

DEVELOPING A SIMULATION MODEL OF A WORT KETTLE WITH AN EXTERNAL HEATER

M. Parovenko, Y. Smitiukh

National University of Food Technologies

Key words:

*Industrial control system
Simulation modeling
Wort boiling
Wort kettle with external
heat exchanger*

Article history:

Received 11.01.2024
Received in revised form
25.01.2024
Accepted 02.02.2024

Corresponding author:

M. Parovenko
E-mail:
cavyheavy@gmail.com

Citation: Паровенко М. Д.,
Смітюх Я. В. (2023). Роз-
роблення імітаційної мо-
делі сушварильного апа-
рата із зовнішнім нагріва-
чем. *Наукові праці НУХТ*,
30(1), 17—29.
DOI: 10.24263/2225-2924-
2024-30-1-5

ABSTRACT

A study is aimed at developing a comprehensive simulation model of a wort kettle with an external heater. Developed with practicality, this model is aimed at seamless integration into the control system, offering tools for fine-tuning the wort boiling process control program and selecting optimal control algorithms without direct reliance on the physical entity. The simulation model, designed primarily to ease the control system development process, goes beyond its direct intended use. It is anticipated that the model can be effortlessly integrated into decision-support systems and employed in predictive analysis. Moreover, in the era of data-driven modeling, the potential of this simulation model to generate data stands as a valuable resource. Such data might be paramount for training predictive models, bridging the gap between traditional practices and modern data-centric approaches.

In this study, an automation scheme for a wort kettle with an external heater was developed, which highlights potential control strategies. The scheme describes the technological process in terms of process parameters and actuators and is used for identification of equipment units and process variables for simulation modeling.

The implementation of the simulation model of a wort kettle with an external heater based on material balances, its structure, core principles, and potential applications is considered. In future research a roadmap for the multifaceted application of the study's outcomes will be intended. The main results of the study are conventionally divided into the following sections: a general description of the modeling object, a brief overview of the control system, identification of equipment units and process variables for modeling, the development of mathematical models, and structural diagram of the comprehensive simulation model.

РОЗРОБЛЕННЯ ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ СУСЛОВАРИЛЬНОГО АПАРАТА ІЗ ЗОВНІШНІМ НАГРІВАЧЕМ

М. Д. Паровенко. Я. В. Смітюх

Національний університет харчових технологій

Стаття присвячена висвітленню результатів дослідження, яке спрямоване на розроблення комплексної імітаційної моделі сусловарильного апарата із зовнішнім нагрівачем. Розроблена з урахуванням практичності, ця модель має на меті плавну інтеграцію в систему керування, пропонуючи засоби для відлагодження програми керування процесом кип'ятіння суслу та вибору оптимальних алгоритмів керування до впровадження системи на фізичному об'єкті. Імітаційна модель, призначена передусім для полегшення процесу розроблення системи керування, виходить за рамки свого безпосереднього призначення. Очікується, що модель можна буде легко інтегрувати в систему підтримки прийняття рішень і використовувати в прогностичному аналізі. Крім того, в епоху моделювання потенціал цієї імітаційної моделі генерувати дані є цінним ресурсом. Такі дані можуть мати першочергове значення при навчанні прогностичних моделей, долаючи таким чином розрив між традиційними практиками та сучасними підходами.

У ході дослідження розроблено схему автоматизації сусловарильного апарата із зовнішнім нагрівачем, яка висвітлює потенційні стратегії керування. Схема описує технологічний процес з точки зору вимірювальних параметрів і виконавчих механізмів для регулювання цих параметрів та використовується з метою виділення апаратів і змінних процесу для імітаційного моделювання.

Також детально розглянуто реалізацію імітаційної моделі сусловарильного апарата із зовнішнім нагрівачем на основі матеріальних балансів, її структуру, основні принципи та перспективні застосування. Автори прагнуть намітити дорожню карту для багатогранного застосування результатів роботи в майбутніх дослідженнях. Викладення основних результатів дослідження умовно поділено на такі розділи: загальний опис об'єкта моделювання, короткий опис системи керування, виділення апаратів і змінних процесу для моделювання, розроблення математичних моделей, структурна схема комплексної імітаційної моделі.

Ключові слова: АСКТП, імітаційне моделювання, технологічний процес кип'ятіння суслу, сусловарильний апарат із зовнішнім нагрівачем.

Постановка проблеми. Пивоварна галузь в Україні розвивається у відповідь на різні фактори, такі як кастомізація продуктів, економічні зрушення, нормативні зміни та розвиток технологій. Технологічний процес кип'ятіння суслу є важливим етапом у пивоварінні, який впливає не лише на кінцеву якість пива, але й на ефективність та енергоспоживання процесу пивоваріння. Незважаючи на те, що сусловарильний апарат із зовнішнім нагрівачем має низку переваг, розроблення ефективних стратегій керування та розуміння динаміки технологічного процесу кип'ятіння суслу вимагає складних інструментів аналізу, тестування, оптимізації

та прогнозування.

Останніми роками імітаційні моделі стали незамінними інструментами для різних застосувань, починаючи від розроблення систем автоматизації та закінчуючи допомогою в процесах прийняття рішень. Вони надають механізми для проникнення в складну динаміку системи без значних ризиків і витрат, пов'язаних з експериментами в реальному часі. Зважаючи на потенціал моделювання в галузі пивоваріння, це дослідження спрямоване на розроблення комплексної імітаційної моделі сушловарильного апарата із зовнішнім нагрівачем. Проблематика дослідження випливає з аргументів щодо важливості такої моделі:

- складність процесу пивоваріння: кип'ятіння суслу — багатогранний процес, що включає різні фізико-хімічні реакції. Вловити ці складнощі в режимі реального часу може бути непросто, тому моделювання стає цінним інструментом для розуміння й оптимізації процесу;
- економічна ефективність: проведення кількох реальних експериментів для оптимізації процесу кип'ятіння суслу може виявитися дорогим з точки зору використаних ресурсів — інгредієнтів, енергії та часу. Імітаційна модель дає змогу проводити численні віртуальні експерименти за рахунок використання мінімальної кількості ресурсів;
- безпека та якість: неправильне керування сушловарильним апаратом може спричинити загрозу безпеці або погіршення якості пива. Моделювання може допомогти виявити потенційні ризики та забезпечити постійну відповідність процесу кип'ятіння суслу стандартам якості;
- проблеми масштабованості: у міру того, як пивоварні заводи розширюють або змінюють свою діяльність, вони можуть зіткнутися з проблемами масштабування своїх процесів. Моделювання може допомогти спрогнозувати, як зміни масштабу можуть вплинути на кип'ятіння суслу;
- інтеграція із системами автоматизації: імітаційна модель сушловарильного апарата може допомогти у розробленні, тестуванні й оптимізації алгоритмів керування до їх впровадження в реальну систему;
- підтримка прийняття рішень: добре розроблене моделювання може бути інструментом підтримки прийняття рішень, надаючи уявлення про те, як різні змінні можуть вплинути на результат;
- генерація даних для подальших досліджень: імітаційна модель може генерувати набори даних, які можна використовувати в інших галузях досліджень, таких як прогнозне моделювання без необхідності проведення великих реальних випробувань.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У ході аналізу проблематики, описаної вище, було досліджено значну кількість літератури, яку можна розподілити на кілька категорій (технологічний процес сушловаріння, розроблення автоматизованої системи керування (оптимізація керування), моделювання).

Проблематика дослідження вимагає детального вивчення технологічного процесу сушловаріння. На сьогодні існує велика кількість джерел, у яких комплексно розглядають процеси пивоваріння (Stewart et al., 2017; Eßlinger, 2009, Mosher, & Trantham, 2017; Bamforth, 2016; Hough et al., 2001; Kunze, 2004; Fix, 1999; Narziß

et al., 2017). Вирішення класичних проблем керування технологічними процесами, які є складовими процесу сушловаріння, запропоновано в (Armando, 1997; Seborg, 2019; Stewart et al., 2017). З метою дослідження практик математичного моделювання виробничих процесів, особливо теплообмінників і роботи насосів, було проаналізовано джерела: (Stewart, & Lewis, 2012; Shah & Sekulić, 2003; Hancock, 2014; Fijewski et al., 2019). Принципи моделювання описані в (Thomas, 1999). Деякі підходи щодо моделювання було запозичено з (Pogo et al., 2021), де описано моделювання процесу сушловаріння.

Метою дослідження є розроблення імітаційної моделі сушловарильного апарата із зовнішнім нагрівачем задля її подальшого впровадження в автоматизовану систему керування технологічним процесом кип'ятіння сусла.

Матеріали і методи. Розроблення спрощеної схеми автоматизації об'єкта вимагало застосування класичних підходів автоматизації, що передбачає детальний аналіз процесу, виділення апаратів та змінних процесу для моделювання.

Розроблення математичних моделей на основі матеріальних балансів і розв'язування диференціальних рівнянь методом Ейлера з метою впровадження моделей у програмному забезпеченні для програмованого логічного контролера в ході майбутніх досліджень вимагало застосування чисельних методів. Для означення сталих параметрів імітаційної моделі необхідно було звернутися до теорії теплообміну і чисельних методів.

Викладення основних результатів дослідження. Об'єктом дослідження є сушловарильний апарат із зовнішнім нагрівачем, який забезпечує виконання важливого етапу виробництва пива — кип'ятіння сусла. Отримане в процесі фільтрування сусло кип'ятять протягом 1—2 год з додаванням хмелю. При кип'ятінні сусла до нього переходять гіркі та ароматичні речовини хмелю, одночасно коагулюють білки. Кінцевим продуктом після стадії кип'ятіння є гаряче охмелене сусло (Kunze, 2004).

Відфільтроване сусло температурою 95—97 °C подається у сушловарильний апарат. Коли сусло в апараті досягає заданого рівня (рецептурний параметр, приблизно 15%), розпочинається циркуляція сусла через зовнішній нагрівач, кожухотрубний теплообмінник, який забезпечує нагрівання сусла сухою насиченою парою тиском 3 бари. При цьому сусло постійно відбирається з нижньої частини сушловарильного апарата і перекачується насосом через зовнішній нагрівач. Сусло циркулює 7—8 разів на годину.

У результаті сусло кип'ятять 50—60 хв при температурі 103—106 °C. Ступінь випаровування при кип'ятінні з використанням низького надлишкового тиску становить близько 6%. Необхідний для підвищеної температури кипіння надлишковий тиск (0,1—0,3 бара) досягається за допомогою:

- клапана для скидання тиску, що встановлюється перед впуском сусла в сушловарильний апарат;
- підвищення кількості обертів насоса.

Різниця між температурою пари й температурою сусла не повинна перевищувати при цьому 10 градусів.

Процес кип'ятіння сусла триває, як правило, 50—60 хв і при «класичному» кип'ятінні з низьким надлишковим тиском передбачає такі етапи:

- нагрівання до 100 °С приблизно за 15 хв;
- попереднє кип'ятіння при 100 °С близько 10 хв;
- нагрівання до 102—104 °С за 10—15 хв;
- кип'ятіння під тиском при 102—104 °С близько 15—30 хв;
- скидання тиску та зниження температури до 100 °С приблизно за 15 хв;
- подальше кип'ятіння при 100 °С близько 10 хв (Kunze, 2004)

На певному етапі додають хміль (коли додавати — рецептурний параметр). Хміль можуть додавати більше, ніж один раз. Це залежить від рецептури, тому варіації повинні бути передбачені системою керування. Передбачається ручне додавання хмелю, відкриваючи кришку сусловарильного апарата. Після завершення кип'ятіння (по часу — рецептурний параметр), сусло подається у вірпул.

У ході дослідження після аналізу об'єкта керування було розроблено схему автоматизації сушловарильного апарата із зовнішнім нагрівачем, оскільки метою є розроблення імітаційної моделі і використання її передусім для тестування й оптимізації керування, а також потенційно в задачах підтримки прийняття рішень у подальших дослідженнях. Схема автоматизації розроблена, на цьому етапі, є наближеною і висвітлює потенційні стратегії керування. Першочергове завдання схеми — описати технологічний процес з точки зору вимірювальних параметрів і виконавчих механізмів для регулювання цих параметрів. Спрощена схема автоматизації наведена на рис. 1.

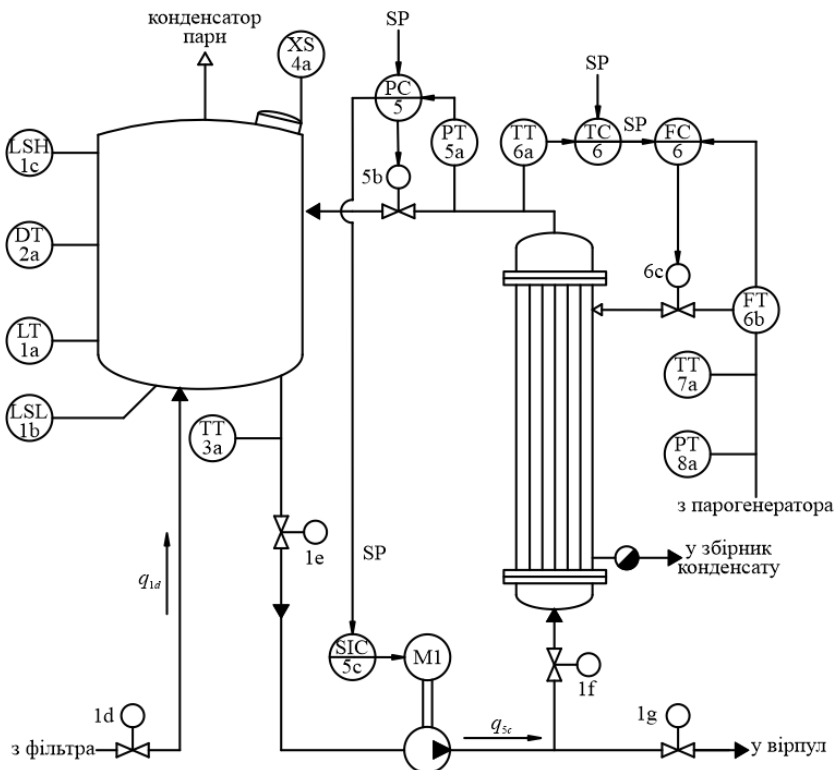


Рис. 1. Спрощена схема автоматизації

Система керування повинна забезпечувати інтерфейс для збору даних від різних датчиків, які впливають на процес кип'ятіння.

Таблиця 1. Перелік вхідних сигналів підсистеми кип'ятіння суслу

LT1a	Рівень у сусліварильному апараті
DT2a	Густина суслу
TT3a	Температура на виході сусліварильного апарата
PT5a	Тиск пари на виході нагрівача
TT6a	Температура на виході нагрівача
FT6b	Витрата сухої насиченої пари
TT7a	Температура сухої насиченої пари
PT8a	Тиск сухої насиченої пари
LSL1b	Сигналізатор нижнього рівня сусліварильного апарата
LSH1c	Сигналізатор верхнього рівня сусліварильного апарата
XS4a	Кінцевик кришки сусліварильного апарата

Система керування повинна забезпечувати інтерфейс для керування виконавчими механізмами та надавати швидкий відгук про стан виконавчих механізмів.

Таблиця 2. Перелік механізмів

5b	Баростатичний клапан на виході нагрівача
6c	Клапан подачі пари у нагрівач
SIC5c	Частотний перетворювач двигуна циркуляційного насоса M1
1d	Клапан 1d набору сусліварильного апарата відкрити/закрити
1e	Клапан 1e зливу сусліварильного апарата відкрити/закрити
1f	Клапан 1f набору у нагрівач відкрити/закрити
1g	Клапан 1g зливу у вірпул відкрити/закрити

У процесі дослідження було реалізовану комплексну імітаційну модель сусліварильного апарата із зовнішнім нагрівачем, спрощена схема автоматизації якого наведена на рис. 1. Імітаційна модель об'єкта включає набір взаємопов'язаних моделей окремих компонентів:

- клапанів **1d**, **1e**, **1f**, **1g**, **6c**. Імітаційні моделі клапанів НЕ є здобутком роботи, яка висвітлюється у статті. Автори використали готові моделі клапанів, описані в

(Пупена, 2023а). Модель клапана передбачає імітацію коефіцієнта витрати клапана K_f та станів «Відкритий/Закритий»;

- циркуляційного насоса **M1**, яким керує частотний перетворювач **SIC5c**.

Модель насоса передбачає імітацію витрати насоса;

- сусліварильного апарата. Модель передбачає імітацію вимірювальних параметрів:

- рівень у сусліварильному апараті **LT1a**;
- сигналізатор нижнього рівня сусліварильного апарата **LSL1b**;
- сигналізатор верхнього рівня сусліварильного апарата **LSH1c**;
- температура на виході сусліварильного апарата **TT3a**.
- зовнішнього нагрівача. Модель передбачає імітацію температури на виході нагрівача **TT6a**.

Розроблена модель передбачає часткову імітацію процесу кип'ятіння суслу, оскільки включає імітацію обмеженої кількості змінних процесу.

Розроблення математичної моделі сусліварильного апарата. Рівень суслу — **LT1a**. Для імітації рівня суслу в сусліварильному апараті були зроблені такі припущення:

1. Густина суслу після фільтра та після теплообмінника рівні.
2. Насос **M1**, який управляється частотним перетворювачем **5c**, запускається, якщо клапан **1e** повністю відкритий, а мінімальний рівень у сусліварильному апараті $15 \pm 5\%$, щоб досягти необхідного тиску рідини на циркуляційний насос **M1**.
3. Вхідна витрата перед клапаном **1d** постійна (на етапі набору) та забезпечується ділянкою фільтрування суслу.
4. Опір системи (імпеданс потоку) для ділянок трубопроводів між насосом **M1** та клапаном **1f**; між насосом **M1** та клапаном **1g** однаковий.
5. Сусліварильний апарат — циліндрична ємність.
6. Сусліварильний апарат має два вхідних потоки: витрата суслу після фільтра F_{in1} та вхідна витрата після нагрівача F_{in2} ; один вихідний потік, який роздвоюється на два маршрути: вихідна витрата у нагрівач F_{out1} , вихідна витрата у вірпул F_{out2} . Матеріальний баланс для сусліварильного апарата:

$$\frac{dV \cdot \rho}{dt} = F_{in1}(t) \cdot \rho + F_{in2}(t) \cdot \rho - F_{out1}(t) \cdot \rho - F_{out2}(t) \cdot \rho \quad (1)$$

Скоротивши вираз та застосувавши метод Ейлера, отримаємо:

$$V_{n+1} = V_n + \Delta t \cdot (F_{in1} + F_{in2} - F_{out1} - F_{out2}), \quad (2)$$

де

$$F_{in1} = a_1 \cdot q_{1d}; \quad (1)$$

$$F_{in2} = \frac{a_2 \cdot a_3 \cdot q_{5c}(t - \tau)/3600}{a_3 + a_4}; \quad (2)$$

$$F_{out1} = \frac{a_2 \cdot a_3 \cdot q_{5c}/3600}{a_3 + a_4}; \quad (3)$$

$$F_{out2} = \frac{a_2 \cdot a_4 \cdot q_{5c}/3600}{a_3 + a_4}, \quad (4)$$

де a_1 — коефіцієнт витрати K_f клапана **1d**; q_{1d} — витрата при повному відкритті клапана **1d**, м³/с; $a_2 = 1$ — якщо клапан **1e** повністю відкритий та 0 — якщо не відкритий; q_{5c} — витрата створювана насосом **5c**, м³/год; a_3 — коефіцієнт витрати K_f клапана **1f**; a_4 — коефіцієнт витрати K_f клапана **1g**; τ — час проходження суслу через нагрівач, с.

Матеріальний баланс дає змогу виразити поточний об'єм суслу. Рівень у сусліварильному апараті, який згідно з припущенням 5 є циліндричною ємністю, буде виражатися формулою:

$$L(t) = \frac{V(t)}{S}, \quad (7)$$

де S — поперечний переріз сусліварильного апарата, м².

Для практичної реалізації моделі необхідно означити деякі параметри, такі як константи, що задовольняють означені припущення, постійні налаштування клапанів та насоса:

- q_{1d} — постійна витрата перед клапаном **1d** згідно з припущенням 3. Цю константу необхідно означити перед моделюванням;
- q_{5c} — витрата створювана насосом **5c** залежно від заданого значення швидкості обертів двигуна насоса. Модель насоса, реалізована в рамках пропонованого дослідження та описана далі. Модель насоса передбачає означення констант: витрата, напір і потужність при максимальній швидкості обертів.

Коефіцієнти витрати клапанів a_1 , a_3 , a_4 генеруються на основі моделей описаних у (Пупена, 2023а). Для клапанів **1d**, **1e**, **1f**, **1g** прийнято лінійну характеристику регулюючого органу, перед моделюванням необхідно означити час повного відкриття для кожного клапана;

- τ — час проходження суслем шляху від точки відбору суслу із сусліварильного апарата до точки подачі суслу після нагрівача. Передбачається, що це стала величина, яка має бути означена перед моделюванням;
- S — поперечний переріз сусліварильного апарата. Стала величина, яка має бути означена перед моделюванням.

Розроблення математичної моделі сусліварильного апарата. Сигналізатори верхнього та нижнього рівнів — LSH1c, LSL1b. Імітація сигналізаторів верхнього та нижнього рівнів проводиться відносно максимального об'єму суслу в сусліварильному апараті:

$$LSH = \begin{cases} 1, & \left(\frac{V(t)}{V_{\max}} \right) > 0,9; \\ 0, & \text{інакше} \end{cases} \quad (8)$$

$$LSL = \begin{cases} 1, & \left(\frac{V(t)}{V_{\max}} \right) > 0,001, \\ 0, & \text{інакше} \end{cases} \quad (9)$$

де $V(t)$ — поточний об'єм суслу в сусліварильному апараті, який виражається через матеріальний баланс для сусліварильного апарата за формулою (2); $V_{\max}$ — максимальний об'єм, який може займати суслу в сусліварильному апараті, сталий параметр моделі.

Розроблення математичної моделі сусліварильного апарата. Температура на виході сусліварильного апарата — ТТ3а. Для імітації температури суслу на виході сусліварильного апарата були зроблені такі припущення:

1. Густина суслу після фільтра та після теплообмінника рівні.
2. Вхідна температура суслу після фільтра постійна (на етапі набору), дорівнює 95 °С та забезпечується ділянкою фільтрування суслу.

Безпосередньо в сусліварильний апарат не подається теплоагент, тому температура на виході сусліварильного апарата буде залежати від вхідних витрат та відповідних вхідних температур і задовольняти матеріальний баланс:

$$\frac{dV \cdot \rho}{dt} = F_{in1}(t) \cdot \rho + F_{in2}(t) \cdot \rho - F_{out}(t) \cdot \rho, \quad (10)$$

де $F_{out}(t)$ — один вихідний потік, який роздвоюється на два потоки F_{out1} та F_{out2} . У контексті моделювання температури розглядаємо його як один потік з температурою на виході сусліварильного апарата **ТТ3а**.

Перепишемо рівність у вигляді:

$$\frac{d(V \cdot T)}{dt} = F_{in1}(t) \cdot T_{in1}(t) + F_{in2}(t) \cdot T_{in2}(t) - F_{out}(t) \cdot T(t). \quad (11)$$

Застосувавши метод Ейлера, рівняння буде мати вигляд:

$$V_{n+1} \cdot T_{n+1} = V_n \cdot T_n + \Delta t \cdot (F_{in1} \cdot T_{in1} + F_{in2} \cdot T_{in2} - F_{out} \cdot T_n), \quad (12)$$

звідки

$$T_{n+1} = \frac{V_n}{V_{n+1}} \cdot T_n + \frac{\Delta t}{V_{n+1}} \cdot (F_{in1} \cdot T_{in1} + F_{in2} \cdot T_{in2} - F_{out} \cdot T_n). \quad (13)$$

Значення F_{in1} , F_{in2} розраховуються за формулами (3), (4) враховуючи, що $F_{out} = F_{out1} + F_{out2}$; T_{in1} — постійна температура суслу після фільтра, яка дорівнює 95 °С згідно з припущенням 2; T_{in2} — модельована температура суслу після нагрівача **ТТ6а**.

Розроблення математичної моделі нагрівача. Температура на виході нагрівача — ТТ6а. Для імітації температури суслу на виході нагрівача (кожухотрубний теплообмінник) були зроблені такі припущення:

1. Вхідна температура сухої насиченої пари постійна та дорівнює 115 °С.
2. Вхідна витрата сухої насиченої пари перед клапаном **6с** постійна.

Імітаційна модель температури на виході нагрівача **ТТ6а** зроблена на основі моделі, описаної в (Пупена, 2023b) в пункті «Імітація температури в теплообміннику»:

$$T_{n+1} = T_n + \frac{\Delta t}{V_{heat}} \cdot \left(F \cdot (T_{in} - T_n) + \frac{U \cdot S_{heat}}{\rho \cdot c} \cdot (T_{a(n)} - T_n) \right); \quad (14)$$

$$T_{(a)n+1} = T_{(a)n} + \frac{\Delta t}{V_a} \cdot \left(F_a \cdot (T_{(a)in} - T_{(a)n}) + \frac{U \cdot S_{heat}}{\rho_a \cdot c_a} \cdot (T_{a(n)} - T_{(a)n}) \right), \quad (15)$$

де $T_{(n+1)}$ — поточна температура суслу у нагрівачі; $T_{(a)n+1}$ — поточна температура пари у нагрівачі; V_{heat} — максимальний об'єм, який може займати сусло в теплообміннику; V_a — максимальний об'єм, який може займати пара в теплообміннику; F — вхідна витрата суслу, яка дорівнює F_{out1} та розраховується за формулою (5);

F_a — вхідна витрата пари, яка регулюється клапаном **6с**; T_{in} — модельована температура на виході із сушловарильного апарата **ТТ3а**; $T_{(a)in}$ — постійна температура вхідної сухої насиченої пари **ТТ7а**, яка дорівнює 115 °С згідно з припущення м1; U — коефіцієнт теплопередачі; S — площа поверхні теплообміну; ρ — густина сусла; ρ_a — густина пари при 3 бар; c — теплоємність сусла; c_a — теплоємність пари;

$$F_a = a_5 \cdot q_{6c}, \quad (16)$$

де a_5 — коефіцієнт витрати K_f клапана **6с**; q_{6c} — витрата при повному відкритті клапана **6с**, м³/с.

Коефіцієнт витрати клапана a_5 генерується на основі моделі описаної в (Пупе-на, 2023а). Для клапана **6с** прийнято рівнопроцентну характеристику регулюючого органу (загальна практика для теплообмінників). Перед моделюванням необхідно означити час повного відкриття клапана.

Розроблення математичної моделі циркуляційного насоса. Імітаційна модель насоса базується на законах подібності (affinity laws) для насосів. Набір співвідношень, відомий як закони подібності, дає змогу передбачити продуктивність відцентрового насоса для швидкості, відмінної від тієї, для якої відома характеристика насоса (Karassik, & McGuire, 1998). Згідно з цими законами:

$$Q = Q_1 \cdot \frac{n}{n_1}; \quad (17)$$

$$H = H_1 \cdot \left(\frac{n}{n_1} \right)^2; \quad (18)$$

$$P = P_1 \cdot \left(\frac{n}{n_1} \right)^3, \quad (19)$$

де n — задана (нова) швидкість обертів, rpm; Q — витрата при заданій швидкості обертів n , м³/год; H — напір при заданій швидкості обертів n , м; P — потужність при заданій швидкості обертів n , кВт; n_1 — швидкість обертів, для якої відомі характеристики насоса. Як правило, для конкретного насоса згідно з його специфікацією відомі такі характеристики: витрата, напір і потужність при максимальній швидкості обертів i , відповідно, у формулах (17), (18), (19) позначаються як Q_1 — відома витрата при швидкості n_1 ; H_1 — відомий напір при швидкості n_1 ; P_1 — відома потужність при швидкості n_1 .

Таблиця 3. Параметри імітаційної моделі (частина 1)

Позначення	Опис	Наближені значення для кип'ятіння 10 м ³ сусла
q_{1d}	Постійна витрата після фільтра, м ³ /с	0,017 м ³ /с
Q_1	Витрата циркуляційного насоса при максимальних обертах, м ³ /год	132 м ³ /год
H_1	Напір циркуляційного насоса при максимальних обертах, м	24,5 м

P_1	Потужність двигуна циркуляційного насоса при максимальних обертах, кВт	7,5 кВт
n_1	Максимальні оберти двигуна циркуляційного насоса, rpm	1450 rpm
<u>Помилка! Джерело посилання не знайдено.</u>	Час проходження сушом шляху від точки відбору суслу із сушварильного апарата до точки подачі суслу після нагрівача, с	20 с
S	Поперечний переріз сушварильного апарата, м ²	2,7 м ²
T_{in1}	Постійна температура суслу після фільтра, °C	95 °C
q_{6c}	Постійна витрата сухої насиченої пари у теплообмінник, м ³ /с	0,09 м ³ /с
$T_{(a)in}$	Постійна температура вхідної сухої насиченої пари, °C	115 °C

Таблиця 4. Параметри імітаційної моделі (частина 2)

V_{heat}	Максимальний об'єм, який може займати сушло в зовнішньому нагрівачі, м ³	0,08 м ³
V_a	Максимальний об'єм, який може займати пара в зовнішньому нагрівачі, м ³	0,41 м ³
U	Коефіцієнт теплопередачі теплообмінника, кВт/м ² /°C	1,57 кВт/м ² /°C (загальна практика (Hancock, 2014))
S_{heat}	Площа поверхні теплообміну, м ²	13,31 м ²
ρ	Густина суслу, кг/м ³	1032 кг/м ³
c	Теплоємність суслу, кДж/(кг*K)	4 кДж/(кг*K)
ρ_a	Густина пари при 3 bar, кг/м ³	1,651 кг/м ³
c_a	Теплоємність пари, кДж/(кг*K)	2,2 кДж/(кг*K)

Параметри та структурна схема імітаційної моделі. Імітаційна модель передбачає означення деяких сталих величин відповідно до конструктивних особливостей апаратів, а також застосування деяких припущень.

Імітаційна модель є комплексом з кількох імітаційних моделей, які впливають одна на одну. Структурна схема розробленої комплексної імітаційної моделі наведена на рис. 2 і 3.

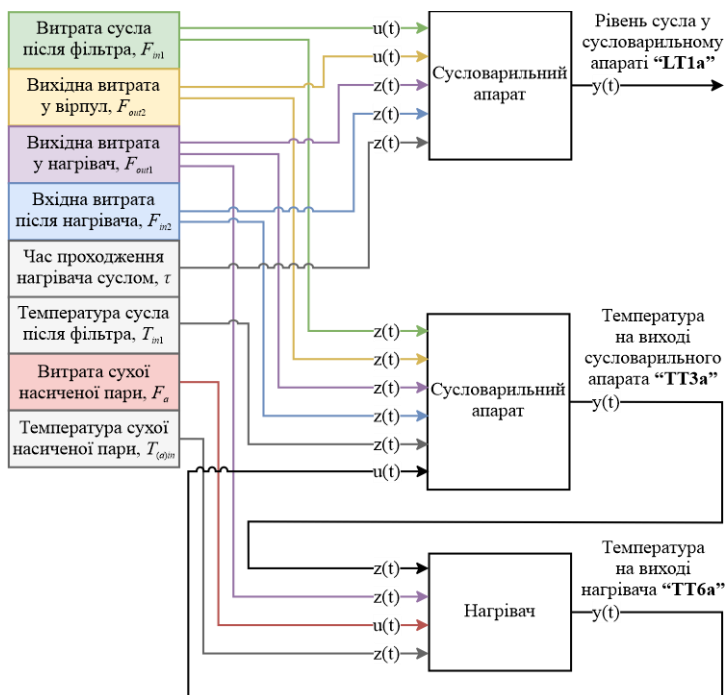


Рис. 2. Структурна схема моделі (частина 1)

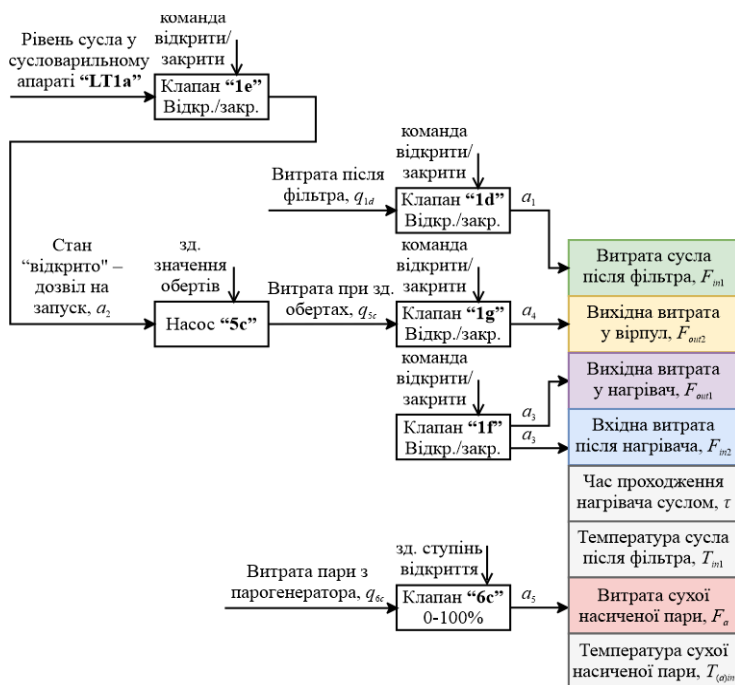


Рис. 3. Структурна схема моделі (частина 2)

Висновки

У ході дослідження розроблено імітаційну модель сушловарильного апарата із зовнішнім нагрівачем на основі матеріальних балансів. Наразі модель представлена у вигляді розв'язків диференційних рівнянь методом Ейлера та набору сталих параметрів моделі. На основі структурної схеми моделі її можна легко реалізувати в програмованому логічному контролері для налагодження алгоритмів керування процесом кип'ятіння суслу й тестування системи керування до її впровадження на реальному об'єкті. Передбачається, що в подальшому розроблена модель буде застосовуватися для вибору оптимальних стратегій керування, генерування наборів даних, а також як конструктивний елемент підсистеми підтримки прийняття рішень.

Література

- Armando, B. (1997). *Principles and practice of automatic process control*. Automatica, 23(3).
- Bamforth, C. W. (2016). *Brewing Materials and Processes: A Practical Approach to Beer Excellence*. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-13349-1>.
- Eßlinger, H. M. (2009). *Handbook of Brewing: Processes, Technology, Markets*. <https://doi.org/10.1002/9783527623488>.
- Fijewski, M., Polarczyk, I., & Paduchowska, J. (2019). *Analysis and simulation of the circulation pump operation*. E3S Web of Conferences, 116. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911600022>.
- Fix, G. (1999). *Principles of Brewing Science*. In *Principles of Brewing Science*.
- Hough, J. S., Briggs, D. E., Stevens, R., & Young, T. W. (2001). *Malting and Brewing Science: Volume 2 Hopped Wort and Beer*.
- Hancock, J. (2014). *Evaporation & Wort Boiling*. <https://www.briggsplc.com/wp-content/uploads/technical-papers/EvaporationWort-Boiling-JAN-2014-Briggs.pdf>.
- Karassik, I. J., & McGuire, T. (1998). *Heads, Conditions of Service Performance Characteristics, and Specific Speed In Centrifugal Pumps*. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-6604-5_18.
- Kunze, W. (2004). *Technology brewing and malting*. VLB Berlin.
- Mosher, M., & Trantham, K. (2017). *Brewing Science: A Multidisciplinary Approach*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-46394-0>.
- Narziß, L., Back, W., Gastl, M., & Zarnkow, M. (2017). *Die Technologie der Malzbereitung*. In *Abriss der Bierbrauerei*. <https://doi.org/10.1002/9783527812820.ch1>.
- Pogo, S. I., Arias, J. F., & Andaluz, V. H. (2021). *Control of the Malt Mashing and Boiling Process in Craft Beer Production: Hardware-in-The-Loop-Technique*. Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics), 12980 LNCS. https://doi.org/10.1007/978-3-030-87595-4_51.
- Seborg. (2019). *Process Dynamics and Control fourth edition*. In Journal of Chemical Information and Modeling (Vol. 53, Issue 9).
- Shah, R. K., & Sekulić, D. P. (2003). *Fundamentals of Heat Exchanger Design*. <https://doi.org/10.1002/9780470172605>.
- Thomas, P. (1999). *Simulation of Industrial Processes for Control Engineers*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-7506-4161-6.x5000-7>.
- Stewart, G. G., Russell, I., & Anstruther, A. (2017). *Handbook of brewing, Third edition*. <https://doi.org/10.1201/9781351228336>.
- Stewart, M., & Lewis, O. T. (2012). *Heat Exchanger Equipment Field Manual: Common Operating Problems and Practical Solutions*. <https://doi.org/10.1016/C2011-0-07786-4>.
- Пупена, О. М. (2023а). *Лабораторна робота №9. Розробка системи керування з використанням каркасу*. Розробка та імітаційне моделювання інтегрованих систем керування. Лабораторний практикум. https://pupenasan.github.io/rimit/lab/lab9_pacframework.html.
- Пупена, О. М. (2023б). *Тема 15. Використання імітаційних моделей при побудові інтегрованих систем керування*. Розробка та імітаційне моделювання інтегрованих систем керування. Лекції. https://pupenasan.github.io/rimit/lecture/15_simul.html.