

ТЕРМІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ФЕРМЕНТЕРА: ВПЛИВ ОХОЛОДЖЕННЯ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ПРОЦЕСУ

Воронов М.А.

КПІ ім. Ігоря Сікорського, mykhailovoronov@gmail.com

Abstract

This work presents thermal simulation of a 10 m³ fermenter under two conditions: with and without a cooling jacket. We assess how the cooling system affects temperature distribution as a key for maintaining optimal microbial growth at 38 – 42 °C.

Keywords: thermal modelling, fermenter, cooling jacket, SolidWorks Simulation

Вступ. Ферментаційні процеси, особливо аеробні, супроводжуються значним виділенням тепла внаслідок інтенсивної метаболічної активності мікроорганізмів. У великих промислових ферментерах генерація тепла може спричинити локальні перегріву. Що в свою чергу, призводить до нерівномірності температур всередині ферментера, що є критичним фактором для процесів. Мікроорганізми дуже чутливі до змін температури: відхилення навіть на кілька градусів можуть знизити їхню продуктивність, життєздатність та викликати стресові реакції. Особливо це актуально для процесів, де підтримка температури у вузькому діапазоні є вирішальною для ефективного росту культури та утворення цільового продукту [1].

Однією з основних систем, що забезпечує тепловий контроль, є охолоджуюча сорочка – зовнішня оболонка, через яку циркулює холодоагент. Вона забезпечує активне відведення надлишкового тепла від стінок реактора. Водночас внутрішнє перемішування за допомогою мішалок сприяє конвективному переносу тепла, але не завжди здатне компенсувати інтенсивне виділення тепла в центрі об'єму. Таким чином, без додаткового охолодження існує ризик утворення температурних градієнтів, які можуть негативно вплинути на якість процесу.

У зв'язку з цим актуальним є використання інструментів комп'ютерного моделювання – зокрема, модулю Thermal Simulation у SolidWorks, який дозволяє візуалізувати і кількісно оцінити температурні поля у ферментерах з різними умовами охолодження. Це дає змогу до початку експлуатації проєктувати більш ефективні теплові режими, запобігати перегріву та підвищувати стабільність ферментаційних процесів [1].

Метою даного дослідження є проведення чисельного моделювання теплових процесів у ферментері з метою порівняння температурного режиму за двох умов експлуатації – з охолоджуючою сорочкою та без неї. У роботі досліджується вплив системи охолодження на розподіл температури всередині реактора під час ферментації та визначається її роль у підтриманні стабільного середовища, необхідного для нормального функціонування мікроорганізмів. Аналіз результатів моделювання дозволяє оцінити ефективність охолодження, виявити наявність температурних градієнтів, а також зробити висновки щодо доцільності застосування сорочки у технологічному процесі.

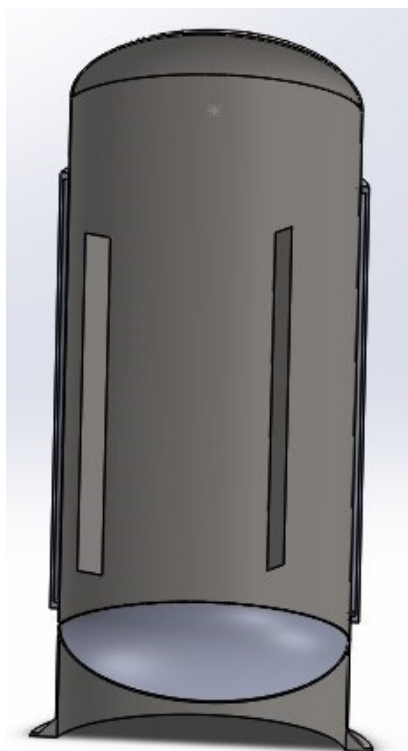


Рис. 1. Ферментер у розрізі.

Матеріали та методи. Модель ферментера включала наступні геометричні параметри: діаметр – 1,8 м, висота – 4,18 м, товщина стінки – 10 мм, відстань між стінкою реактора та охолоджуючою сорочкою – 50 мм, в робочій зоні наявні 4 відбивні перегородки (рис. 1). Тепловиділення від мікроорганізмів моделювалося як усталений рівномірний тепловий потік. Перемішування середовища забезпечувалося турбінною мішалкою, що оберталася зі швидкістю 240 об/хв, що було враховано як додатковий конвективний компонент теплообміну. Охолодження здійснювалося водою з температурою на вході 16 °С та на виході 22 °С, при витраті 4 кг/с через охолоджуючу сорочку. Для обох сценаріїв визначалися температурні поля як в об’ємі, так і на поверхні реактора.

Для сценарію з охолоджуючою сорочкою встановлено внутрішній контур циркуляції води: вхідна температура 16 °С, вихідна – 22 °С, витрата 4 кг/с. Граничні умови зовнішньої поверхні сорочки – природна конвекція з коефіцієнтом 10 Вт/(м²·К) та навколишня температура 25 °С.

Модель сітки – об’ємні тетраедричні елементи середнього розміру, адаптивне згущення поблизу стінок. Аналіз включав розрахунок тривимірних полів температури в об’ємі середовища та на внутрішній і зовнішній поверхнях реактора.

Результати та обговорення. У відсутності активного охолодження температурні поля всередині ферментера виявили значну неоднорідність. Середнє значення температури в об’ємі становило близько 43,5 °С, проте максимальні локальні “гарячі точки” досягали 46 °С у центральній зоні. При цьому у верхній частині реактора температура знижувалася до 39 – 40 °С (рис. 2).

Таке розподілення пояснюється обмеженою здатністю турбінної мішалки (240 об/хв) забезпечити однорідний конвективний теплообмін: тепло, що генерується мікроорганізмами, не встигало рівномірно розподілитися по об'єму реактора. Локальні зони перегріву створюють ризик термостресу клітин, що може призводити до пригнічення метаболізму [2].

Крім того, нерівномірність температури може спричинити неоднорідність в'язкості та щільності середовища, що додатково ускладнює процес змішування й подальше розподілення тепла. Відсутність сорочки також означає, що тепло відводиться лише через стінки і природну конвекцію, що виявляється недостатньо при інтенсивній ферментації.

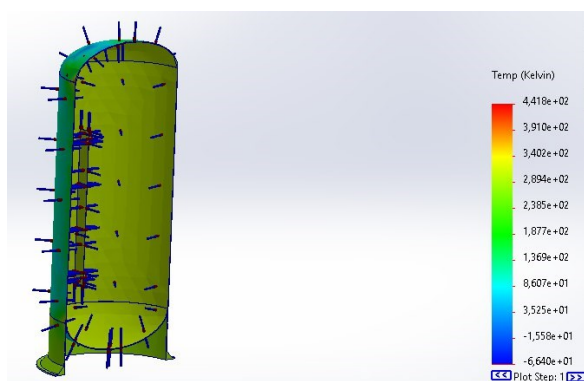


Рис. 2. Ферментер без сорочки (початок випробування).

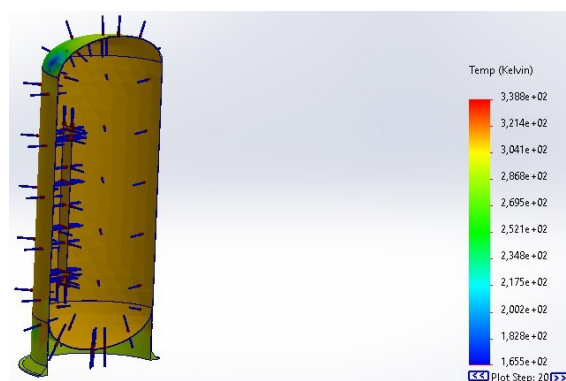


Рис. 3. Ферментер без сорочки (кінець випробування).

Впровадження водяного охолодження через сорочку значно покращило тепловий баланс. Середня температура в об'ємі знизилась до 41,3 °C, при тому що максимальні показники лімітувалися в межах 42 °C. Верхня частина реактора стабілізувалася на рівні 36 – 38 °C, тобто середнє значення цієї зони склало близько 37 °C. Стандартне відхилення температури зменшилося до ~1,1 °C, а максимальний градієнт ΔT впав до 3 °C (рис. 3).

Позитивний ефект пояснюється активним відведенням тепла: вода, що циркулює в сорочці, знімає надлишкову теплову потужність, не даючи їй накопичуватися у центральній зоні (рис. 4). Таким чином, конвекція від мішалки стає достатньою для утримання приблизно однорідного температурного поля в об'ємі [3, 4].

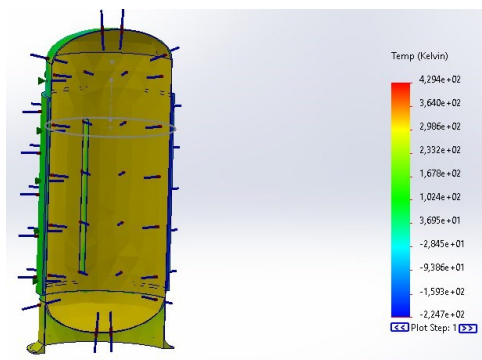


Рис. 4. Ферментер з сорочкою (початок випробування).

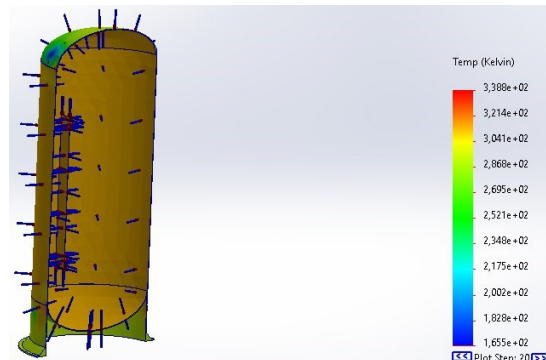


Рис. 5. Ферментер з сорочкою (кінець випробування).

Зниження температурних коливань удвічі створює стабільні умови для мікробіологічної активності – мінімізується ризик локальних перегрівів і стресу, підвищується рівномірність росту культури та вихід кінцевого продукту (рис. 5). Отримані дані свідчать про критичну роль сорочки в технологічному процесі: навіть при незначному збільшенні витрати охолоджувальної води або зниженні її вхідної температури можна досягти ще кращої температурної однорідності та підвищити загальну ефективність ферментації.

Висновки. Здійснене чисельне моделювання дало змогу глибше проаналізувати вплив системи охолодження на теплові процеси, що відбуваються у ферментері об'ємом 10 м³ під час аеробної ферментації. Однією з основних проблем, яка була виявлена у випадку відсутності охолоджуючої сорочки, стало виникнення значного температурного градієнта між центральною зоною та периферією реактора. Це призводить до локальних зон перегріву, які можуть суттєво пригнічувати життєдіяльність мікроорганізмів, спричиняти клітинний стрес і, як наслідок, негативно впливати на метаболічну активність. У такому середовищі складно підтримувати оптимальні умови для сталого розвитку біомаси, що знижує загальну продуктивність процесу.

Натомість модель, у якій було передбачено охолодження за допомогою сорочки з водяним теплоносієм, продемонструвала значно стабільніший температурний розподіл. У більшості об'єму реактора температура утримувалась у межах 41 – 42 °С, що є сприятливим для росту багатьох промислових мікроорганізмів. Біля кришки температура була трохи нижчою, проте залишалася в допустимих межах (36 – 38 °С).

Таким чином, результати дослідження однозначно свідчать про те, що наявність ефективної системи охолодження є ключовим елементом при проектуванні ферментерів великого об'єму. Застосування охолоджуючої сорочки дозволяє не лише підтримувати необхідний температурний режим, а й підвищити технологічну стабільність і надійність усього процесу. У майбутньому доцільно розглядати можливості автоматизованого керування параметрами охолодження, а також дослідити вплив зміни витрати охолоджуючої рідини на енергоефективність та економічну доцільність таких систем у промислових умовах.

Список використаної літератури:

1. Параметричне моделювання технологічних процесів. Розділ 1. Основи твердотільного параметричного моделювання в системі Solid Works / С. В. Плашихін та ін. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 83 с.
2. A novel method to assess heat transfer and impact of relevant physicochemical parameters for the scaling up of solid state fermentation systems / A. Vauris та ін. *Biotechnology reports*. 2022. Т. 36. С. e00764. URL: <https://doi.org/10.1016/j.btre.2022.e00764> (дата звернення: 11.05.2025).