

УДК 504.4.054.064

І.Коноваленко, канд. техн. наук; О.Буняк, канд. техн. Наук

Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя

ОЦІНКА ТОЧНОСТІ ПРОГНОЗУВАННЯ ПРОЦЕСУ ВІДСТОЮВАННЯ МЕТОДОМ МОДЕЛЮВАННЯ ЗА ШВИДКІСТЮ ЗМІНИ ПРОЗОРОСТІ

Описано спосіб оцінки інтервалу, у якому можуть знаходитися значення швидкості зміни прозорості, отримані за допомогою розробленої системи для прогнозування процесу відстоювання. Для цього застосовано статистичний метод аналізу даних, використаних для побудови прогнозуючої моделі. Він враховує невизначеність, пов'язану з обмеженою кількістю спостережень та відповідною неточністю знайдених оцінок параметрів кривої швидкості. При цьому припускається, що відхилення дійсних значень швидкості від аналогічних прогнозованих розподілені за нормальним законом. Запропонований спосіб призначений для оцінки точності прогнозування протягом активної фази процесу відстоювання.

1. Прогнозування процесу відстоювання та оцінка його точності

У багатьох технологічних процесах харчової, хімічної та переробної промисловостей важливе місце займає процес відстоювання, ефективного проведення якого прямо впливає на стан кінцевого продукту чи напівпродукту. Цей процес проводиться або пасивно, шляхом відстоювання, або активно, коли добавляють реагенти, які активізують очистку, з подальшим використанням фільтрації. Проте в обох випадках одним із найважливіших параметрів, по якому оцінюють якість очистки, є мутність (або обернена до неї величина – оптична прозорість) напівпродуктів.

Однак цей параметр не враховує динамічні особливості процесу відстоювання, тому неможливо передбачити поведінку напівпродукту в часі. Як наслідок – неможливо прогнозувати кінетику процесу і тим більше його оптимізувати. Це, в свою чергу, приводить до підвищення часових та енергетичних витрат у технологічному процесі.

Як свідчать експериментальні дослідження, кожен етап процесу відстоювання рідини характеризується властивою лише йому залежністю швидкості зміни прозорості [1,2], що дозволяє використовувати цей параметр для прогнозування вказаного процесу. При цьому прогнозуюча система повинна забезпечувати видачу інформації про імовірний момент закінчення процесу відстоювання та довірчий інтервал, у якому він знаходиться з певною довірчою імовірністю.

Аналіз експериментів, виконаних за допомогою розробленої системи, показує, що процес відстоювання можна розбити на чотири етапи [1,2]. Перший з них характеризується дуже низькою швидкістю, що відповідає повністю невідстоюній рідині. Протягом другого етапу швидкість різко зростає, на третьому – так само швидко спадає. Ці два етапи відповідають процесу освітлення рідини на даному рівні посудини. Четвертий етап, як і перший, характеризується низькою швидкістю, що відповідає вже відстоюній рідині. Специфіку зміни значення швидкості на різних етапах процесу відстоювання можна використати для визначення стадії, на якій знаходиться процес, прогнозування ходу цього процесу та фіксації моменту його закінчення.

Алгоритм для прогнозування процесу відстоювання та відповідне математичне забезпечення розглянуто у роботі [3]. Даний алгоритм включає наступні стадії:

1. Отримання початкової інформації про процес відстоювання.
2. Фільтрування вхідного потоку даних з метою видалення з основного сигналу випадкової шумової складової.
3. Усереднення пакетів даних.
4. Аналіз отриманої множини даних на можливість здійснення прогнозу.
5. У випадку можливості прогнозу побудова прогнозуючої моделі, в іншому випадку – очікування на наступний пакет даних, їх ввід та перехід до п.2.
6. Розрахунок за отриманою моделлю подальшого ходу процесу відстоювання, видавання інформації про момент закінчення відстоювання;
7. Оцінка точності прогнозуючої моделі.

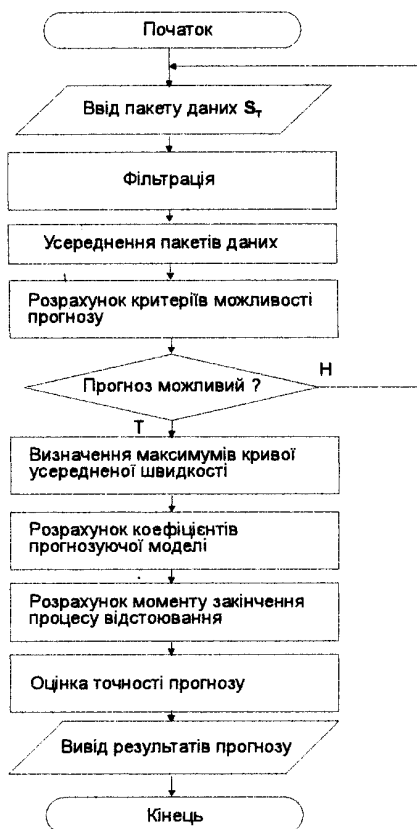


Рис. 1. Блок-схема алгоритму прогнозування.

Блок-схема алгоритму показана на рис. 1.

Вхідні дані для системи прогнозування представляють собою матрицю S_T :

$$S_T = \begin{bmatrix} t_1 & S_1 \\ t_2 & S_2 \\ \dots & \dots \\ t_N & S_N \end{bmatrix}, \quad (1)$$

де t_i - час;

S_i - швидкість зміни прозорості (далі- швидкість) у момент часу t_i , $i=1,N$;

N - кількість значень швидкості у серії даних.

Після фільтрування вхідних даних (1) та виділення головних гармонік [3] для зменшення обсягу оброблюваних даних над вихідним сигналом фільтра виконується операція усереднення за пакетами даних. Усереднення здійснюється методом ковзаючих середніх [3]. У результаті цього отримується матриця S_{TC} :

$$S_{TC} = \begin{bmatrix} t_{C1} & S_{TC1} \\ t_{C2} & S_{TC2} \\ \dots & \dots \\ t_{CK} & S_{TCk} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

де t_{Cj} - середнє значення часу за пакет;

S_{TCj} - середнє значення швидкості за пакет;

K - кількість пакетів даних.

Таке усереднення дозволяє згладити періодичні та випадкові коливання і виявити тенденцію у розвитку процесу відстоювання в часі.

У ролі прогнозуючої моделі (тренду) нами використано криву [3]:

$$S_{TM}(S_{max}, t_{max}, v, t) = S_{max} e^{-\frac{(t-t_{max})^2}{v}}, \quad (3)$$

де S_{max} , t_{max} , v - коефіцієнти кривої.

При цьому коефіцієнт S_{max} характеризує максимальне значення швидкості, а коефіцієнт t_{max} - момент часу, коли воно спостерігалось. Крутизна графіка швидкості характеризується значенням коефіцієнта v , який визначає швидкість спадання графіка.

На рис. 2 подано графік середньої швидкості та криву, отриману за допомогою прогнозуючої моделі, для одного з напівпродуктів цукрової промисловості.

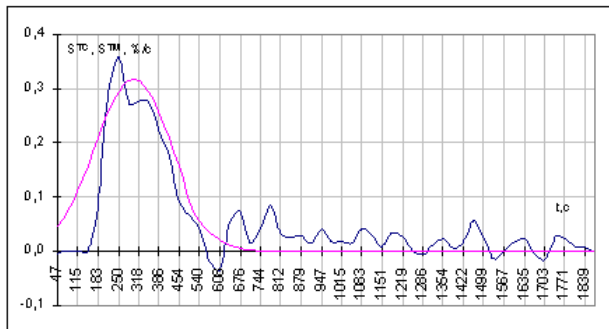


Рис.2. Часові залежності середньої швидкості та швидкості, отриманої за допомогою прогнозуючої моделі S_{TM} для рідини з концентрацією сухих речовин 67 г/л, при $t=23\text{ }^{\circ}\text{C}$.

2. Оцінка точності прогнозування процесу відстоювання

Питання про точність виробленої прогнозуючої моделі має дві складових: оцінку точності кривої тренду та оцінку точності прогнозування моменту закінчення процесу відстоювання. Як свідчать експериментальні дані, найбільші відхилення реальної кривої від прогнозуючої моделі (3) властиві початковому моменту процесу відстоювання (рис. 3). Проте, оскільки прогноз виконується для того часового інтервалу, коли активна фаза процесу минула, то значні початкові відхилення моделі мало впливають на точність визначення моменту кінця відстоювання.

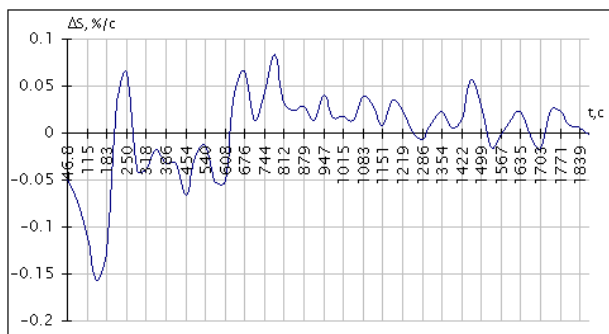


Рис 3. Зміна в часі абсолютного відхилення прогнозуючої кривої від реальних даних для рідини з концентрацією сухих речовин 67 г/л, при $t=23\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Для розглянутого випадку середнє відхилення прогнозуючої кривої від реальних даних становить $\Delta S = -0.0004\%/c$ протягом всього дослідження, або $\Delta S_A = -0.04\%/c$ протягом активної фази процесу відстоювання. Середньоквадратичне відхилення для цих же множин даних становить відповідно $\sigma = 0.04$ та $\sigma_A = 0.06$.

Значення розглянутих відхилень сильно залежать від таких параметрів, як концентрація завислих твердих частинок, температура, в'язкість та густина розчину. Для напівпродуктів цукрової промисловості суттєво важлива також концентрація цукру в рідині. Зокрема, при збільшенні концентрації твердих часток від 67 г/л до 133 г/л внаслідок зменшення флуктуацій значень швидкості зміни прозорості абсолютна похибка прогнозуючої моделі зменшується приблизно вдвічі і становить $\Delta S = -0.0003\%/c$

протягом всього досліджу, та $\Delta S_A = -0.02\%/c$ протягом активної фази процесу відстоювання. Збільшення температури приводить до збільшення відмінності між моделлю та реальними даними. Вказані залежності можна пояснити тим, що із збільшенням концентрації твердих частинок посилюється взаємодія між ними, внаслідок чого вони починають поводитися як суцільна в'язка маса, вміщена у рідке середовище [4]. А підвищення температури приводить до посилення хаотичного броунівського руху твердих часток через більш інтенсивне перемішування рідини, внаслідок чого збільшується рівень відмінностей реальних значень швидкості зміни прозорості щодо значень швидкості, отриманих за прогнозуючою моделлю.

Діаграму розподілу абсолютних похибок прогнозуючої кривої для розглядуваної рідини подано на рис. 4. Для перевірки гіпотези про розподіл похибок за нормальним законом ми використали χ^2 -тест [5]. Встановлено, що з імовірністю 80% для всіх досліджених рідин (із вмістом твердих частинок від 17 до 167 г/л) похибки розподілені за нормальним законом. Найбільш точно (з імовірністю понад 90%) дана гіпотеза підтверджується для рідин з високим вмістом твердих часток (понад 133 г/л).

Для оцінки інтервалу, у якому можуть перебувати значення швидкості, ми застосували метод, який базується на статистичному аналізі даних, використаних для побудови прогнозуючої моделі [6]. Цей метод враховує невизначеність, пов'язану з обмеженістю кількості спостережень та відповідною неточністю знайдених оцінок параметрів кривої швидкості. При цьому припускається, що відхилення реальних значень швидкості від прогнозуючої моделі розподілені за нормальним законом. (Аналіз експериментальних даних виявив, що з достовірністю 80% закон розподілу вказаних відхилень є нормальним).

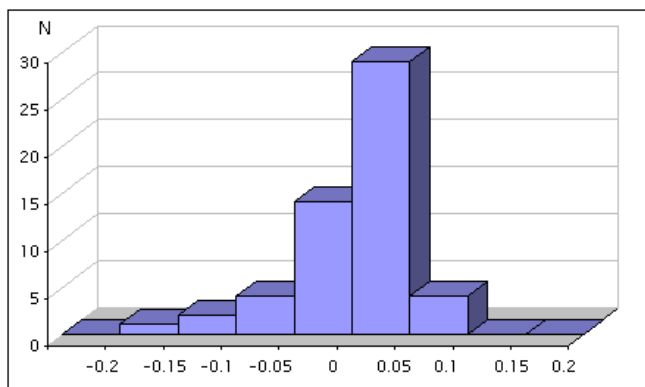


Рис. 4. Діаграма розподілу відхилень прогнозуючої моделі від експериментально отриманих даних для рідини з концентрацією сухих речовин 67 г/л, при $t=23^\circ\text{C}$.

За цим методом крива тренду приводиться до параболічного виду шляхом логарифмування рівняння (3):

$$\lg S_{TM}(S_{\max}, t_{\max}, v, t) = \lg S_{\max} - \alpha t^2 + 2\alpha t_{\max} t - \alpha t_{\max}^2, \quad (4)$$

де $\alpha = \frac{\lg e}{K_v v}$ – коефіцієнт перетворення.

Для виразу (4) можна знайти середні квадратичні похибки оцінок коефіцієнтів $S_{\max}$, $t_{\max}$, v та значень S_{TM} . Через них можна визначити і середню квадратичну похибку прогнозуючої кривої.

В результаті операції логарифмування над кожним з елементів матриці (2) вона перетвориться до виду:

$$S_{TCLg} = \begin{vmatrix} t_{C1} & S_{CLg1} \\ t_{C2} & S_{CLg2} \\ \dots & \dots \\ t_{CK} & S_{CLgK} \end{vmatrix}. \quad (5)$$

Внаслідок проведення операції логарифмування (4) при заданих значеннях коефіцієнтів $S_{\max}$, $t_{\max}$, v для кожного моменту t_{Ci} отримується матриця

$$S_{TMLg} = \begin{bmatrix} t_{C1} & S_{MLg1} \\ t_{C2} & S_{MLg2} \\ \dots & \dots \\ t_{CK-L} & S_{MLgK-L} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

де L - певний період випередження прогнозу.

Для визначення довірчого інтервалу швидкості слід обчислити середньоквадратичне відхилення значень швидкості від моделі:

$$S_s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^K (S_{CLgi} - S_{MLgi})^2}{f}}, \quad (7)$$

де $f=K-m$ – кількість ступенів вільності;

K - кількість спостережень (кількість отриманих пакетів даних);

m - кількість оцінюваних параметрів.

Оскільки рівняння (4) містить три оцінюваних коефіцієнти, то кількість ступенів вільності при розрахунку квадратичного відхилення становить $f=K-3$.

Довірчий інтервал у цьому випадку визначається так:

$$\text{ant lg}(S_{ML} - S_s K_1^*) \dots \text{ant lg}(S_{ML} + S_s K_2^*), \quad (8)$$

де S_{ML} – значення матриці S_{TMLg} для періоду випередження L ;

K_1^*, K_2^* – коефіцієнти, що залежить від кількості даних, на основі яких виконується прогноз, періоду випередження та довірчої ймовірності.

Період випередження є величиною, кратною до кроку квантування по часу:

$$L = \frac{t_L - t_{CK}}{t_0}, \quad (9)$$

де t_L – момент часу, який відповідає періоду випередження L .

$t_0=t_{Ci}-t_{Ci-1}$ – крок квантування.

На рис. 5 подано графіки середньої швидкості, моделі прогнозу та відхилень прогнозу, обчислених за запропонованою методикою при коефіцієнтах $K_1^* = 0.05, K_2^* = 0.03$ для рідини із вмістом СР 67 г/л при $t=23$ °С. Криві максимального та мінімального допустимого значень показані для проміжку часу від моменту здійснення прогнозу до закінчення відстоювання.

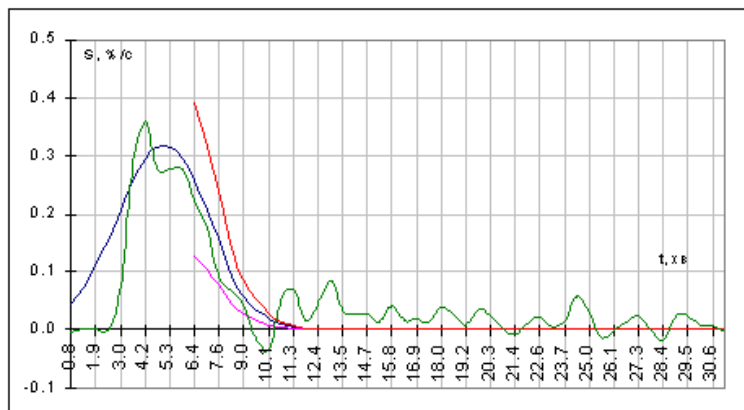


Рис. 5. Довірчий інтервал прогнозуючої моделі для активної фази процесу відстоювання.

Вироблена прогноуюча модель призначена для моделювання активної фази процесу відстоювання, тому вона не видає інформації про стохастичні зміни швидкості, які відбуваються після закінчення активної фази.

Для оцінки похибки відхилень розрахункового часу відстоювання на основі експериментальних даних нами проведено статистичний аналіз вказаних похибок для 80 досліджених рідин. Отримані значення похибок при визначенні часу відстоювання за запропонованим алгоритмом для ряду рідин подано в таблиці.

Таблиця

Похибки визначення моменту закінчення відстоювання

Параметри розчину		Похибка визначення δ_p , %
Концентрація СР, г/л	Температура, °С	
17	21	17,78
17	34	11,37
17	52	6,92
33	23	0,00
33	32	4,10
33	52	17,11
67	23	5,58
67	30	12,49
67	52	9,78
100	31	22,19
100	52	18,31
100	65	12,21
133	23	3,00
133	32	3,29
133	47	5,16
133	58	7,47

Прийнявши припущення про нормальний закон розподілу отриманих відносних похибок (з достовірністю 85%), виявлено, що з довірчою ймовірністю 90% похибка визначення часу відстоювання не перевищує 20% від загального часу відстоювання. Середнє значення відносної похибки при визначенні моменту закінчення відстоювання t_{end} становить 11.2% від загального часу відстоювання.

In the article described way of evaluation of interval, in which can inhere values of velocity of changing a transparency, received with using of developed system for forecasting the settling process. For this applying statistical method of analysis of data, used for the building forecasting models. It consider an uncertainty into account of the amount of observing and corresponding inexactness of found evaluations of velocity. Is it herewith assumed, deflections of real values of velocity from corresponding forecasted portioned for the normal law. Offered way is intended for the evaluation of accuracy of forecasting during the active phase of the settling process.

Література

1. А.Буняк, І.Коноваленко. Відповідає технічним вимогам: Розроблено прилад для вимірювання швидкості відстоювання напівпродуктів.// Харчова та переробна промисловість.- 1997.-№5.-С.22-23.
2. Коноваленко І.В. Дослідження експериментальних характеристик процесу відстоювання та їх математична обробка // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы.- 1999. - №1. - С.48-53.
3. І.Коноваленко, О.Буняк. Алгоритмічне та математичне забезпечення для прогнозування процесу відстоювання рідини. // Вісник Тернопільського державного технічного університету.- 2001.- Том 6, №1.- С. 115-124.
4. Механика неоднородных и турбулентных потоков. Сборник научных трудов АН СССР. Москва, "Наука", 1989.- 248 с.
5. Обробка сигналів. / В.П.Бабак, В.С.Хандецький, Е.Шрюфер.- К.: Либідь, 1996.-392 с.
6. Кендалл М.Дж., Стьюарт А. Статистические выводы и связи.- М.: Мир, 1976.- 899 с.