до верхньої і два відводи від нижньої камери, встановлено чотири циркуляційних насоси (рис. 1). У процесі модернізації верхніх камер колон створена також більш ефективна система зрошення випарних труб.

Аналіз систем подачі продукту в вакуумно-випарних установок, включаючи схему даної установки, наведено в [14]. На рис. 7 схеми 1 та схема 3 приведені за [14], а схема 2 відноситься до установки А2-ОВВ [20].

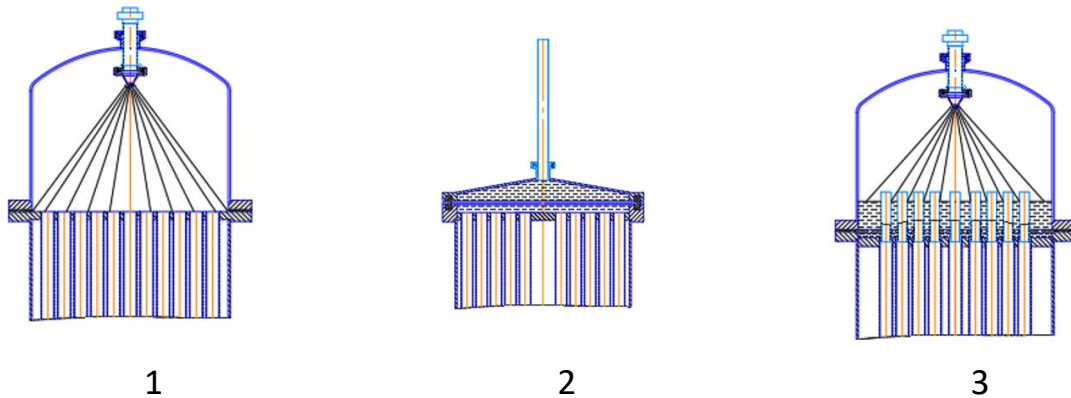


Рис. 7. Схеми подачі продукту у вакуумно-випарних установках:
1 – Квісек та Бортельмус (Австрія); 2 – А2-ОВВ; 3 – Шеферс (Швеція)

Схема 1 – напірне форсункове розпилення продукту безпосередньо на трубну дошку. Проблемним є нерівномірність зрошення площі трубної дошки, характерна для форсункового розпилення, крім того частина продукту потрапляє в середину труб. Позитивним є те, що якщо у верхній камері при розпилюванні виділяється пара скипання, то вона вільно заходить в труби.

Схема 2 (А2-ОВВ-2) – напірна подача з закритої камери струменів продукту на міжтрубні ділянки. Точки подачі на трубну дошку найбільш вигідні, але в схемі не передбачений вузол для утворення пари скипання та її вхід в випарні труби. Пароутворення у верхній камері може призвести до нерівномірного зливу через отвори, а пароутворення на трубній дошці – до скиду продукту в труби в суміші з парою.

Схема 3 (Альфа-Лаваль Шефферс). Порівняно зі схемами 1 і 2 в конструкції за цією схемою наявні додаткові елементи, такі як камера постійного рівня продукту з гравітаційним зливом струменів на міжтрубні ділянки, паропропускні труби, через які пара скипання проходить в середину труб. Проблемним залишилось розпилення продукту за допомогою сопла з малими отворами (по 6 отворів діаметром 5,1 мм та 4,5 мм), а також входження паропропускних труб в випарні труби з малими зазорами, як спроба напірного регулювання розподілення продукту по периметру труби.

При модернізації системи зрошення реалізовані такі вимоги:

- продукт має подаватися соплом великого перерізу і не потрапляти в паропропускні труби;
- пара скипання, що утворюється у верхній камері, має надходити у випарні труби без створення відчутного перепаду тиску на камері постійного рівня; гравітаційний злив продукту струменем з камери постійного рівня в центр міжтрубної ділянки трубної дошки;
- плівковий рух продукту по поверхні трубної дошки на зрошення

випарних труб.

Схема модернізованої системи подачі продукту – рис. 8. У верхній камері колони виконано дві секції подачі продукту. На розподільній дошці встановлено дві окремі камери постійного рівня продукту і відповідно два комплекти пристроїв зрошення. Необхідна кількість гільз для пропуску пари встановлена на розподільній дошці, в зонах камер постійного рівня.

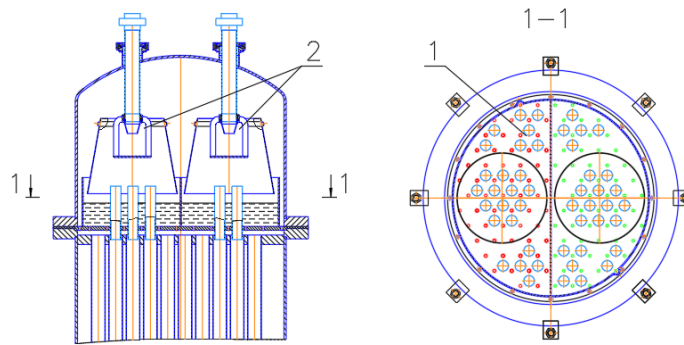


Рис. 8. Модернізований вузол подачі продукту:
1 – трубна решітка; 2 – вузли зрошення

Труба подачі продукту закінчується соплом діаметром 28 мм, під соплом знаходиться відбиваючий диск діаметром 100 мм, навколо диска встановлено конус «обережного» зливу продукту в камеру постійного рівня. У зоні зливу продукту з конуса паропропускні гільзи відсутні. Зливні отвори в камері постійного рівня розміщені строго проти центрів міжтрубних площадок.

Робота системи подачі продукту здійснюється наступним чином: струмінь продукту з сопла подається на диск, утворюється горизонтальний віяловий струмінь, який в свою чергу подається на стінку конічного екрану. З екрана продукт з кола падіння (водобій) розповсюджується по камері і наповнює її до постійного рівня. Через отвори в дні камери рідина зливається струменями на міжтрубні ділянки, на яких розтікається та зливається по периметру труб, утворюючи плівку на їх внутрішніх стінках.

Аналіз процесу натікання струменя на диск відбивач виконано в [21]. Продукт виходить з сопла (рис. 9 б) з рівномірним профілем швидкості. При зустрічі з диском-відбивачем створюється потенціальна зона повороту потоку, в якій початковий рух з вертикального напрямку переходить на горизонтальний при незмінній швидкості. На верхній поверхні диска, починаючи з його центра, утворюється приграничний в'язкий шар рідини за умови нульової швидкості на стінці і переходу до швидкості сопла на границі з потенціальною зоною. Середня швидкість горизонтального потоку зменшується залежно від діаметра диска відбивача.

Для визначення розрахункових параметрів процесу було проведено випробування повно розмірного зразка вузла зрошення. Експериментальний стенд (рис. 9) забезпечував постійну витрату води 13,5 м³/год.

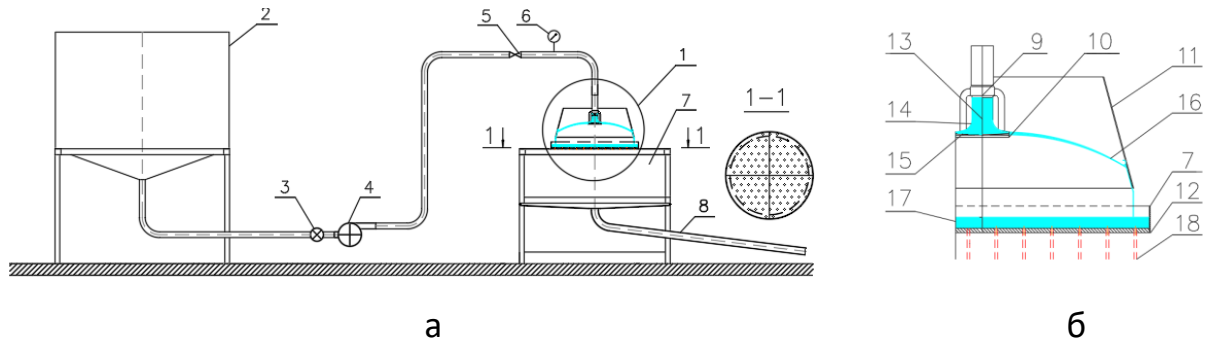


Рис. 9. Схема стенду випробування вузла зрошення:

а – елементи стенду; б – елементи вузла зрошення; 1 – макет вузла зрошення; 2 – бак води; 3 – лічильник; 4 – насос; 5 – запірний кран; 6 – манометр; 7 – лоток; 8 – зливна труба; 9 – сопло; 10 – диск-відбивач; 11 – конусний екран; 12 – диск з отворами; 13 – струмінь з сопла; 14 – зона повороту потоку; 15 – пограничний шар на диску; 16 – віяловий струмінь; 17 – вода в лотку; 18 – струмінь на зрошування

Установлено, що в зоні від диска відбивача до зливного конусу утворюється суцільний віяловий струмінь без розпилювання і розпаду на краплі. Траєкторія руху струменя була визначена на окремій моделі по границі змочування за допомогою радіального екрану з водопоглинаючим покриттям. Установлено, що траєкторія є балістичною зі швидкістю, яка дорівнює швидкості рідини в соплі, а її координати можна визначати за залежністю

$$Y = -0,5g \left(\frac{X}{w_0} \right)^2, \quad (16)$$

де Y – відстань по вертикалі від краю диску до точки дотику струменя до конуса; g – прискорення вільного падіння; X – відстань по горизонталі між краєм диску відбивача і зливним конусом; w_0 – швидкість потоку в соплі,.

Напірний процес зливу продукту з отворів камери постійного рівня.

Для забезпечення повного зрошення периметру кожної випарної труби зливні отвори повинні бути розміщені по центру міжтрубних ділянок і у відповідних точках відносно крайніх труб. Таким чином кількість зливних отворів визначається числом труб даної колони, чи її секції. Кількість продукту і його в'язкість змінюється по мірі згущення продукту (14400...2900 кг/год) і

збільшення вмісту сухих речовин (8...48 %) .

При організації режиму постійного рівня для кожної камери зрошування необхідно визначати діаметр зливних отворів. Ключовим параметром для розрахунку є коефіцієнт витрати отвору. При шарі продукту в камері постійного рівня 0,05 м і зміні кінематичної в'язкості продукту від 1сПз до 70 сПз число Рейнольдса змінюється з 5000 до 70, коефіцієнт витрати знаходиться в межах 0,6-0,66, для розрахунків рекомендована середня величина 0,62 [22]. По даних , приведених в [22] при в'язкості продукту в межах 70-300 сПз і чисел Re 70-23 коефіцієнт витрати можна розраховувати за залежністю

$$\mu = 0,38 + 0,0035Re, \quad (17)$$

Вузол міжтрубної ділянки дошки – вхід в трубу (рис. 10, рис.11). Процес зрошення труб відпрацьовувався на моделі трубної дошки з різними виконанням вузла приварювання труб.

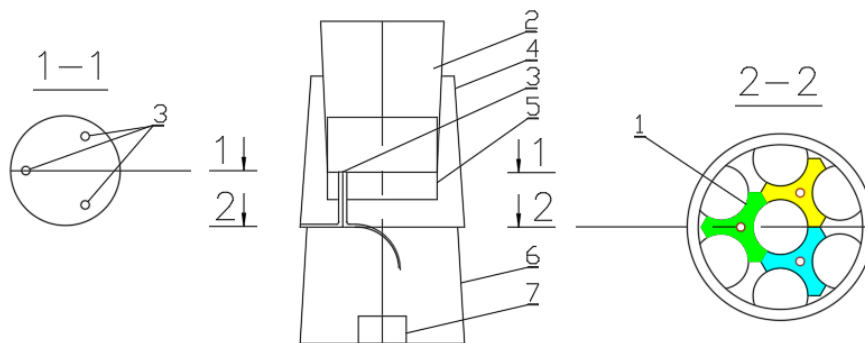


Рис. 10. Макет зрошення трубної решітки:

1 – модель трубної решітки; 2 – дозатор; 3 – дозуючі отвори (1...3 шт); 4 – обойма для елементів за поз. 1 та 2; 5 – вікно для спостереження; 6 – опора; 7 – зливний отвір

У зоні дотику струменя до трубної дошки початок процесу проходить по схемі, як на диску-відбивачу. Навколо центра дотику формується зона розмиву з швидкістю струменя. Слід відмітити, що при високій в'язкості продукту в межах міжтрубної ділянки зона розмиву через гідравлічний стрибок переходить в русловий рух, з стану якого продукт надходить на гравітаційне зрошення випарних труб.

При невеликій в'язкості рідини зона розмиву досягає до вхідного отвору випарної труби. При формі вхідного отвору – гостра кромка з кутом 90° виникає відрив потоку від стінки і падіння рідини в центр труби. При закругленій кромці виникає ефект Коанда, який забезпечує безвідривний рух продукту і створення стійкої сповзаючої плівки.

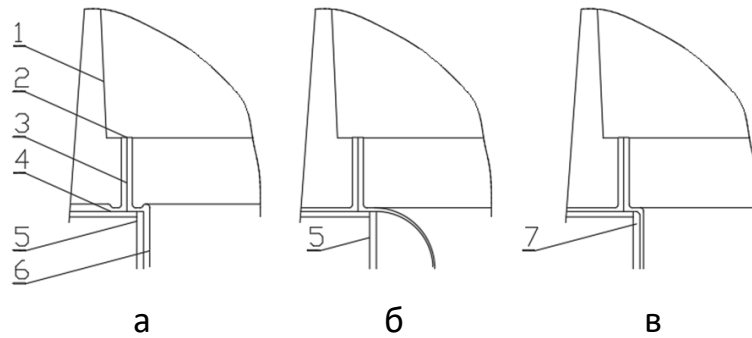


Рис. 11. Режими зрошення:

- а – гравітаційний злив в’язкого продукту після гідравлічного стрибка;
 - б – струменевий злив з плями розмиву при гострій кромці в отворі;
 - в – гравітаційний злив продукту при налипанні на закруглення кромки;
- 1 – лоток; 2 – дозуючий отвір зливу продукту; 3 – потік продукту; 4 – трубна решітка; 5 – випарна труба з гострою кромкою; 6 – плівка продукту на внутрішній стінці труби; 7 – випарна труба із закругленням на вході продукту

4. Модернізація системи зливу конденсату

Установка ВВУ Альфа-Лаваль Шефферс до її модернізації мала три окремих ліній зливу конденсату, кожна з яких була обладнана окремим насосом. Тепло злитого конденсату в установці не використовувалось.

Основні вимоги до модернізації системи зливу і відведення конденсату:

- надійне відведення конденсату і підтримання його рівня в апаратах без заливання поверхонь нагріву;
- створення протидії прориву пари з корпусу в корпус за рахунок гідравлічних затворів в петлях;
- скипання перегрітого конденсату і використання тепла пари скипання;
- передача тиску пари з апарата на поверхню рідини в петлі через паровий простір в трубопроводах;
- створення необхідної висоти стовпа рідини в петлях чи зливних трубах, протидіючого чи допоміжного.

Схема модернізації (рис. 12 а) передбачає за рахунок різниці тисків пари в колонах послідовний рух конденсату з першої колони до останньої з використанням в колонах пари скипання конденсату. Кінцевий злив конденсату з колон Е04а, Е04б та конденсатора С О1 здійснюється в збірник 5R01, звідки конденсат насосом подається пластинчастий підігрівач для підігрівання вхідного продукту.

Температури і тиски пари в камерах нагріву випарних апаратів наведено на рис. 12 б. Різниці тисків пари в суміжних випарних апаратах показано в мм еквівалентного водяного стовпа, які відповідають необхідній висоті протидіючого стовпа води в гідравлічній петлі чи висоті рушійного стовпа в

прямому зливі.

Постійний рівень конденсату в апаратах підтримується за умови самопливного зливу води через зливний пристрій. Зміна рівня від зміни витрати повинна бути в межах перерізу зливного патрубку і з збереженням в верхній частині вільного парового простору. Конструкція вузла зливу (рис.12в) з точки зору гідравліки має характеристики водозливу з широким порогом (при чотирикратному відношенні довжини до діючого напору) з коефіцієнтом витрати 0,35 [23, С.139,140]. За результатами розрахунку, виконаними за [23], при рівні конденсату в колоні над нижньою поверхнею зливу $0,95D$ витрата зливу для трубопроводів з діаметром D 65 мм, 80 мм та 100 мм відповідно становить 5,2, 8,6 та 14,7 м³/год. Вузли зливу з колон Е01, Е02, Е03 з витратою 3,9, 7,5 та 9,3 м³/год виконано діаметром 65 мм, 80 мм і 100 мм, злив з колони Е04а в збірник конденсату з витратою 10,8 м³/год – діаметром 100 мм.

Схему вузла зливу конденсату з колон наведено на рис. 12в. Вузол включає несиметричний перехід 125 на 65 (80 або 100) мм і приєднане до нього коліно діаметром 65 (80 або 100) мм. Злив рідини гравітаційний, забезпечений наявністю у верхній частині патрубку парового простору для передачі тиску пари з колони на рідину в петлі.

Злив конденсату із застосуванням гідравлічної петлі (рис. 12а). При однаковому рівні конденсату в апаратах вісь вхідної труби знаходиться на рівні конденсату в колоні, вісь труби зливу на наступній колоні – на 190 мм вище. Передбачається, що гарячий конденсат при зливі не переміщується з холодним, а скипає [24] і пара скипання поступає на поверхню нагріву.

З урахуванням різниці тисків в колонах Е01...Е04а (9,12...10,0 кПа), гідравлічного опору руху рідини в трубі (0,130-0,750 кПа). а також перевищенням висоти зливу над подачею (190 мм) габарит гідравлічних петель по висоті складає 1250-1300 мм. Додаткова висота стовпа рідини для протидії прориву пари по величині повинна бути не менше ніж сума двох діаметрів труби.

Злив конденсату без гідравлічної петлі використовується у випадку однакового тиску в апараті утворення конденсату і апараті зливу. Таким чином виконані конденсатопроводи з теплообмінників Pr21...Pr-25 в корпуси колон та конденсатора, а також з колон Е04а і Е04б в збірник конденсату. Злив з конденсатора С01 в збірник конденсату 5RO1 (абсолютний тиск відповідно 7,4 кПа і 15,3 кПа, різниця тиску еквівалентна висоті водяного стовпа 790 мм) забезпечується завдяки утворенню допоміжного стовпа води висотою 790 мм в зливному трубопроводі.

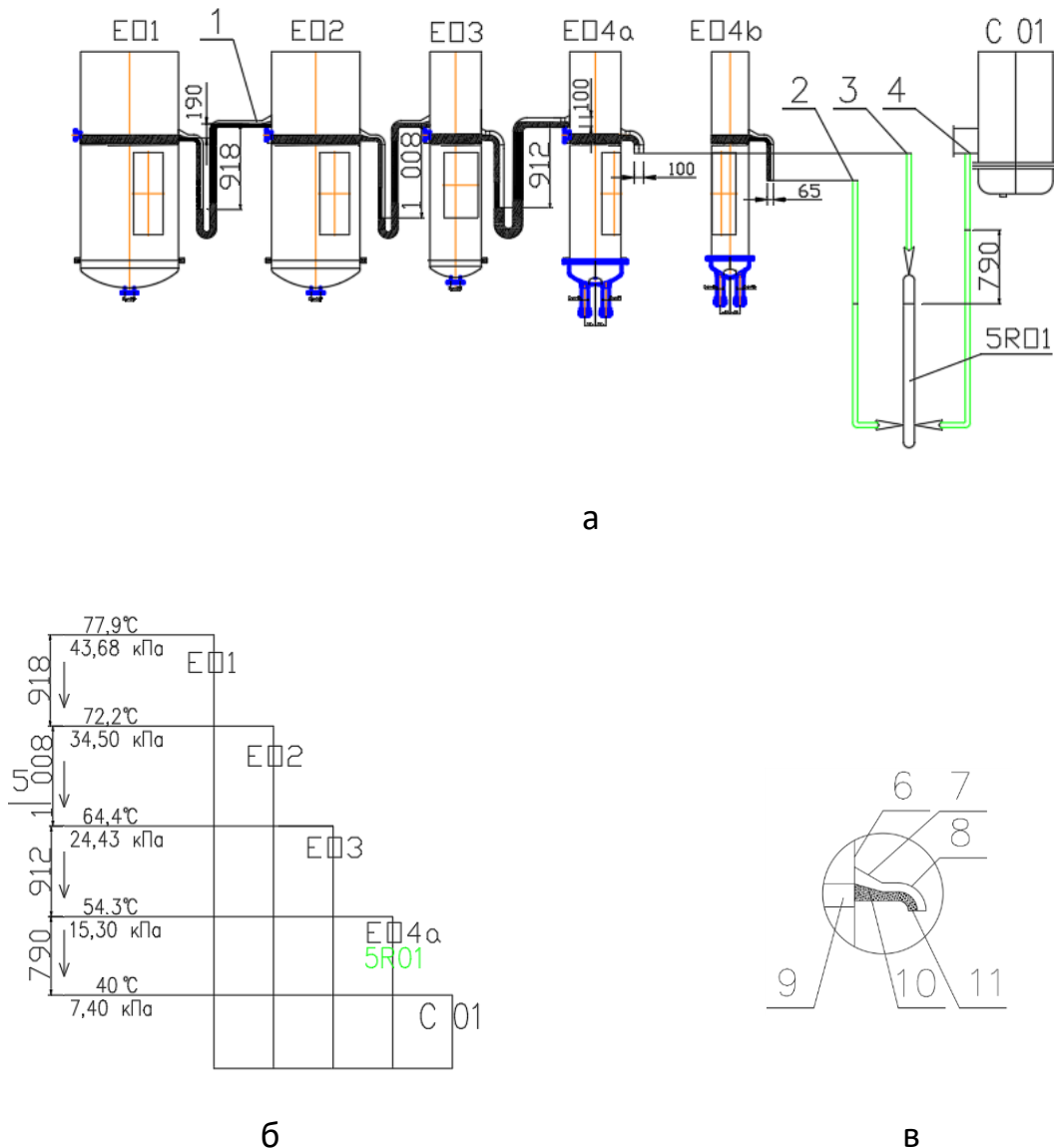


Рис. 12. Схема зливу конденсату

- а) гідравлічна схема: EO1-EO4b – випарні колони, CO1 – конденсатор, 5RO1 – збірник конденсату 1 – злив з гідравлічною петлею, 2, 3 – прямий злив з колон, 4 – прямий злив з конденсатора;
- б) діаграма температур і тисків: 5 – еквівалентна висота водяного стовпа;
- в) вузол зливу конденсату: 6 – корпус апарата, 7 – несиметричний перехідник, 8 – коліно, 9 – шар конденсату, 10 – водозлив, 11 – русловий потік.

При модернізації чотирьохкорпусної вакуумної випарної Альфа-Лаваль Шефферс виконана заміна пошкоджених випарних труб, встановлена розроблена двосекційна система зрошення в колонах EO4a і EO4b, система зливу та використання тепла конденсату. Установка оснащена системою автоматизації на базі контролера «Siemens» та сучасних компонентів КВП і А. Проведені пускові і

налагоджувальні роботи, установка введена в експлуатацію, її надійність підтверджена безвідмовною роботою протягом трьох років.

Підтверджено проектні параметри, попередньо отримані за удосконаленою методикою теплового розрахунку (рис. 5, рис. 6, табл. 2). Забезпечена проектна продуктивність установки по випаруваній волозі 12000 кг/год та по згущенню продукту 48 % сухих речовин, Робочий перепад між температурою нагрівної пари в першій випарній колоні та вторинної пари в крайній колоні становить 35,6°C за розрахункового перепаду 36,6°C.

Обстеження випарних колон ЕО4а і ЕО4б з модернізованою системою зрошення випарних труб не виявило надмірних забруднень випарних труб та повне їх очищення в процесі мийки установки.

Надійність роботи системи зливу конденсату перевірено при пуско-налагоджувальних роботах візуально через оглядові вічка. Використання тепла конденсату підтверджено величиною підігрівання продукту в пластинчатому теплообміннику. За наявної потреби в кількості тепла на підігрівання і згущення продукту 7 МВт проведені заходи по модернізації системи зливу конденсату та використання його тепла забезпечили надійність системи та додаткову рекуперацію 250 кВт.

Висновки. Ефективність технічних рішень, дані експериментальних досліджень та розрахунків, виконаних на основі загальноприйнятих методів матеріального і теплового балансів процесів згущення продукту, процесів теплопередачі та гідродинаміки для визначення конструктивних і режимних параметрів установки, підтверджено результатами пуско-налагоджувальних випробувань та експлуатації модернізованої вакуумно-випарної установки. Удосконалена методика теплового розрахунку багатокорпусної випарної установки в сучасних прикладних програмах вирішує знаходження узгодженого кінцевого результату в автоматичному режимі методом варіантних наближень з урахуванням актуальних теплофізичних параметрів робочих речовин, необхідних критеріальних залежностей розрахунку процесів теплопередачі та в повній мірі структури функціональної схеми багатокорпусної установки (в тому числі скипання перегрітого продукту, відбору екстра-пари, випаровування конденсату).

Набутий науково-технічний досвід по модернізації та введення в експлуатацію згаданої установки у сукупності з досвідом виробництва одно- і двокорпусних вакуумно-випарних установок може бути основою для організації виробництва в Україні багатокорпусних установок з паровою компресією.

References

1. Makarov A.S., Khodos A.I., Kiriienko M.O., Senchuk M.P. “Energoefektyvni vacuum-vyparni ustanovky dlia kontsentryvannia v molochnii promyslovosti.” Ventyliatsiia, osvittlennia ta teplohozopostachannia: Naukovo-tekhnichnyi zbirnyk, Iss. 43, 2022, pp. 13-26. (in Ukrainian)
2. Makarov A.S., Senchuk M.P., Khodos A.I., Kiriienko M.O. “Pidvyschennia efektyvnosti tekhnolohichnoi skhiemy promyslovoho vysokotempieraturnoho povitronahrivacha.” Ventyliatsiia, osvittlennia ta teplohozopostachannia: Naukovo-tekhnichnyi zbirnyk, Iss. 40, 2022, pp. 6-15. (in Ukrainian)
3. Kulinichenko V.R., Myronchuk V.G. Vyparovuvannia I vyparni aparaty u rozrakhunkakh v konstruiuvanni. Kondor, 2006. (in Ukrainian)
4. Maliezhyk I.F. Prozesy i aparaty kharchovykh vyrobnyztv. Edited by. Maliezhyk I.F., “Nazionalnyi universytet kharchovykh tekhnologii”, 2003. (in Ukrainian)
5. Minton, Paul E. Handbook of evaporation technology. Noyes Publications, 1986.
6. Tubular Exchanger Manufacturers Association, Inc. Standards of the Tubular Exchanger Manufacturers Association. 8-th edit., TEMA, 1999.
7. Fokin V.S., Shulgin Yu.V. Osnovy proektirovaniia tieploarmiennykh, vyparnykh I rektifikazionnykh ustanovok, Nazionalnyi tekhnichnyi universytet “Kharkivskiy politekhnichnyi instytut”, 2005.
8. Kostenko G.I., Popova T.M. Obobshennaia metodika rascheta energetichieskikh kharakteristik mnogokorpusnykh vyparnykh ustanovok, Izviestiia vuzov “Pishievaia tiekhnologiiia”, 1968. (in Russian)
9. Domanskii I.V. Mashiny i apparaty khimichieskikh proizvodstv. Priemiery i zadachi. Mashinostroieniie, 1982. (in Russian)
10. Vasilenko S.M., Forsiuk A.V., Shutiuk V.V., Chepel N.V. Teplohidravllichnii rozrakhunok plivkovykh viparnykh aparativ, Naukovi prazi UDUKHT, Iss. 11, 2002, pp. 124-126. (in Ukrainian)
11. Globa O.V. Teploviddacha pry vyparovuvanni Iaablochnogo soku, Naukovi prazi NUKHT, 2003, pp. 30-31. (in Ukrainian)
12. Demchuk G.S., Konstantinov S.M. Uvarivaniie meliasnoi bardy, Technika, 1966. (in Russian)
13. Tananaiko Yu.M. Mietody rascheta i issliedovaniia plenochnykh prozessov, Technika, 1975. (in Russian)
14. Lazariiev V.D. “Modernizatsiia plenochnykh vyparnykh ustanovok.” Molochnaia promyshliennost, no. 8, 1982, pp. 32-34. (in Russian)
15. Tarasov K.I. “Statchieskiie kharaktieristiki mnogokorpusnoi vakuumno-byparnoi ustanovki s padayushiei plenkoi.” Molochnaia promyshliennost, no. 1, 1974,

pp. 15-17. (in Russian)

16. Kutepov A.M. Hidrodinamika i teploobmien pri paroobrazovanii, Vysshaia shkola, 1986. (in Russian)

17. Stabnikov V.N. Proiektirovaniie prozessov i apparatov pishchievykh proizvodstv, Vyshcha shkola, 1985. (in Russian)

18. Fayed Muhammad, Otten Lakbert. Handbook of Air Pollution prevention and control, USA, 2002. (in Russian)

19. Bezrodnyi M.K., Pioro I.L., Kostyuk T.O. Prozessy pierienosa v dvukhfaznykh termosifonnykh sistemakh. Tieoriia I praktika, Fakt, 2005. (in Russian)

20. Kuzniezov V.V. "Tiekhnologichieskoie oborudovanie dlia priedpriatii miasnoi, ptizepiererabatyvayushchiei I molochnoi promyshliennosti." Katalog Molochnaia promyshliennost, AgroNIITEIITO, vol. 3, 1990. (in Russian)

21. Pazhi D.G., Galustov V.S. Osnovy tiekhniki raspylieniia zhidkostiei, Khimiia, 1984. (in Russian)

22. Altshul A.D., Kisielev P.G. Hidravlika I aerodynamika (osnovy mekhaniky zhidkosti, Stroiizdat, 1975. (in Russian)

23. Spravochnik po hidravlikie, Edited by. Bolshakov V.A., Vysshaia shkola, 1984. (in Russian)

24. Shurchkova Yu.A. Adiatatnoie vskipaniie, Naukova dumka, 1999. (in Russian)

UDC 662.995

PhD, SRF. **Anatoliy Makarov**,
makarov.anatoly@kmbp.com.ua

Eng. **Andriy Khodos**,
khodos@kmbp.com.ua

Eng. **Michaylo Kirienko**,
mihail_kirienko@ukr.net

PhD, Assoc. Prof. **Michaylo Senchuk**,
smp_21@ukr.net, ORCID: 0000-0001-8968-7336

Kyiv national University of Construction and Architecture

IMPROVING THE RELIABILITY AND EFFICIENCY OF A MULTI-HULL VACUUM EVAPORATOR

The scope of application of multi-vessel vacuum evaporator units for concentrating solutions and their prospects for implementation in the dairy, starch and molasses and other industries for thickening a product with high viscosity, production of dried dairy products, canned milk with sugar, as well as in conditions of low cost of steam when burning local fuels or in the combined production of electricity and heat are determined. An improved methodology for calculating a multi-vessel vacuum evaporator with steam compression for condensing dairy products is proposed, the feature of which is the cellular structure of the calculation model in the form of calculation tables formed according to individual technological and design parameters of the unit. The results of the modernization of a four-hull vacuum evaporator with steam compression from Alfa Laval Schaeffers, performed on the basis of the analysis of data from its long-term operation for the concentration of dairy products and calculation, experimental and commissioning studies in order to improve the main functional units to ensure reliable and efficient operation, are presented. The effectiveness of the implemented technical solutions has been confirmed by the results of commissioning tests of the modernized plant and during its further operation. The scientific and technical experience of PJSC "Kalynivka Machine-Building Plant" (Kalynivka, Vinnytsia region) in modernization and commissioning of the above four-hulled unit, together with the experience in production of highly efficient single-hulled vacuum evaporators with mechanical compression BBV-Mк and double-hulled evaporators with combined compression BBV-Mк-Пк, is the basis for organization of production of multi-hulled evaporators with steam compression in Ukraine.

Keywords: multivessel vacuum evaporator; concentration; product thickening; mechanical compression; steam compression; heating steam; secondary steam; extract steam; improved method of calculation of multivessel evaporator.