

УДК 620.92.579.66.

**М.О.Будько**, канд.техн.наук (Національний технічний університет України "КПІ",  
Інститут відновлюваної енергетики НАН України, Київ)

### **Дослідження впливу конструктивних параметрів реактора періодичної дії на температурний режим процесу перетворення енергії біомаси в біодизельне паливо**

*В роботі проведено дослідження впливу конструктивних параметрів реактора періодичної дії на температурний режим процесу перетворення енергії біомаси в біодизельне паливо з використанням програмного середовища Matlab. Проведено оцінку та аналіз динаміки зміни температури реакційної суміші з часом із врахуванням природи матеріалу оболонки корпусу реактора переестерифікації періодичної дії. Запропоновано матеріал оболонки корпусу та радіус реактора для удосконалення процесу перетворення енергії біомаси в біодизельне паливо.*

**Ключові слова:** біодизельне паливо, рослинні олії, реактор переестерифікації періодичної дії, температурний режим, фізико-хімічні параметри.

*В работе проведено исследование влияния конструктивных параметров реактора периодического действия на температурный режим процесса преобразования энергии биомассы в биодизельное топливо с использованием программной среды Matlab. Проведена оценка и анализ динамики изменения температуры реакционной смеси со временем с учетом природы материала оболочки корпуса реактора переэстерификации периодического действия. Предложен материал оболочки корпуса и радиус реактора для усовершенствования процесса преобразования энергии биомассы в биодизельное топливо.*

**Ключевые слова:** биодизельное топливо, растительные масла, реактор переэстерификации периодического действия, температурный режим, физико-химические свойства.

Характер розподілу температури в хімічному реакторі надзвичайно важливий при аналізі процесів, що протікають у ньому, оскільки температура є одним із основних параметрів технологічного режиму. Від температури залежить швидкість хімічної реакції та гранично досяжний ступінь перетворення реагентів. Порушення рівномірного розподілу температури в реакторі може призвести до локального розігріву, небажаних побічних явищ тощо. Однак у реакторах періодичної дії застосовують інтенсивне перемішування реакційної суміші, що приводить до вирівнювання температури по всьому об'єму реактора, а тому перераховані явища не будуть мати місця [1].

Згідно з [2] реакція переестерифікації рослинних олій у біодизельне паливо є екзотермічною, тому при математичному моделюванні необхідно оцінити характер зміни температури реакційної суміші з часом. Для цього необхідно розглянути рівняння теплового балансу, тобто знайти умови, при яких буде спостерігатися рівність між приходом тепла і його витратою. При цьому

у виробничих умовах потрібно забезпечити дотримання цієї рівності за умови стійкої роботи реактора і необхідного температурного режиму. Щоб оптимізувати швидкість реакції і вихід цільового та побічних продуктів, температурний режим усередині реактора слід контролювати та регулювати відповідно до вимог хімічної кінетики.

Розглянемо тепловий режим реактора переестерифікації рослинних олій у біодизельне паливо, корпус якого виготовлений зі сталі товщиною 1 мм, що працює в умовах природного охолодження. Розрахунки проведемо для реакції переестерифікації соняшникової олії метиловим спиртом у присутності лужного каталізатора (КОН) з концентрацією 0,178% в перерахунку на метилат калію за встановлених фізико-хімічних та теплофізичних параметрів процесу [3]. Для подальшого дослідження теплових режимів реактора розроблена програма в середовищі Matlab, а результати у вигляді графіків зміни температури від часу з урахуванням впливу матеріалу оболонки (сталь, дюралюміній, склопластик) і радіуса реактора на протікання процесу наведено на рис. 1.

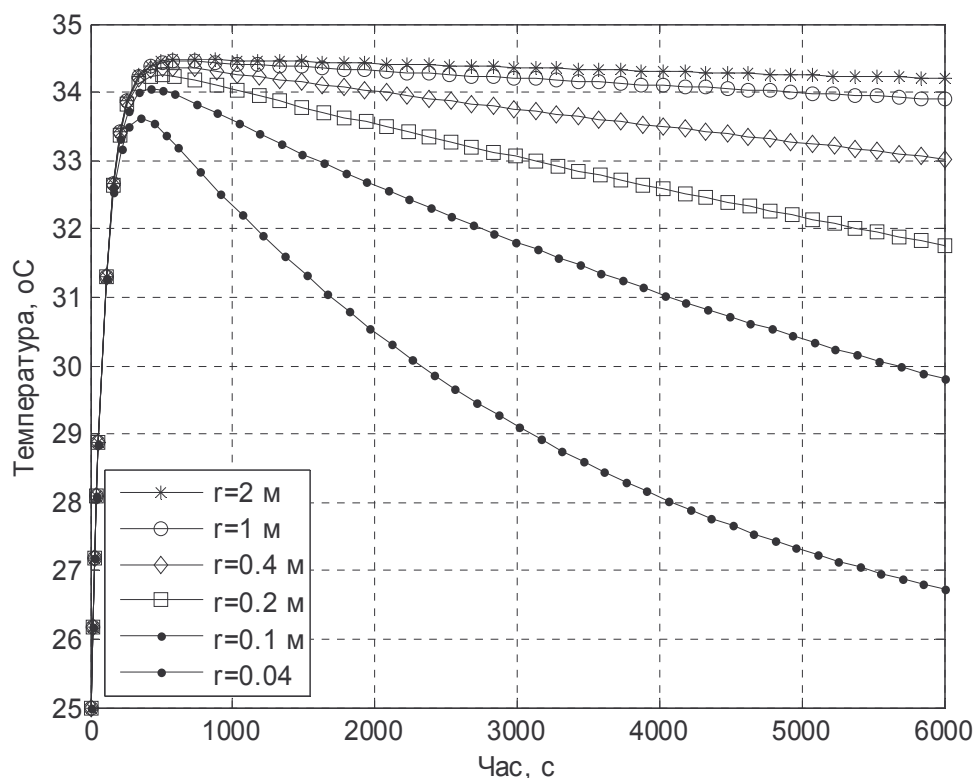


Рис. 1. Часова залежність температури реактора при природному охолодженні та різних значеннях радіуса.

На рис. 1 показано залежність температури реакційної суміші від радіуса реактора в умовах природного охолодження при температурі навколишнього середовища  $25^{\circ}\text{C}$ . Внаслідок екзотермічності реакції у процесі її протікання температура реакційної суміші в реакторі збільшується. В міру збільшення ступеня перетворення вихідних речовин зменшується швидкість реакції та інтенсивність тепловиділення і збільшується кількість тепла, що відводиться у навколишнє середовище, внаслідок чого часова залежність температури має екстремальний характер. Аналіз графічної залежності, наведеної на рис. 1, показує, що в режимі природного охолодження температура всередині реактора стрімко зростає і вже через 8-10 хв досягає максимальних значень приблизно  $34,5^{\circ}\text{C}$ . Матеріал оболонки реактора у цьому випадку практично не впливає на температуру реакційної суміші, тому що коефіцієнт тепловіддачі від поверхні реактора у навколишнє середовище при вільній конвекції відповідає значно більшому тепловому опору, ніж має оболонка з найменш теплопровідного склопластику, і саме він визначає закономірності теплообміну.

Розрахункові дані свідчать, що характер температурної залежності реакційної суміші є досить

чутливим до конструктивних параметрів реактора переестерифікації, а саме до його радіуса. При збільшенні радіуса реактора сповільнюється тепловідведення, нагрівання реакційної суміші посилюється, що впливає з математичної моделі теплоенергетичного процесу [4], і процес стає близьким до адіабатичного. Цю обставину потрібно враховувати при розробці та конструюванні самого реактора.

На основі отриманих даних у роботі [3] встановлено, що підвищення температури реакційної суміші незначно впливає на вихід кінцевого продукту, але прискорює реакцію. З урахуванням цього результату за допомогою розробленої математичної моделі дослідимо вплив штучного термостатування реактора переестерифікації рослинних олій при температурах  $25^{\circ}\text{C}$ ,  $40^{\circ}\text{C}$  і  $60^{\circ}\text{C}$  на закономірності протікання процесу.

Для забезпечення термостатування корпус реактора переестерифікації краще виготовляти з подвійними стінками, між якими потрібно інтенсивно прокачувати рідину (наприклад, воду) з потрібною температурою. При конструюванні реактора необхідно враховувати, щоб матеріали відповідали основним вимогам: мали механічну та корозійну стійкість, не приймали участі в хімічній

взаємодії з реагентами та були відносно недорогими. В якості таких матеріалів ми розглянемо склопластик, сталь і дюралюміній. Відомо, що дюралюміній, на відміну від сталі, є нестійким по відношенню до лугів. Для його захисту можна передбачити захисне покриття оболонки (правда, це може дещо погіршити тепловідвідну здатність оболонки), але, з урахуванням незначного перегрівання реакційної суміші внаслідок екзотермічності, це не є суттєвим. Крім того, враховуючи той факт, що кількість КОН, що приймає участь у реакції переестерифікації рослинних олій, незначна – 0,86% мас.(олії), не варто очікувати значної ерозії оболонки, хоча для перевірки надійності реактора з дюралюмінію потрібно провести необхідні експериментальні дослідження.

Результати розрахунків для хімічних реакторів, виготовлених зі склопластику, сталі та дюра-

люмінію з радіусами від 0,04 до 4 м і внутрішньою оболонкою товщиною 1 мм для температур 25°C, 40°C і 60°C наведені на рис. 2–7.

Через незначну теплопровідність склопластику (250-450 Вт/м·К [5]) для реакторів з радіусами, більшими за 1 м, незважаючи на термостакування, має місце майже таке ж перегрівання (8-9°C) реакційної суміші над температурою термостата (рис. 2), як і у випадку природного охолодження. І тільки в реакторах із радіусом, меншим від 40 см, реакційна суміш охолоджується до температури термостата за час, менший 6000 с (1 год 40 хв). Для реактора з найменшим із розглянутих конструкцій радіусом 4 см максимальне перегрівання зменшується удвічі (до 4°C), а температура реакційної суміші суттєво зменшується зі зменшенням часу повної термостабілізації до 1000 с (16,7 хв).

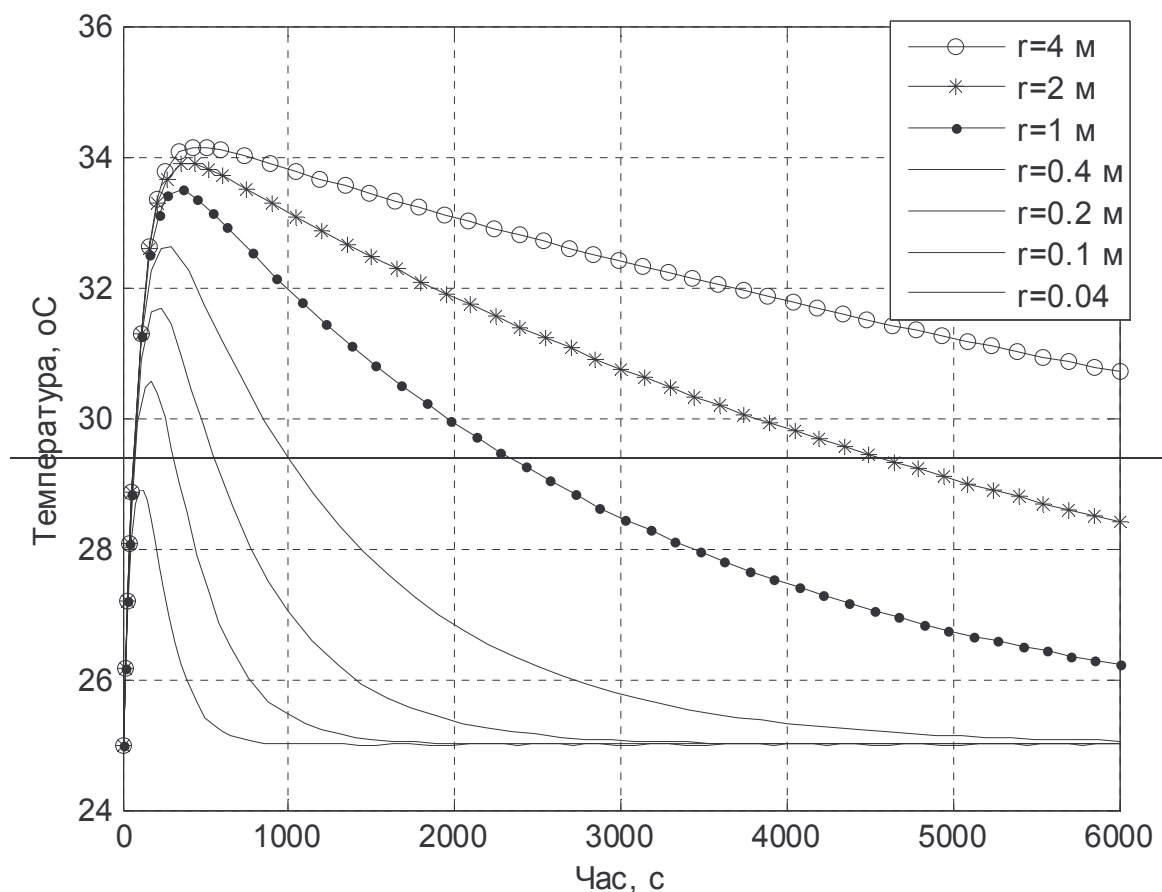


Рис. 2. Часова залежність температури в реакторі з оболонкою зі склопластику товщиною 1 мм при температурі термостата 25°C.

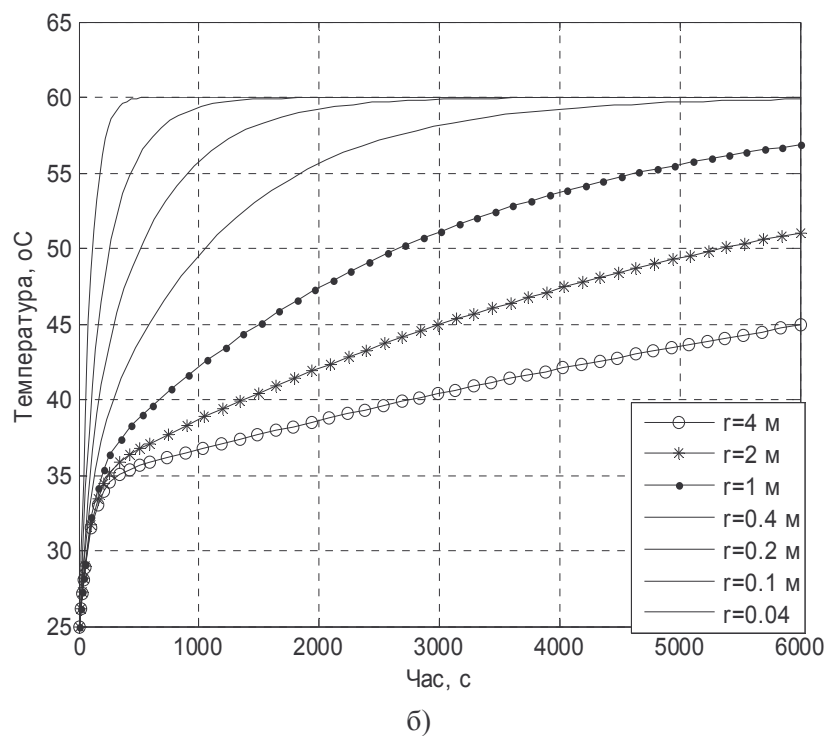
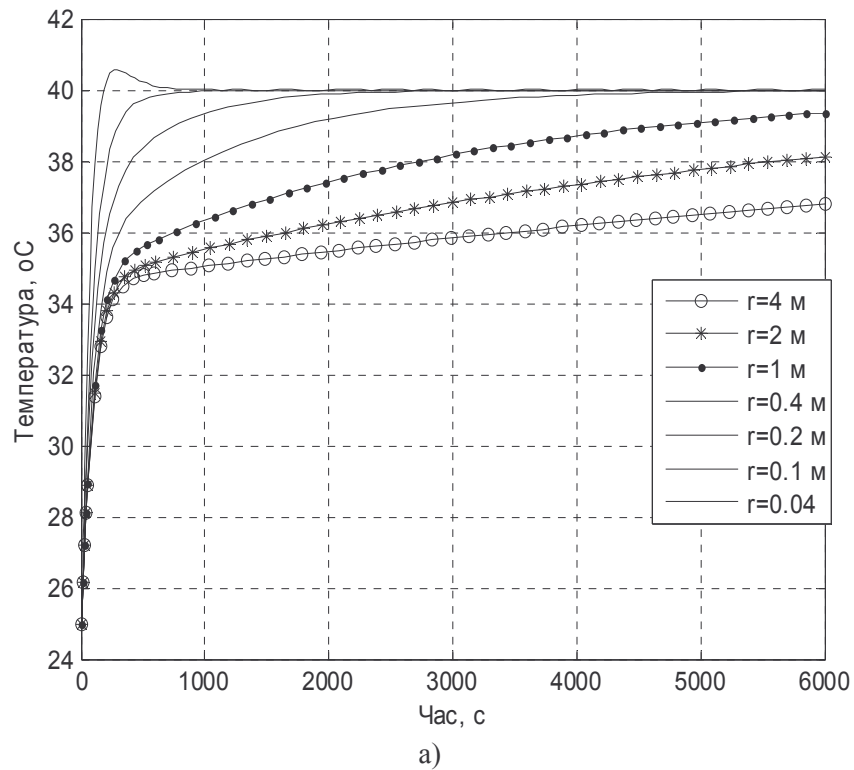


Рис. 3. Часова залежність температури в реакторі з оболонкою зі склопластику товщиною 1 мм при температурі термостата: а) 40°C; б) 60°C.

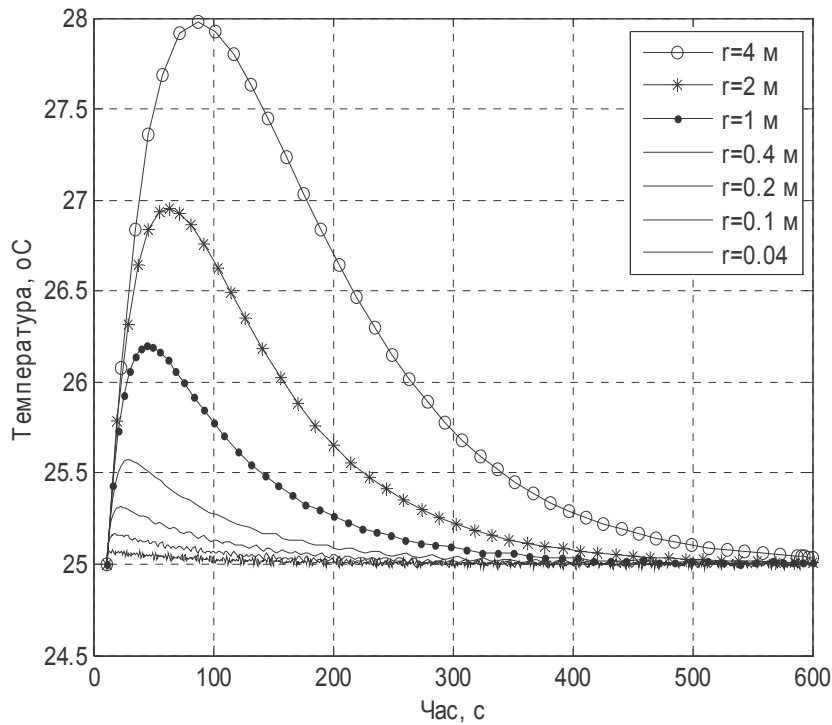
Саме тільки для цієї конструкції має місце дуже незначне перегрівання при температурі термостата 40°C (рис. 3а), для всіх інших конструкцій реактора, а також для всіх реакторів із термостатуванням при 60°C (рис. 3б) спостерігається асимптотичне наближення температури реакційної суміші до температури термостата. Час

встановлення теплової рівноваги при температурі термостата як 40°C, так і 60°C для реакторів із радіусом, більшим за 1 м, перевищує 6000 с.

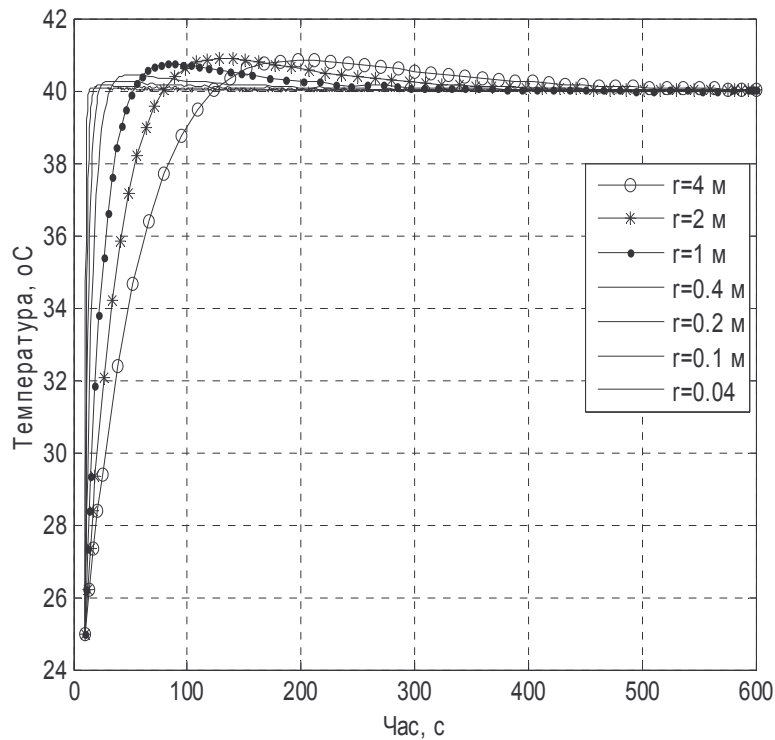
З графічної залежності (рис. 4) видно, що при штучному охолодженні до 25°C реактора з оболонкою зі сталі товщиною 1 мм перевищення заданої температури складає тільки 3°C для реактора із

найбільшим радіусом. Для реакторів з меншим радіусом використання охолодження зменшує крутизну гілок температурної кривої та сприяє більш швидкому досягненню рівноважної температури, внаслідок чого температурний режим у реакторі наближається до ізотермічного, при

цьому збільшується теплова стійкість реактора. При термостатуванні реактора зі сталеву оболонкою на рівні 40°C і 60°C перегрівання реакційної суміші не перевищує 1°C, а ізотермічний режим встановлюється за 100 с і 200 с відповідно (рис. 4, 5).



а)



б)

Рис. 4. Часова залежність температури в реакторі з оболонкою зі сталі товщиною 1 мм при температурі термостата: а) 25°C; б) 40°C.

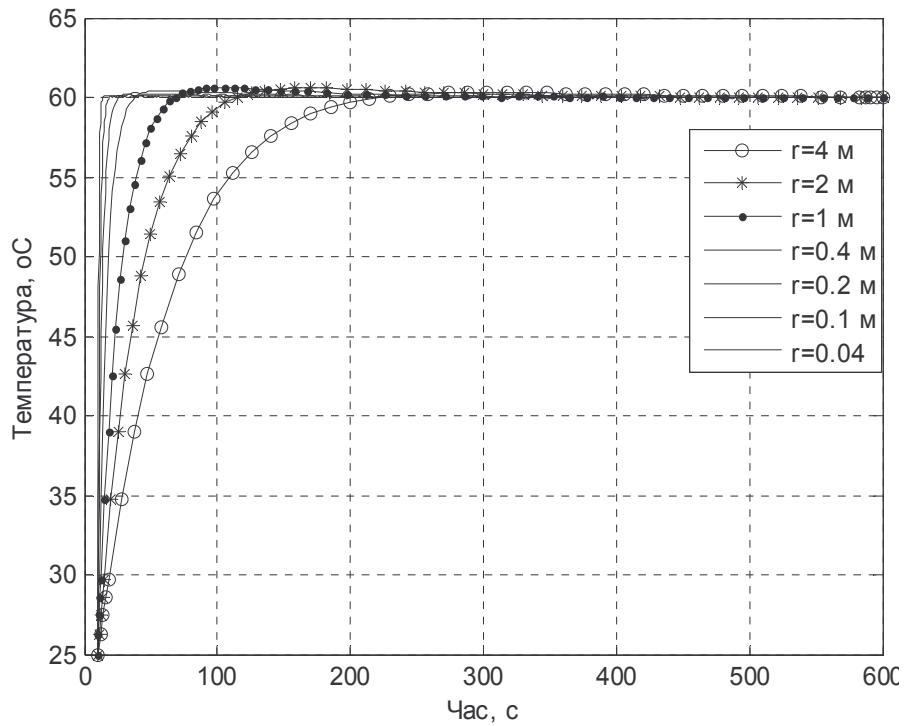
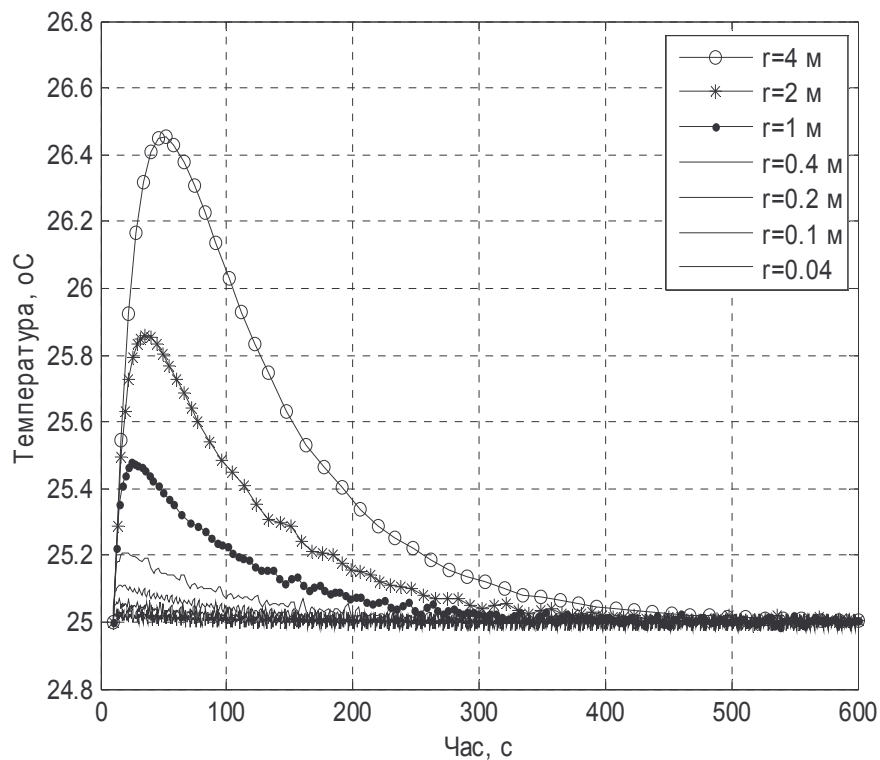


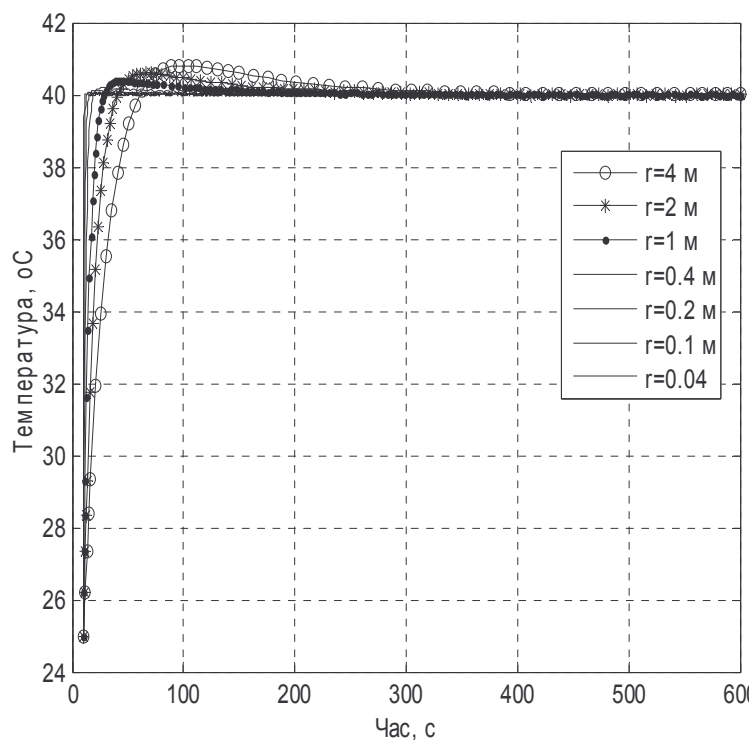
Рис. 5. Часова залежність температури в реакторі з оболонкою зі сталі товщиною 1 мм при температурі термостата 60°C.

У зв'язку з тим, що теплопровідність дюралюмінію в 3 рази вища, ніж сталі (160 і 52 Вт/м·К відповідно [5]), максимальне перегрівання реакційної суміші відносно початкової температури для реак-

тора радіусом 4 м при температурі термостата 25°C зменшується в два рази (з 3°C до 1,4°C), а відхилення від ізотермічного режиму для всіх інших конструкцій не перевищує 1°C (рис. 6, 7).



а)



б)

Рис. 6. Часова залежність температури в реакторі з оболонкою із дюралюмінію товщиною 1 мм при температурі термостата: а) 25°C; б) 40°C.

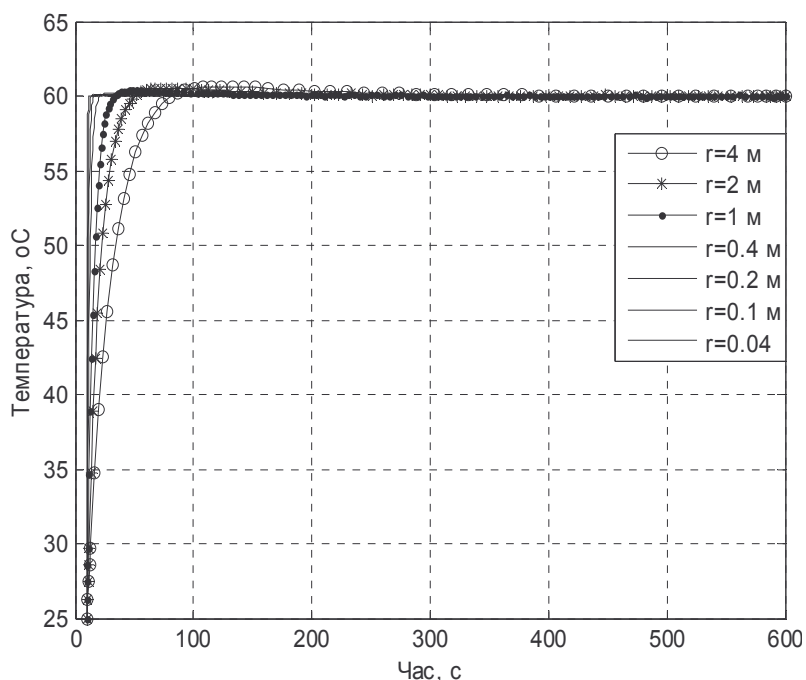


Рис. 7. Часова залежність температури в реакторі з оболонкою із дюралюмінію товщиною 1 мм при температурі термостата 60°C.

Порівняльний аналіз температурних режимів реактора з оболонкою зі склопластику, сталі та дюралюмінію показав, що для виготовлення реакторів можна використовувати всі три матеріали, але, враховуючи й інші вимоги до характеристик хімічних

реакторів, найбільш доцільним є використання реактора з оболонкою зі сталі, який відповідає не тільки вимогам хімічної кінетики для підтримання температурної стійкості в реакторі переестерифікації рослинних олій, а також іншим [6–9], зокрема:

- безпека: механічна міцність реактора з нержавіючої сталі гарантує безпечну роботу і довгий термін служби;

- стійкість: нержавіюча сталь стійка до великої кількості агресивних реагентів навіть у процесі тривалого використання та під впливом високих температур;

- довговічність: даний матеріал не піддається негативному фізичному та хімічному впливу, в тому числі й корозії; аналогів нержавіючої сталі не виявлено;

- екологічність: вироби з нержавіючої сталі не вимагають фарбування або обробки захисними засобами;

- прийнятна ціна: такі вироби характеризуються порівняно невисокою вартістю.

Одним із шляхів удосконалення процесу перетворення енергії біомаси в біодизельне паливо при переестерифікації рослинних олій є використання при проектуванні та експлуатації хімічних реакторів температурних режимів, які визначаються на основі запропонованого методу, при змінній із часом інтенсивності джерел тепловиділення та конструктивних параметрів, що впливають на теплову стійкість протікання хімічного процесу. Це дасть змогу адекватно визначати тривалість вирівнювання температури реагуючої суміші в об'ємі реактора відповідно до вимог хімічної кінетики.

Насамкінець зазначимо, що наведені вище результати розрахункового аналізу, а також результати, наведені в даному розділі, свідчать про те, що під час реакції переестерифікації рослинних олій у біодизельне паливо виділяється незначна кількість теплоти, яка не може привести до перевищення допустимих значень, у той же час дещо збільшуючи продуктивність реактора. Враховуючи цю обставину, штучне термостатування реакційної суміші можна не проводити, що дозволяє спростити конструкцію реактора ідеального змішування періодичної дії. Для удосконалення процесу перетворення енергії біомаси при переестерифікації рослинних олій у біодизельне паливо слід враховувати специфіку конструктивних характеристик та режимів експлуатації реакторів переестерифікації різної форми та розмірів.

**Висновки.** 1. На основі аналізу динаміки

зміни температури реагуючої суміші в реакторі переестерифікації з часом запропоновано враховувати вплив конструктивних параметрів реактора на протікання процесу, а для матеріалу оболонки корпусу реактора використовувати нержавіючу сталь.

2. Показано, що при проектуванні та конструюванні біореакторів для отримання біодизельного палива з рослинних олій слід враховувати їх радіус та матеріал оболонки, які впливають на температурний режим процесу перетворення енергії біомаси. Рекомендовано використовувати реактори з природним охолодженням, підвищення поточної температури реагуючої суміші в яких складає близько 10°C, що не впливає на загальний вихід продукту (біодизелю), але дозволяє скоротити час перебігу процесу переестерифікації рослинних олій та спростити конструкцію реактора ідеального змішування періодичної дії.

1. Будько М.А. Определение температурного режима в реакторе переэстерификации растительных масел в биодтопливо периодического действия / М.А. Будько, А.Г. Грицай, А.Г. Дидковская // Международный научный журнал "Альтернативная энергетика и экология" – 2013. – № 3. – (Ч.1). – С. 108–114.

2. Будько М.О. Розрахунок теплового ефекту реакції переестерифікації соняшникової олії метиловим спиртом // Відновлювана енергетика. – 2012. – № 2. – С. 77–80.

3. Будько М.О. Аналіз результатів експериментального дослідження впливу концентрації каталізатора та температури на перебіг реакції переестерифікації соняшникової олії метиловим спиртом / М.О. Будько, О.І. Василькевич // Відновлювана енергетика. – 2012. – № 1. – С. 78–84.

4. Будько М.О. Математичне моделювання процесу перетворення енергії біомаси в реакторах переестерифікації / М.О. Будько // Відновлювана енергетика XXI століття: XV міжнар. конф., 15 – 17 вер. 2014 р. : тези допов. – Київ, 2014. – С. 445–446.

5. Коротких А.Г. Теплопроводность материалов: учебное пособие / А. Г. Коротких; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 97 с.

6. *Материаловедение и технология металлов* / В.Т. Жадан, П.И.Полухин и др. – М.:Металлургия, 1994. – 624 с.

7. *Справочник металлста.* В 5-ти т. Т.2 / Под ред. А.Г.Рахштадта, В.А.Брострема. – М.:Машиностроение, 1976. – 720 с.

8. *Энциклопедический словарь юного техника* / Сост. Б.В. Зубков, С.В.Чумаков. – М.:Педагогика, 1987. – 464 с.

9. *Гузова В.В., Синенко Е.Г. и др. "Прикладная механика: учебное пособие."* – 3-е издание, перераб. и доп. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2003. – 218 с.