

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2022-271-1-36-40>

УДК 66.011:661.525

ПОБУДОВА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ВИПАРНОЇ УСТАНОВКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-СТАТИСТИЧНИМ МЕТОДОМ

Проказа О.І., Кузнецова О.В.

CONSTRUCTION OF MATHEMATICAL MODELS OF EVAPORATION PLANT BY EXPERIMENTAL-STATISTICAL METHOD

Prokaza O.I., Kuznetsova O.V.

Для вирішення задач оптимального управління процесом упарювання у виробництві аміачної селітри необхідно мати математичний опис технологічних процесів, які протікають в окремих випарних апаратах. Кінцевою метою дослідження є отримання адекватної математичної моделі процесу випарювання і знаходження оптимального технологічного режиму.

Досліджувалась випарна установка, до якої входить випарний апарат з сепаратором для випарювання свіжого розчину аміачної селітри і доупарюючий апарат з падаючою плівкою. Аналіз випарної установки як об'єкта керування дозволив визначити вхідні і вихідні параметри, які характеризують особливості процесу упарювання у різних випарних апаратах. На підставі проведеного аналізу встановлена необхідність розробки моделей для кожного випарного апарату.

Для отримання експериментально-статистичних моделей випарної установки був зібраний статистичний матеріал з реального об'єкту управління. Обробка даних проводилась методами кореляційного і регресійного аналізу.

На підставі отриманих експериментальних даних проведений багатofакторний кореляційно-регресійний аналіз для отримання якнайкращих залежностей для оцінки вихідних величин випарних апаратів. Для параметрів, статистичний опис яких гарантує задану надійність, виконаний однофакторний регресійний аналіз. Окрім лінійних моделей аналізувались експоненціальні, гіперболічні, логарифмічні моделі.

За підсумками дослідження, встановлено, що не всі дані вхідні параметри мають сильну кореляцію з вихідними параметрами, враховуючи вибраний рівень надійності моделі. Таким чином, частина інформації, отриманої експериментально, виявилася недоступною для аналізу класичними статистичними методами.

В результаті порівняння критеріїв адекватності моделей на різних етапах дослідження отримані моделі з високими показниками критеріїв адекватності. При перевірці адекватності отриманих моделей для всіх залежностей відносна похибка результатів не перевищила 2%, що підтверджує значущість отриманих моделей і можливість їх застосування для прогнозування управління.

Ключові слова: математична модель, випарний апарат, аміачна селітра, критерій адекватності.

Вступ. Математичне моделювання є ефективним інструментом визначення оптимальних керуючих параметрів, особливо у разі процесів, фізичні та хімічні закономірності яких достатньо вивчені. Тому важливим етапом математичного моделювання є створення математичної моделі, яка адекватно описувала аналізований процес. Зазвичай створюються математичні моделі окремих апаратів, які базуються на моделях процесів, що протікають у цих апаратах, а потім моделюються технологічні схеми, що пов'язують апарати в єдиний технологічний процес. Залежно від складності самого процесу та можливостей отримання експериментальної інформації про його проходження, при розробці математичних моделей використовується детермінований підхід, в основі якого лежать фундаментальні закони, або емпіричний, в основі якого лежить статистична обробка експериментальної інформації.

У тих випадках, коли інформації про аналізований процес недостатньо або він настільки складний, що неможливо скласти його детерміновану модель, а також є можливість його експериментального дослідження, вдаються до експериментально-статистичних методів [1].

Традиційним методом при складанні таких моделей є пасивний експеримент, відповідно до якого ставиться велика серія дослідів з почерговим варіюванням кожної зі змінних. До пасивного експерименту відноситься також збір вихідного статистичного матеріалу в режимі нормальної експлуатації на промисловому об'єкті. У цьому випадку обробка дослідних даних для одержання математичної моделі здійснюється методами класичного регресійного і кореляційного аналізу.

Експериментально-статистичні методи широко застосовуються для побудови математичних моделей

у хімічній промисловості. Зокрема на Новомосковському хімічному комбінаті для оцінки якості аміачної селітри в процесі грануляції був реалізований повний факторний експеримент [2], а застосування методу активного експерименту для отримання математичного опису виробництва карбаміду [3] дозволило отримати адекватну модель, що описує діюче виробництво. Для опису процесу нейтралізації у виробництві аміачної селітри на Северодонецькому виробничому об'єднанні «Азот» були запропоновані експериментально-статистичні моделі [4]. Водночас слід зазначити, що літературний пошук для моделювання процесу випарювання аміачної селітри не дав суттєвих результатів.

Метою роботи є побудова математичної моделі для технологічного процесу упарювання аміачної селітри на Северодонецькому виробничому об'єднанні «Азот». Процес упарювання розчину аміачної селітри є двостадійним на даному підприємстві. Випарна установка складається з двох плівкових випарних апаратів: випарного апарату з піднімаючою плівкою з сепаратором 2 і випарного апарату з падаючою плівкою 5, призначеного для доупарювання аміачної селітри до практично безводного плаву (рис. 1). Відмітною особливістю цих апаратів є упарювання розчинів в тонкій плівці (шарі), яка рухається зі швидкістю 25 м/сек уздовж внутрішньої поверхні трубок. У випарному апараті з сепаратором перша стадія упарювання здійснюється під вакуумом. У випарному апараті з падаючою плівкою процес доупарювання йде в дві стадії [5]. У середній кожухотрубній частині апарату відбувається упарювання розчину приблизно до 99 % аміачної селітри за рахунок поєднання процесів масо- і теплообміну. У нижній тарілчастій частині апарату на провальних тарілках шляхом масообміну з гарячим повітрям відбувається обезводнення плаву до 99,7-99,8 %.

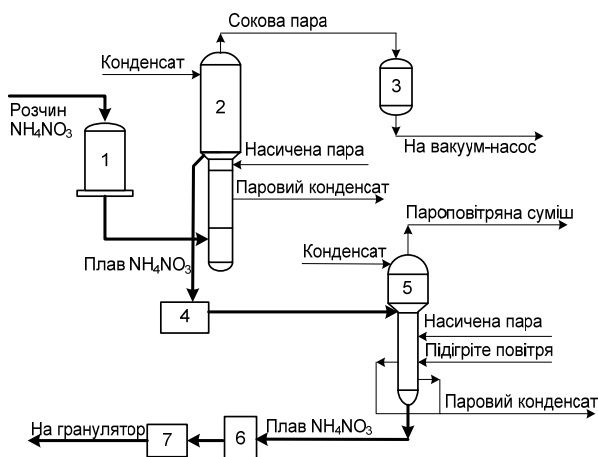


Рис. 1. Спрощена схема процесу випарювання аміачної селітри:

- 1 – напірний бак; 2 – випарний апарат с сепаратором;
3 – поверхневий конденсатор; 4 – гідрозатвір-
донейтралізатор; 5 – випарний апарат з падаючою
плівкою; 6 – нейтралізатор плаву; 7 – бак-фільтр

Аналіз випарної установки як об'єкта управління дозволив визначити вхідні і вихідні параметри, які характеризують особливості процесу випарювання у різних випарних апаратах [6].

Вихідними параметрами для випарного апарату першої стадії упарювання є: концентрація, витрата і температура свіжого розчину аміачної селітри; витрата і температура теплоносія (насиченої пари). Температура і концентрація свіжого розчину аміачної селітри, а також температура насиченої пари визначаються попередніми стадіями. Для аналізованої стадії вони є збуджуючими впливами. Змінні, за допомогою яких можна впливати на об'єкт з метою управління, становлять вектор регулюючих величин. У даному апараті це витрати свіжого розчину аміачної селітри та насиченої пари. Вихідними величинами є: концентрація упареного розчину аміачної селітри, температура упареного розчину аміачної селітри і тиск у апараті.

На стадії доупарювання вхідними параметрами є: концентрація і температура упареного розчину аміачної селітри; витрата і температура насиченої пари; витрата і температура гарячого повітря. Вихідними величинами є: концентрація і температура плаву аміачної селітри.

На підставі проведеного аналізу випарної установки, а також враховуючі конструктивні особливості апаратів, встановлена необхідність розробки моделей для кожного випарного апарату.

Для отримання експериментально-статистичних моделей був зібраний статистичний матеріал в режимі нормальної експлуатації на реальному промисловому об'єкті. У ході роботи аналізувалися результати 96 вимірювань за 16 параметрами.

На основі отриманих експериментальних даних ставилися наступні задачі:

1. Провести багатofакторний кореляційно-регресійний аналіз для отримання найкращих залежностей для оцінки вихідних величин для випарних апаратів.
2. Для параметрів, статистичний опис яких гарантує надану надійність, виконати однофакторний регресійний аналіз.

Для проведення моделювання було прийнято такі позначення:

— для вхідних змінних та параметрів стану моделі випарного апарату з сепаратором:

- X_1 – температура свіжого розчину аміачної селітри, °C,
 X_2 – температура насиченої пари, °C,
 X_3 – витрата насиченої пари, м³/год °C,
 X_4 – концентрація свіжого розчину аміачної селітри, %,
 X_5 – витрата свіжого розчину аміачної селітри, м³/год;

— для вихідних змінних моделі випарного апарату з сепаратором:

- Y_1 – концентрація упареної аміачної селітри на виході з випарного апарату, %,
 Y_2 – температура упареної аміачної селітри, °С,

Y_3 – тиск сокової пари на виході з випарного апарату, МПа;

– для вхідних змінних моделі випарного апарату з падаючою плівкою:

X_1 – температура упареної аміачної селітри, °С,

X_2 – концентрація упареної аміачної селітри, %,

X_3 – температура насиченої пари, °С,

X_4 – витрата насиченої пари, м³/год,

X_5 – температура гарячого повітря, °С,

X_6 – витрата гарячого повітря, м³/год;

– для вихідних змінних моделі випарного апарату з падаючою плівкою:

Y_1 – концентрація плаву аміачної селітри на виході з випарного апарату, %, Y_2 – температура плаву аміачної селітри, °С.

Надійність моделей та їх параметрів у більшості випадків приймається лише на рівні 95% (рівень значущості $\alpha=5\%$):

$$\mu = \frac{|r_{yx}| \sqrt{n-1}}{\sqrt{1-r_{yx}^2}},$$

де r_{yx} – парний коефіцієнт кореляції; n – кількість спостережень.

Фактори, для яких $\mu < 2$, не відповідають обраному рівню надійності і в подальшому регресійному аналізі не розглядаються.

Були прийняті наступні критерії адекватності моделей: R^2 – коефіцієнт детермінації, R – коефіцієнт кореляції, $\sigma_{ад}^2$ – дисперсія адекватності.

Виклад основного матеріалу дослідження. На першому етапі було отримано результати для обох випарних апаратів. Обробка даних проводилася за допомогою пакету Excel [7]. Необхідно було визначити фактори, що включаються в кожну модель. Для цього розраховувалися кореляційні матриці.

В результаті проведеного аналізу були вибрані фактори з показником надійності вище 2:

– для моделі випарного апарату з сепаратором: X_1 (температура свіжого розчину аміачної селітри), X_2 (температура насиченої пари), X_3 (витрата насиченої пари) для прогнозу значення Y (температури упареної аміачної селітри на виході з випарного апарату);

– для моделі випарного апарату з падаючою плівкою: X_1 (температура аміачної селітри на вході у випарний апарат) і X_5 (температура гарячого повітря) для Y (температури плаву аміачної селітри на виході з випарного апарату).

Окрім аналізу лінійної залежності розглянуті засновані на логарифмуванні і зворотному перетворенні шість можливих криволінійних залежностей, отриманих комбінацією з індивідуальних перетворень залежної змінної і незалежних змінних: степеневі, експоненціальна, гіперболічна модель I і II типу, логарифмічна і S – образна моделі. Перелічені моделі будувалися на першій половині набору експериментальних даних. Перевірка адекватності отриманих моделей і їх відносної похибки проводилася на другій половині вибірки.

Отримані моделі для випарного апарату з сепаратором приведені в таблиці 1.

В таблиці 2 приведені отримані моделі для випарного апарату з падаючою плівкою.

Таблиця 1

Моделі випарного апарату з сепаратором

Тип моделі	Модель
Лінійна	$Y = 0,19X_1 - 0,03X_2 + 45,3X_3 + 104,99$
Степенева	$Y = 101,07X_1^{0,15}X_2^{-0,04}X_3^{0,25}$
Експоненціальна	$Y = 114,82e^{0,001X_1 - 0,0002X_2 + 0,27X_3}$
Гіперболічна I	$Y = -\frac{3235,43}{X_1} - \frac{1423,02}{X_2} - \frac{36,52}{X_3} + 222,35$
Гіперболічна II	$Y = \frac{1}{-6,73 \cdot 10^{-6}X_1 + 1,05 \cdot 10^{-6}X_2 - 0,002X_3 + 0,01}$
S-образна	$Y = e^{\frac{19,41}{X_1} - \frac{8,33}{X_2} - \frac{0,22}{X_3} + 5,45}$
Логарифмічна	$Y = 24,64\ln(X_1) - 6,82\ln(X_2) + 40,78\ln(X_3) + 84,34$

Таблиця 2

Моделі випарного апарату з падаючою плівкою

Тип моделі	Модель
Лінійна	$Y = 0,23X_1 + 0,63X_2 + 25,63$
Степенева	$Y = 2,15X_1^{0,22}X_2^{0,64}$
Експоненціальна	$Y = 75,94e^{0,001X_1 + 0,004X_2}$
Гіперболічна I	$Y = -\frac{6447,08}{X_1} - \frac{20480,43}{X_2} + 331,5$
Гіперболічна II	$Y = \frac{1}{-7,34 \cdot 10^{-6}X_1 - 1,98 \cdot 10^{-5}X_2 + 0,01}$
S-образна	$Y = e^{\frac{36,04}{X_1} - \frac{114,5}{X_2} + 6,04}$
Логарифмічна	$Y = 38,92\ln(X_1) + 114,01\ln(X_2) - 612,13$

На другому етапі досліджень, виходячи з висновків, отриманих на попередньому етапі, були знайдені параметри, статистичний опис яких гарантує обрану надійність моделі. Для цих параметрів був виконаний однофакторний регресійний аналіз та отримані результати.

Результати однофакторного аналізу залежностей представлені у таблицях 3 і 4.

Таблиця 3

Результати однофакторного аналізу залежностей випарного апарату з сепаратором

Тип моделі	Показники адекватності і відносної похибки			
	R^2	R	$\sigma_{ад}^2$	$\varepsilon, \%$
Лінійна	0,9396	0,9693	1,263	0,55
Степенева	0,9427	0,9709	1,082	0,51
Експоненціальна	0,9397	0,9694	1,725	0,59
Гіперболічна I	0,9434	0,9712	1,072	0,48
Гіперболічна II	0,9398	0,9694	5,879	1,29
S-образна	0,9439	0,9715	1,049	0,48
Логарифмічна	0,9424	0,9715	1,069	0,51

Таблиця 4

**Результати однофакторного аналізу залежностей
випарного апарату з падаючою плівкою**

Тип моделі	Показники адекватності і відносної похибки			
	R ²	R	σ_{ad}^2	ε , %
Лінійна	0,7804	0,8834	0,173	0,19
Степенева	0,7803	0,8833	0,175	0,19
Експоненціальна	0,7807	0,8836	3,691	1,05
Гіперболічна I	0,7795	0,8829	0,169	0,19
Гіперболічна II	0,7809	0,8837	0,480	0,33
S-образна	0,7798	0,8831	0,171	0,19
Логарифмічна	0,7800	0,8832	0,171	0,19

Висновки. Процес випарювання є складним процесом і залежить від багатьох технологічних параметрів. Тому на основі отриманих експериментальних даних був проведений багатофакторний кореляційно-регресійний аналіз для отримання якнайкращих залежностей для оцінки вихідних величин випарних апаратів. Для параметрів, статистичний опис яких відповідав наданій надійності, був виконаний однофакторний регресійний аналіз.

За підсумками проведеного дослідження встановлено, що не всі вхідні параметри, що розглядаються, мають сильну кореляцію з вихідними параметрами, враховуючи обраний рівень надійності моделі. Отже, частина інформації, отриманої експериментально, виявилася недоступною для аналізу класичними статистичними методами.

В результаті дослідження залежності температури плаву аміачної селітри від вхідних параметрів можна зробити висновок, що моделі, відповідні випарним апаратам, різні за типом отриманих співвідношень і наявністю факторів, які впливають на вихідний параметр, що говорить про неможливість застосування єдиної моделі для різних апаратів.

За підсумками оцінки надійності і значущості отриманих моделей, можна зробити висновок: чим більше факторів, визнаних значущими, беруть участь в моделі, тим вище значущість критеріїв адекватності. Недостатньо значущі показники для оцінки адекватності моделей можуть бути пояснені наявністю в досліджуваному процесі неврахованих факторів і випадкових збурень, які не увійшли до рівня регресії.

Значущість коефіцієнтів детермінації і кореляції практично однакова і свідчить про достатньо сильний зв'язок параметрів моделі і адекватності моделі.

В результаті порівняння критеріїв адекватності моделей на різних етапах дослідження були вибрані моделі з найбільш високими показниками критеріїв адекватності.

Для випарного апарату з сепаратором:

– для залежності температури плаву аміачної селітри на виході з випарного апарату з сепаратором від температури початкового розчину аміачної селітри (X_1), температури насиченої пари (X_2), витрати насиченої пари (X_3), отримана S-образна модель:

$$y = \exp\left(\sum_{i=1}^3 \frac{k_i}{Z_i} + 5,45\right),$$

де $Z_1=X_1$, $Z_2=X_2$, $Z_3=X_3$, $k_1=-19,41$, $k_2=8,33$, $k_3=-0,22$.

Для другого випарного апарату з падаючою плівкою:

– для залежності температури плаву аміачної селітри на виході з випарного апарату з падаючою плівкою від температура аміачної селітри на його вході (X_1) і температурах гарячого повітря (X_5) отримана гіперболічна модель II типу:

$$y = \frac{10^5}{\sum_{i=1}^2 k_i Z_i + 1040},$$

де $Z_1=X_1$, $Z_2=X_5$, $k_1=-73,41$, $k_2=-1,98$.

При перевірці адекватності отриманих моделей на інших експериментально-статистичних даних, для всіх залежностей відносна похибка результатів не перевищила 1,3%, що підтверджує значущість одержаних моделей та можливість їх застосування для прогнозування керування.

Необхідно відзначити, що отриманий експериментально-статистичними методами математичний опис об'єкта неможливо застосувати до інших однотипних об'єктів. Тому в процесі управління модель, на основі якої забезпечується оптимальне керування об'єктом, необхідно будувати або уточнювати для кожного апарату з використанням як статистичних даних, так і іншої інформації. Особливо це стосується таких складних апаратів, як випарний апарат стадії доупарювання у виробництві аміачної селітри, який конструктивно є комбінованим апаратом і в якому поєднані процеси масо- і теплообміну.

Виходячи з цього, потрібно підібрати такий тип моделі об'єкта, який дозволив би враховувати неконтрольовані збурення, інтервальний характер завдання багатьох параметрів та інформацію про особливості процесу упарювання в конкретному випарному апараті. Прикладом таких моделей можуть бути комбіновані моделі з елементами нечіткої логіки.

Л і т е р а т у р а

1. Кафаров В.В. Методы кибернетики в химии и химической технологии / В.В. Кафаров. – М.: Химия, 1985. – 448 с.
2. Вольберг А.А. Планирование промышленного эксперимента в цехе аммиачной селитры / А.А. Вольберг, С.Г. Широков, Ю.П. Адлер // Химическая промышленность. – 1986. – С. 33–40.
3. Кондратьев В.В. Применение метода активного эксперимента для получения математического описания производства карбамида / В.В. Кондратьев, Р.Я. Шебапольская // Азотная промышленность, 1983. – №3. – С. 65–72.
4. Поркуян О.В. Экспериментально-статистические модели нейтрализации в производстве аммиачной селитры / О.В. Поркуян, Е.И. Проказа // Науковий збірник

«Вісник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». – 2010. – №2 (6). – С. 99–104.

5. Иванов М.Е. Производство аммиачной селитры в агрегатах большой единичной мощности / М.Е. Иванов, В.М. Олевский, Н.Н. Поляков. – М.: Химия, 1990. – 228 с.
6. Стенцель Й.І. Математичне моделювання технологічних об'єктів керування / Й.І. Стенцель. – К.: ІСДО. 1993. – 328 с.
7. Кильдишов В. Д. Использование приложения MS Excel для моделирования различных задач: Практическое руководство / В.Д. Кильдишов. – М.: СОЛОН-Пр., 2015. – 156 с.

References

1. Kafarov V.V. Metody kibernetiki v khimii i khimicheskoy tekhnologii / V.V. Kafarov. – M.: Khimiya, 1985. – 448 s.
2. Vol'berg A.A. Planirovaniye promyshlennogo eksperimenta v tsekh ammiachnoy selitry / A.A. Vol'berg, S.G. Shirokov, YU.P. Adler // Khimicheskaya promyshlennost'. – 1986. – S. 33–40.
3. Kondrat'yev V.V. Primeneniye metoda aktivnogo eksperimenta dlya polucheniya matematicheskogo opisaniya proizvodstva karbamida / V.V. Kondrat'yev, R.YA. Shebakpol'skaya // Azotnaya promyshlennost', 1983. – №3. – S. 65–72.
4. Porkuyan O.V. Eksperimental'no-statisticheskiye modeli neytralizatsii v proizvodstve ammiachnoy selitry / O.V. Porkuyan, Ye.I. Prokaza // Naukoviy zбірnik «Vіsник natsіonal'nogo tekhnіchnogo unіversitetu Ukraїni «Kіївskiy polіtekhnіchniy instіtut». – 2010. – №2 (6). – S. 99–104.
5. Ivanov M.Ye. Proizvodstvo ammiachnoy selitry v agregatakh bol'shoy yedinichnoy moshchnosti / M.Ye. Ivanov, V.M. Olevskiy, N.N. Polyakov. – M.: Khimiya, 1990. – 228 s.
6. Stentsel' Y.І. Matematichne modelyuvannya tekhnologіchnikh ob'єktiv keruvannya / Y.І. Stentsel'. – K.: ІСДО. 1993. – 328 s.
7. Kil'dishov V. D. Ispol'zovaniye prilozheniya MS Excel dlya modelirovaniya razlichnykh zadach: Prakticheskoye rukovodstvo / V.D. Kil'dishov. – M.: SOLON-Pr., 2015. – 156 s.

Prokaza O.I., Kuznetsova O.V. Construction of mathematical models of evaporation plant by experimental-statistical method

In the process of research, it is necessary to have a mathematical description of the technological processes that take place in individual evaporators to solve the problems of optimal control of the evaporation process in the production of ammonium nitrate. The ultimate goal of the study is to obtain an adequate mathematical model of the evaporation process and find the optimal technological regime.

An evaporator was investigated, which includes an evaporator with a separator for evaporating a fresh solution of ammonium nitrate and a afterevaporator with a falling membrane. Analysis of the evaporator as a control object allowed to determine the input and output parameters that characterize the features of the evaporation process in different evaporators. Based on the analysis, the need to develop models for each evaporator is established.

Statistical material was collected from a real control object to obtain experimental and statistical models of the evaporator. Data processing was performed by methods of correlation and regression analysis.

Based on the obtained experimental data, a multifactor correlation-regression analysis was performed to obtain the best possible dependences for estimating the output values of evaporators. For parameters whose statistical description guarantees a given reliability, one-factor regression analysis was performed.

In addition to linear models, exponential, hyperbolic, and logarithmic models were analyzed.

According to the results of the study, it was found that not all of these input parameters have a strong correlation with the output parameters, considering the chosen level of reliability of the model. Thus, some of the information obtained experimentally was not available for analysis by classical statistical methods.

As a result of comparison of criteria of model's adequacy at different stages of research, models with high indicators are received. When checking the adequacy of the obtained models for all dependencies, the relative error of the results did not exceed 2%, which confirms the importance of the obtained models and the possibility of their application for forecasting management.

Keywords: mathematical model, evaporation plant, ammonium nitrate, adequacy criteria.

Проказа Олена Іванівна – к.т.н., доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих систем управління Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, e-mail: prokaza@snu.edu.ua.

Кузнєцова Олена Володимирівна – старший викладач кафедри комп'ютерно-інтегрованих систем управління Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, e-mail: kuznecova@snu.edu.ua.