

надаватися державна підтримка.

За результатами проведеної оцінки економічної ефективності проекту розрахункові критерії складають:

чистий дисконтований дохід ($чDD$)	16,3 млн. грн.
(чиста приведена вартість)	
індекс прибутковості (ID)	25,1 %
(коефіцієнт чистого дисконтованого доходу)	
внутрішня норма дохідності (d)	28,0 %
термін окупності (T)	4 роки

Розраховані критерії відповідають вимогам при умові надання позитивного висновку: чиста приведена вартість ($чDD$) є позитивною; внутрішня норма дохідності (d) є більшою за норму рефінансування капітальних вкладень; індекс прибутковості (ID) становить 25,1 %, тобто проект слід визначити прибутковим; термін окупності проекту (T) 4 роки, за які первісна сума інвестицій повністю повертається за рахунок накопиченого чистого дисконтованого доходу.



Рис. 1. Модель трансферу наукових розробок

Фінансові показники реалізації проекту такі – загальна вартість проекту 65200,0 тис. грн., в тому числі в основні фонди 53195 тис. грн.; власні оборотні фонди – 12005 тис. грн. Одноразові вкладення по роках: 2014 – 2000 тис. грн., 2015 – 53200 тис. грн., 2016 – 10000 тис. грн. Строк реалізації проекту наукового парку – 7 років з дня його державної реєстрації.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Закон України «Про наукові парки» зі змінами та доповненнями [Електронний ресурс] // Урядовий портал. Єдиний веб-портал органів виконавчої влади України. - Режим доступу: <http://www.kmu.gov.ua>.
2. Постанова Кабінету Міністрів України від 17 березня 2011 р. № 308 «Про затвердження Порядку використання коштів, передбачених для державної підтримки реалізації інноваційних проектів у реальному секторі економіки через механізм здешевлення кредитів». [Електронний ресурс] // Урядовий портал. Єдиний веб-портал органів виконавчої влади України. - Режим доступу: <http://www.kmu.gov.ua>.
3. Постанова Кабінету Міністрів України від 22 серпня 2012 р. № 782 «Про затвердження Порядку та умов надання в 2012 р. державних гарантій для забезпечення виконання боргових зобов'язань за запозиченнями суб'єктів господарювання, залучення для реалізації інвестиційних, інноваційних, інфраструктурних та інших проектів розвитку, які мають стратегічне значення та реалізація яких сприятиме розвитку національної економіки. [Електронний ресурс] // Урядовий портал. Єдиний веб-портал органів виконавчої влади України. - Режим доступу: <http://www.kmu.gov.ua>.

УДК 536.422.1:621.565.8

ОНЩЕНКО В.П., д-р техн. наук, професор, **ЖЕЛІБА Ю.О.**, канд. техн. наук, доцент, **ХАРЧЕНКО С.В.**

Навчально-науковий інститут холоду, кріотехнологій та екоенергетики

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОЛОГІСНИХ ПРОЦЕСІВ ВИПАРОВУВАННЯ

Стаття присвячена математичному моделюванню процесів випаровування рідин сублімації твердих речовин з поверхні капілярно пористого тіла. Моделювання проходить у рамках висунутої авторами ізобарно-ізоентальпійної теорії протікання процесів випаровування. В основу методики покладено теоретично обґрунтовані рівняння стану з вірйальними коефіцієнтами.

Оскільки інноваційний продукт, вироблений за проектом, є імпортозамінюючим, окремо слід відмітити економію валютних коштів в сумі 27729 тис. дол. США.

Очікуваний екологічний ефект: реалізація цього інноваційного проекту передбачає впровадження в сільськогосподарське виробництво рослинної, тваринної, аква- та марікультури органічної, екобезпечної технології вирощування, бобово-ризобільних систем в сучасному землеробстві, що сприятиме оптимізації структури посівних площ, отриманню екологічно чистої продукції, зменшенню енергозатрат та збереженню родючості ґрунтів. Зазначені технології розроблені фахівцями НАН, НААН, Національного університету біоресурсів і природокористування України. Проектом також передбачається використання альтернативних джерел енергії.

Актуальними є зміни в кількості робочих місць. Кількість задіяних робочих місць у вирощуванні сировинних ресурсів для використання у виробництві інноваційних продуктів збільшиться на 90 місць, створення нових робочих місць у виробництві інноваційного продукту в основному і допоміжному виробництві складе 110 місць. За рахунок створення робочих місць зменшиться безробіття, що за приблизними розрахунками зменшить виплату допомоги по безробіттю 200 тис. грн. Реалізація проекту позначиться на підвищенні надійності енергопостачання населеного пункту, покращенні стану автомобільних шляхів, торговельної мережі, телефонного зв'язку, електронної пошти та інших інфраструктурних змін. Основним соціальним ефектом реалізації проекту є випуск інноваційного продукту, вживання якого дітьми з аліментарними захворюваннями покращить стан їхнього здоров'я, зменшить медикаментозне навантаження при їх лікуванні. Попередні висновки доказової медицини підтверджують зменшення медикаментозного навантаження до 20 % при лікуванні аліментарно залежних захворювань.

Поступила 02.2013

equation of state with virial coefficients is assumed as a methodology basis.

Keywords: Mathematical modeling – isobaric-isoenthalpy theory – heathumidity process – the equation of state.

Процеси випаровування дуже часто зустрічаються як у природі, так і в технологічних процесах холодильних технологій. Вони суттєво визначають енергетичні характеристики виробничих процесів, технічні характеристики обладнання, природні втрати сировини та продукції від усихання та мікробіологічного псування [1]. Певна річ, що ці процеси викликають інтерес до більш детального вивчення законів їх протікання. Серед світового досвіду відомі такі підходи до моделювання тепловологісних процесів випаровування, як емпіричний, дифузійний. Ці підходи не можна вважати надійними з багатьох причин. Тому актуальним залишається завдання розробки єдиного термодинамічного, теоретично обґрунтованого підходу до моделювання тепловологісних процесів випаровування, який дозволить надійно прогнозувати температурні, енергетичні та масові ефекти під час випаровування води з поверхні харчової сировини, різноманітних продуктів в процесі їх холодильної обробки чи холодильного зберігання.

Представлена математична модель базується на тому, що процес випаровування розглядається як ізобарно-ізоентальпійний [2-4]. Тут мається на увазі, наприклад, що ентальпійні втрати змоченої кульки термометра за рахунок випаровування рідини у потік газу компенсуються припливом теплоти від газу, а саме газ вбирає в себе пару рідини в максимально можливій кількості, до досягнення відносної вологості, рівної одиниці.

Під вологим компонентом розуміємо речовину, якою насичується газове середовище у тепловологісному процесі.

Для опису газової суміші, що містить тільки один компонент, який зазнає фазове перетворення рідина-газ (в заданому діапазоні температур), введемо такі її характеристики:

- барометричний (загальний) тиск газової суміші – P , (Па);
- температура – T , (К);
- концентрації компонент. Оскільки "волога" компонент тільки один, достатньо поняття абсолютного вологовмісту d , ($\text{кг}_{\text{вологи}}/\text{кг}_{\text{сух.ч.}}$);
- молекулярні маси компонент μ (всього N найменувань);
- відносна вологість газової суміші (по N_{ii}

компоненті суміші) $\varphi = \frac{\rho \Pi}{\rho''(T)} \Big|_N$;

Термічне рівняння стану повинно дати взаємозв'язок між зазначеними вище характеристиками газової суміші.

Якщо $G_{\text{сух}}$ – маса "сухої" частини газової суміші, а G_N – маса "вологої" частини, то вологовміст d_N буде визначатись як відношення

$$d_N = \frac{G_N}{G_{\text{сух}}},$$

звідси виразимо масу вологої частини газової

суміші

$$G_N = d_N \cdot G_{\text{сух}}.$$

Відповідна кількість молів кожного з компонент газової суміші буде дорівнювати:

$$N_i = \frac{G_i}{\mu_i},$$

де $i=1 \div (N-1)$ – компоненти "сухої" частини; μ_i – молекулярні маси компонент "сухої" частки газу.

Аналогічно можна записати вираз для кількості молів "вологого" компонента газової суміші:

$$N_N = \frac{G_N}{\mu_N}.$$

Через число молів компонент можна отримати співвідношення між характеристиками газової суміші з одним вологим компонентом в ідеально-газовому наближенні:

$$\frac{P_N \cdot V}{R \cdot T} = N_N = \frac{G_N}{\mu_N}$$

де V – загальний об'єм газової суміші, м^3 .

Враховуючи, що $G_N = d_N \cdot G_{\text{сух}}$, одержимо:

$$\frac{P_N \cdot V}{R \cdot T} = \frac{d_N \cdot G_{\text{сух}}}{\mu_N}.$$

З іншого боку, рівняння стану для "сухої" частини газової суміші має вигляд:

$$\frac{P_{\text{сух}} \cdot V}{R \cdot T} = \frac{G_{\text{сух}}}{\mu_{\text{сух}}}.$$

Виразимо масу "сухої" частини газової суміші

$$G_{\text{сух}} = \frac{P_{\text{сух}} \cdot V \cdot \mu_{\text{сух}}}{R \cdot T};$$

звідси маємо:

$$\frac{P_N \cdot V}{R \cdot T} = \frac{d_N}{\mu_N} \frac{P_{\text{сух}} \cdot V \cdot \mu_{\text{сух}}}{R \cdot T} \Rightarrow$$

$$P_N \cdot \mu_N = d_N \cdot P_{\text{сух}} \cdot \mu_{\text{сух}}.$$

За законом Рауля для ідеально-газової суміші:

$$P = P_{\text{сух}} + P_N \Rightarrow P_{\text{сух}} = P - P_N,$$

$$P_N \cdot \mu_N = d_N \cdot (P - P_N) \cdot \mu_{\text{сух}};$$

тепер можна записати вираз для d_N :

$$d_N = \frac{P_N \cdot \mu_N}{(P - P_N) \cdot \mu_{\text{сух}}}.$$

Якщо відносну вологість газової суміші приблизно записати як $\varphi = \frac{P_N}{P_N''(T)}$, то одержимо:

$$d_N = \frac{P_N''(T) \cdot \mu_N}{(P - \varphi \cdot P_N''(T)) \cdot \mu_{\text{сух}}} \quad (1)$$

Завдяки засвоєнню вологи в тепловологісному процесі повітря є об'єктом змінної маси. Саме це вимагає використовувати термодинамічний потенціал для відображення термодинамічних параметрів вологого повітря.

Зміну ентальпії Δi вологовміщуючої газової суміші в тепловологісному процесі можна подати у вигляді повного диференціала:

$$\Delta i = \left(\frac{\partial i}{\partial T}\right)_{P,d} \Delta T + \left(\frac{\partial i}{\partial d}\right)_{P,T} \Delta d + \left(\frac{\partial i}{\partial P}\right)_{T,d} \Delta P, \quad (2)$$

звідси можна отримати вираз для зміни вологовмісту газової суміші:

$$\Delta d = \frac{\Delta i - \left(\frac{\partial i}{\partial P}\right)_{P,d} \cdot \Delta P - \left(\frac{\partial i}{\partial \varphi}\right)_{P,d} \cdot \Delta \varphi}{\left(\frac{\partial i}{\partial d}\right)_{P,\varphi}}. \quad (3)$$

Якщо цю питому ентальпію розглядати як функцію трьох незалежних змінних стану газової суміші - температури T , тиску P та вологовмісту d . У разі, якщо цю ж ентальпію розглядати як функцію P, d та відносної вологості φ , то аналогічно можна записати:

$$\Delta i = \left(\frac{\partial i}{\partial \varphi}\right)_{P,d} \Delta \varphi + \left(\frac{\partial i}{\partial d}\right)_{P,\varphi} \Delta d + \left(\frac{\partial i}{\partial P}\right)_{\varphi,d} \Delta P, \quad (4)$$

з цього виразу також за аналогією запишемо вираз для зміни вологовмісту газової суміші:

$$\Delta d = \frac{\Delta i - \left(\frac{\partial i}{\partial P}\right)_{T,d} \cdot \Delta P - \left(\frac{\partial i}{\partial T}\right)_{P,d} \cdot \Delta T}{\left(\frac{\partial i}{\partial d}\right)_{P,T}}. \quad (5)$$

Комбінуючи (3) та (5) одержимо вираз для Δd :

$$\Delta d = \frac{\left(\frac{\partial i}{\partial T}\right)_{P,d} \cdot \Delta T - \left(\frac{\partial i}{\partial \varphi}\right)_{P,d} \cdot \Delta \varphi - \left[\left(\frac{\partial i}{\partial P}\right)_{P,\varphi} - \left(\frac{\partial i}{\partial P}\right)_{T,d}\right] \cdot \Delta P}{\left(\frac{\partial i}{\partial d}\right)_{P,\varphi} - \left(\frac{\partial i}{\partial d}\right)_{P,T}} \quad (6)$$

де враховано, що $\left(\frac{\partial i}{\partial T}\right)_{P,d} = C_{\text{вт.н}}$ - питома теплоємність вологого повітря, а $\left(\frac{\partial i}{\partial d}\right)_{P,T} = i_{\text{H}_2\text{O}}(P, T)$ -

питома ентальпія водяної пари. У такому разі розрахунок Δd необхідно проводити через розрахунок температурних (ентальпійних) полів об'єктів.

Таким чином, розрахунок кількості вологи, що може засвоїти газове середовище в тепловологісному процесі, потребує розрахунку шести тепловологісних похідних ентальпії газових сумішей, дві з яких $C_{\text{вол.п.}}$, $i_{\text{H}_2\text{O}}(P, T)$ є традиційними в теорії кондиціонування повітря. У камерах виробничих холодильників, які ніяк не є герметичними і в них не використовується регульоване газове середовище, змінами загального барометричного тиску ΔP повітря можна нехтувати, а з ним і двома тепловологісними похідними ентальпії по тиску. Тому для розрахунків кількості вологи, що засвоює газове середовище в тепловологісному процесі холодильних технологій, достатньо знати тільки дві похідні ентальпії - $\left(\frac{\partial i}{\partial \varphi}\right)_{P,d}$ та $\left(\frac{\partial i}{\partial d}\right)_{P,\varphi}$. Вони, як і

величини $C_{\text{вол.п.}}$, $i_{\text{H}_2\text{O}}(P, T)$ є термодинамічними функціями стану газових сумішей (повітря), можуть бути розраховані при наявності рівняння стану в P - φ - T - d - зображенні плюс ідеально-газових функцій ком-

понент газової суміші.

Для здійснення розрахунків за (4), (6) знайдемо тепловологісні похідні ентальпії газової суміші з одним "вологим" компонентом в ідеально-газовому наближенні.

Найбільш складний для розрахунку тепловологісний процес - випаровування якоїсь рідини, чи її конденсація у вологому повітрі, $\text{N}_2 + \text{O}_2 + \text{CO}_2 + \text{A}_2 + \text{H}_2\text{O}$, п'ятикомпонентній суміші. Можна ці газу пронумерувати в подальшому чисельному алгоритмі:

N_2 -	$i = 1$
O_2 -	$i = 2$
CO_2 -	$i = 3$
A_2 -	$i = 4$
H_2O -	$i = 5$.

Якщо зміни температури такої газової суміші не супроводжуються конденсацією H_2O , то ентальпію цієї суміші можна записати, як

$$i_o(P, T, d) = \sum_{i=1}^5 \frac{m_i}{(1+d) \cdot \sum_{j=1}^5 m_j} \cdot i_{oi}(T) + \frac{d}{1+d} \cdot i_N(T), \quad (7)$$

де індекси i, j відносяться до компонент "сухої" частини, індекс N - до "волоγοї" частини, $m_i, i=1 \div 5$ - маси компонент сухої частини ($\sum_{i=1}^5 m_i = 1$ кг). Тут необхідно звернути увагу на розмірність величини ентальпії, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг суміші}}$. Оскільки в (1, 7) незалежних

змінних три, то часткові похідні ентальпії мають сенс при постійних значеннях "інших" двох змінних, зокрема, похідна $\left(\frac{\partial i}{\partial T}\right)_{P,d}$ буде мати сенс ізобарної теплоємності газової суміші:

$$C_P^o = \left[\left(\frac{\partial i_o(P, T, d)}{\partial T}\right)_{P,d} \right] = \sum_{i=1}^5 \frac{m_i}{(1+d) \cdot \sum_{j=1}^5 m_j} \cdot C_{Pi}^o(T) + \frac{d}{1+d} \cdot C_{PN}^o(T) \quad (8)$$

Представляє в подальшому інтерес похідна $\left(\frac{\partial i}{\partial d}\right)_{P,T}$, яка вже має "тепловологісний" характер:

$$\left(\frac{\partial i_o}{\partial d}\right)_{P,T} = \sum_{i=1}^5 \frac{m_i}{(1+d)^2 \cdot \sum_{j=1}^5 m_j} \cdot i_o(T) + \frac{d}{(1+d)^2} \cdot i_N(T); \quad (9)$$

Для співвідношень характеристик газової суміші при розчиненні в ній рідини "вологого" компонента представляє інтерес і похідна $\left(\frac{\partial i_o(P, T, d)}{\partial P}\right)_{T,d}$,

яка може бути отримана через аналіз $m_i, \sum_{j=1}^5 m_j$ у відповідних термічних рівняннях стану ідеальних газів.

З позиції подальшого аналізу представляє інтерес і аналіз тепловологісних процесів в термінах незалежних змінних P, d, φ . Відповідні похідні можна отримати, якщо врахувати, що $\varphi \equiv \varphi(T, d)$ в рамках співвідношення (1).

$$\text{Почнемо з похідної } \left(\frac{\partial i_o(P, T, \varphi)}{\partial d}\right)_{P,\varphi} :$$

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Жадан, В.З. Влагообмен в плодовоовощехранилищах [Текст] – М. Агропромиздат, 1985 г. – 195 с.
2. Желіба, Ю.О. Экспериментальные дослідження та математичне моделювання процесу випаровування нафталіну у повітря при атмосферному та знижених тисках [Текст] / Ю.О. Желіба, С.В. Харченко, В.Б. Владімірова, М.В. Оніщенко // Збірник тез доповідей 6-ої МНТК «Сучасні проблеми холодильної техніки та технології». Одеса, вид. ОДАХ, 2009. – с.170 – 172.
3. Оніщенко, В.П. Эспериментальное исследование и термодинамическое моделирование процесса испарения тетрахлоорметана в атмосферу азота [Текст] / В.П. Оніщенко, Ю.О. Желіба, С.В. Харченко // Збірник тез доповідей МНТК «Сучасні проблеми холодильної техніки і технології». Одеса, вид. ОНАХТ, – 2011. – с. 105 – 107.
4. Оніщенко, В.П. Экспериментальные дослідження розчинності в газове середовище довольного складу [Текст] / В.П. Оніщенко, Ю.О. Желіба, С.В. Харченко, М.В. Оніщенко // Холодильная техника и технология. – 2012. – № 137 (3).– с. 57 – 62.

УДК 664.046

КИРИЛЛОВ В.Х., д-р техн. наук, профессор, ХУДЕНКО Н.П., канд. техн. наук, доцент
Одесская национальная академия пищевых технологий

ГИДРОДИНАМИКА ТОНКОГО СЛОЯ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ НА НАКЛОННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПЛЕНОЧНЫХ ТЕПЛОМАССОБМЕННЫХ АППАРАТОВ ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ

Рассматривается волновое течение тонкого слоя жидкости по наклонной поверхности. На основании уравнений пограничного слоя получено нелинейное дифференциальное уравнение для свободной поверхности пленки жидкости. В линейном приближении проводится исследование волновых режимов течения. Рассмотрена устойчивость ламинарного безволнового течения. Получены области устойчивости в зависимости от угла наклона рабочей поверхности. Рассмотрены волны максимального роста и нейтральные волны.

Ключевые слова: пленочные теплообменные аппараты, уравнения пограничного слоя, устойчивость, скорость, частота и амплитуда волны.

We consider the wave flow of a thin layer of liquid on an inclined surface. On the basis of the equations of the boundary layer obtained the nonlinear differential equation for the free surface of a film of liquid. In the linear approximation, we study the wave flow regimes. The stability of the laminar flow waveless. We obtain the stability region depends on the angle of the work surface. Consideration of the maximum wave height and wave neytralnye.

Keywords: film heat and mass transfer devices, the boundary layer equations, stability, speed, frequency and amplitude of the wave.

Одним из прогрессивных способов взаимодействия фаз в контактных теплообменных аппаратах является осуществление контактирования фаз при пленочных течениях жидкостей.

Пленочные тепло- и массообменные аппараты получили широкое распространение во всех отраслях пищевой промышленности [1]. По технологическому назначению плёночные аппараты выполняют роль абсорберов и теплообменников. Используются они также как абсорберы, десорберы, конденсаторы, дистилляторы, ректификационные колонны, деаэраторы, градирни, аппараты для очистки и охлаждения газов, выпаривания растворов, аппараты комбинированного назначения.

По экспериментальным данным и теоретическим исследованиям [2], установлено, что ламинарное безволновое течение тонкого слоя вязкой жидкости является неустойчивым и на свободной поверхности жидкостной плёнки имеют место сложные нелинейные волнообразования. Поскольку такой волновой режим течения плёнки имеет гравитационно-капиллярную природу, то представляет интерес исследование волновых течений жидкости по наклонной поверхности, при этом гравитационная составляющая волнообразования ослабляется (по сравнению с вертикальной поверхностью), а время пребывания жидкости в контактном устройстве плёночного аппарата увеличивается.

Для описания движения тонкого слоя вязкой

жидкости по наклонной поверхности (рис. 1) применяются уравнения пограничного слоя [2 – 4]:

уравнения движения –

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + g \sin \beta \quad (1)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + g \cos \beta = 0$$

$$\text{уравнение неразрывности} - \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

Граничные условия: на свободной поверхности при

$$y = h(t,x) - v = \frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x} \quad (3)$$

$$p + \sigma \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = p_0; \quad (4)$$

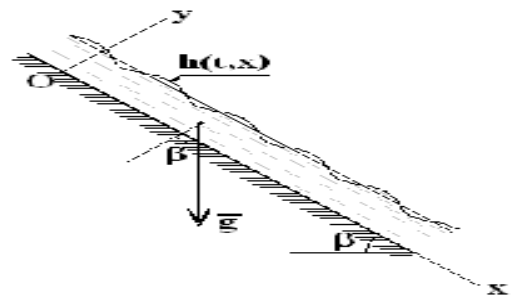


Рис. 1. Схема течения

$$\frac{\partial u}{\partial y} = 0; \quad (5)$$

на наклонной поверхности при $y = 0 -$

$$u = v = 0. \quad (6)$$

В уравнениях (1) – (2) и граничных условиях (3) – (6) неизвестными функциями являются:

- компоненты скорости $u(t,x,y)$ (продольная скорость) и $v(t,x,y)$ (поперечная скорость), м/с;
- давление $p(t,x,y)$, Па;
- уравнение свободной поверхности $y = h(t,x)$ (локальная толщина плёнки жидкости), м.

Упростим исходную дифференциальную задачу (1)-(6).

Из уравнения неразрывности (2), второго уравнения системы (1) и граничного условия (4) распределение давления при волновом режиме определяется