

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

РОЗРАХУНОК РЕАКТОРА- ПОЛІМЕРИЗАТОРА

Рекомендації до виконання розрахункової роботи

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра,
за освітньою програмою «Комп'ютерно-інтегровані технології проектування
обладнання хімічної інженерії»
спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»*

Укладачі: М.П. Швед, А.Р. Степанюк

Електронне мережеве навчальне видання

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2024

УДК: 678.029

Л 837

Укладач: *Швед Микола Петрович*, канд. техн. наук, доцент
Степанюк Андрій Романович, канд. техн. наук, доцент

Рецензент: *Сокольський Олександр Леонідович*, докт. техн. наук, доц.
КПІ ім. Ігоря Сікорського, ІХФ, кафедра ХПСМ

Відповідальний редактор *Корнієнко Ярослав Микитович*, д-р техн. наук, проф.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол N 5 від 06.03.2024 р.)
за поданням Вченої ради інженерно-хімічного факультету
протокол N 1 від 27.01.2025 р.)*

Електронне мережне навчальне видання

Швед М.П., Степанюк А.Р.

Л 837 Розрахунок реактора-полімеризатора [Електронний ресурс]: рек. до виконання розрахункової роботи: навч. посіб. для студ. ступеня бакалавра за освітн. програмою «Комп'ютерно-інтегровані технології проектування обладнання хімічної інженерії» спец. 133 «Галузеве машинобудування» / М.П. Швед, А.Р. Степанюк; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електрон. текст. дані (1 файл). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. – 36с.

У посібнику викладено мету, завдання та основні вимоги до виконання розрахункової роботи, склад, обсяг і структура, вимоги до оформлення, рекомендації щодо порядку захисту та критерії оцінювання розрахункової роботи. Наведена рекомендована література та перелік посилань, зразки титульного листа розрахункової роботи, змісту та приклад оформлення переліку скорочень, умовних позначень та термінів. Всі необхідні довідкові дані для виконання розрахункової роботи наведені в тексті посібника. Навчальний посібник призначений для здобувачів ступеня бакалавр за спеціальністю 133 Галузе машинобудування.

УДК: 678.029

Реєстр. № НП 24/25-264. Обсяг 0,95 авт. арк.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
проспект Берестейський, 37, м. Київ, 03056
<https://kpi.ua>

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців, виготовлювачів
і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 5354 від 25.05.2017 р.

© М.П. Швед, А.Р. Степанюк, 2024

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024

Зміст

Вступ.....	4
1 Опис процесу і конструкції апарата	5
2 Методика розрахунку.....	15
3 Вихідні дані.....	22
4 Алгоритм розрахунку.....	23
5 Склад, обсяг і структура розрахункової роботи	25
6 Вимоги до оформлення розрахункової роботи	28
7 Рекомендації щодо порядку захисту розрахункової роботи.....	29
8 Рекомендована література.....	30
Перелік посилань.....	32
Додаток А Приклад оформлення титульного листа розрахункової роботи ...	33
Додаток Б . Приклад оформлення змісту розрахункової роботи	34
Додаток В. Приклад оформлення Переліку скорочень, умовних позначень та термінів.....	35
Додаток Г. Завдання до розрахункової роботи	36

Вступ

Освітній компонент «Процеси вироблення високомолекулярних сполук» сприяє покращенню формування базових знань основних процесів та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв.

Розрахункова роботи розроблена відповідно до силабусу освітнього компоненту «Процеси вироблення високомолекулярних сполук» освітньо-професійної програми підготовки бакалавра «Комп'ютерно-інтегровані технології проектування обладнання хімічної інженерії», спеціальність 133 «Галузеве машинобудування».

1 Опис процесу і конструкції апарата

Матеріал викладено за авторами [1-3]. Полістирол є одним із найвідоміших синтетичних, термопластичних полімерів. Виробництво полістиролу, не зважаючи на конкуренцію з боку нових матеріалів, продовжує зростати завдяки легкості формування виробів, прекрасним діелектричним властивостям, хімічній стійкості, легкості забарвлення, а також прозорості й хорошим оптичним властивостям. Полістирол отримують шляхом вільнорадикальної полімеризації стиролу. В Україні полістирол одержують блочним і суспензійним методами (м. Горлівка).

Властивості і застосування полістиролу.

Термопластичний матеріал полістирол є відмінним діелектриком, має високу твердість, хімічно стійкий за відношенням до кислот і лугів, крім оцтової та азотної кислоти. Полістирол не розчиняється в аліфатичних вуглеводнях, простих ефірах, нижчих спиртах та фенолах. Розчиняється в хлорованих і ароматичних вуглеводнях, в ацетоні, в складних ефірах і у власному мономері. Полістирол стійкий до радіоактивного опромінення, однак до ультрафіолетових променів його стійкість невелика. Він легко забарвлюється, без складнощів склеюється і формується, добре піддається обробці механічними способами. Полістирол має високу морозостійкість і вологостійкість, а також низьке вологопоглинання. Сам полімер фізіологічно нешкідливий, а вироби з нього глянцево покривають. Полімер загального призначення крихкий, має малу теплостійкість і низьку ударну міцність, температура втрати стійкості 90-95°C.

Гомополімер менш широко застосовується, ніж різні співполімери стиролу, що мають, у порівнянні з гомополімером, підвищені експлуатаційні властивості. Наприклад, ударостійкий полістирол має підвищені показники ударної в'язкості і широкий діапазон температур. Основним недоліком такого полістиролу є низька світлостійкість і термостійкість, яка пов'язана з

наявністю каучукової фази. У невеликих кількостях виробляють шляхом екструзії плівки та нитки. Використовують його як конструкційний матеріал, замість дерева і металів, для виготовлення корпусів приладів і апаратів, об'ємних деталей побутових і промислових холодильників, ємкостей, бутлів, посуду разового користування, меблів, конторського обладнання, іграшок, освітлювальних приладів і арматури до них, валіз, авторучок, тощо. Це один з найбільш дешевих і доступних пластиків.

Галузі застосування АБС-пластиків досить різноманітні. Гарна хімічна стійкість і здатність до переробки екструзією забезпечили їм широке застосування в виробництві труб для нафтової промисловості, гальванічних ванн та ін. Висока механічна міцність і здатність до металізації дають можливість використовувати АБС-пластиків для виготовлення деталей автомобілів. Вони широко застосовуються в електро- і радіотехніці для виготовлення корпусів приладів і окремих деталей, у будівництві для виготовлення санітарно-технічних виробів та ін.

Стирол належить до мономерів, здатних полімеризуватись під дією ініціаторів різного типу: вільнорадикальних, аніонних, катіонних, координаційно-іонних, а також під дією різного роду випромінювань. Стирол також легко полімеризується спонтанно під дією кисню при нагріванні за механізмом термічної полімеризації. Кінетика і механізм полімеризації стиролу, а також будова і властивості полімерів і кополімерів стиролу добре вивчені. Встановлено, що полістирол, одержаний полімеризацією за радикальним механізмом, є аморфним, а одержаний іонно-координаційною полімеризацією, залежно від типу каталізатора, може бути аморфним або кристалічним. Ізотактичний полістирол, що одержаний у присутності стереоспецифічних каталізаторів Циглера-Натта, в процесі переробки при нагріванні вище температури плавлення (близько 250°C), незворотно переходить в аморфний стан. Тому основний практичний інтерес представляють аморфні полімери стиролу. У промисловості аморфний полістирол і співполімери стиролу одержують різними технічними методами.



Полімеризація в розчині не набула значного розповсюдження, так як полімер одержують порівняно невеликої молекулярної маси, а виділення його з розчину має значні складнощі. До того ж полістирол не може бути використаний у вигляді розчину (лаку, клею і т. ін.) внаслідок крихкості і, відповідно, низької ударної міцності лакового покриття або клейового шва.

Блочний спосіб полімеризації стиролу.

Процес полімеризації стиролу в масі (блочний метод) проводиться як періодичними, так і безперервними способами, звичайно у дві стадії:

- а) спочатку одержують сиропоподібний розчин полімеру в стиролі (форполімер), який містить 30-35% полістиролу;
- б) потім, при подальшому продовженні процесу полімеризації, одержують готовий полімер, в якому присутній 0,5-1,0% стиролу.

Проведення полімеризації стиролу до повної конверсії мономера відбувається без ініціаторів безперервним способом в апаратах колонного типу за принципом ідеального витискання.

СТАДІЇ:

- 1) форполімеризація до ступеня конверсії 30% при $t=70-80^{\circ}\text{C}$, реактор обладнаний мішалкою ($n=1-2$ об/хв);
- 2) полімеризація в полімеризаторі (колона, яка складається з секцій (царг) зі своїми оболонками і температурою, висота колони 11 м, діаметр 1,0-1,5 м).

Температуру в апараті поступово піднімають від $85-110^{\circ}\text{C}$ у верхній секції до 230°C у конусному днищі:

1 секція – 85-110°C;

2 секція – 145-150°C;

3 секція – 160-165°C;

4 секція – 215-220°C;

5 секція – 225-230°C;

6 секція – 230-235°C.

Тривалість процесу 18-30 годин.

ОСОБЛИВОСТІ:

- необхідність відведення тепла від в'язкої малотеплопровідної маси;
- різке зниження швидкості процесу при ступені конверсії 90% викликає зростання тривалості реакції і вимагає підвищених температур;
- низька молекулярна маса і широкий молекулярно-масовий розподіл;
- вміст близько 0,5% мономера в полімері.

Полімеризація стиролу в масі з неповною конверсією мономера Процес здійснюють до 90-95% конверсії мономера в батареї реакторів (від двох до чотирьох), а непрореагувавший стирол відганяється в спеціальній вакуумній камері і повертається в процес. Також можна використовувати і розчинники (5-8%) для зниження в'язкості середовища.

Виробництво полімерів і співполімерів стиролу суспензійним способом.

Завдяки наявності водного дисперсійного середовища поліпшується відвід тепла екзотермічної реакції, що полегшує регулювання роботи реактора, забезпечує можливість широкого варіювання умов процесу та, як наслідок, отримання більшого асортименту марок полістиролу. Суспензійний полістирол має вузький молекулярно-масовий розподіл, велику ударну в'язкість і теплостійкість. Більш низький залишковий вміст мономера в готовому продукті (до 0,1% мас.) дозволяє застосовувати його для виробництва виробів, що контактують з харчовими продуктами. Недоліками суспензійних

процесів полімеризації стиролу є багатостадійність, наявність значної кількості стічних вод, а також складність їх переведення на безперервну технологічну схему.

Збільшення одиничного об'єму реактора до 100 м³ дозволяє довести випуск суспензійного полістиролу до 15000...18000 т/рік з однієї технологічної нитки. Суспензійну полімеризацію і співполімеризацію стиролу проводять у водному середовищі в присутності ініціаторів, розчинних у мономері (0,1... 1% мас. до маси мономера). Ефективність таких ініціаторів різна. Найбільш ефективним, доступним, а тому і найбільш затребуваним ініціатором є пероксид бензоїлу, концентрацію якого прийнято варіювати від 0,1 до 0,5% до маси мономера.

У процесі суспензійної полімеризації було виділено три основні періоди. Протягом першого періоду (до ~30% мас. конверсії стиролу в полімері) спостерігається тенденція окремих частинок рідкого мономера до з'єднання. У другому періоді (при ступені конверсії від 30 до 70% мас.) {спочатку – розчин полімеру в мономері, а потім розчин мономера в полімері}, краплі якого при цьому набувають підвищену в'язкість, а тому виявляють тенденцію до злипання в грудки.

За мірою поглиблення полімеризації (3-й період – при конверсії мономеру >70% мас.) гранули полімеру поступово перетворюються в тверді частинки кулястої форми, і втрачають здатність до злипання. Для забезпечення стійкості реакційної системи та запобігання злипання крапель мономера і гранул полімеру в реакційну систему вводять стабілізатори в кількості 0,1...5% мас. від маси води. В якості стабілізаторів використовують водорозчинні полімери (полівініловий спирт, співполімери вінілацетату і вінілового спирту, співполімери метакрилової кислоти з метилметакрилатом, карбоксиметилцелюлозу, крохмаль, желатин та ін.), а також нерозчинні в воді неорганічні сполуки, такі як бентоніт, каолін, гідроксиди магнію і алюмінію. Найбільш стійка суспензія і дрібні гранули виходять при застосуванні

полівінілового спирту (0,2 ... 0,5%), що містить 8... 20% мас. неомилених ацетатних груп.

При застосуванні більшості стабілізаторів доцільно підтримання в реакційній системі слабкокислих середовищ ($\text{pH} = 4\text{...}6$), що досягається введенням буферних добавок – фосфатів, карбонатів. Для кожної реакційної системи існує оптимальне співвідношення об'ємів мономера і води. Вміст води не впливає на швидкість полімеризації, але зменшення кількості води призводить до зниження стійкості дисперсії, а збільшення – зменшує продуктивність установки. Кінцевий продукт полімеризації – частинки полімеру кулястої форми з розміром 0,1...2 мм, які легко відділяються від водної фази центрифугуванням або фільтруванням.

Полістирол для спінування, а також ударостійкий полістирол виробляють у промисловості періодичним блочно-суспензійним методом. Сутність цього методу полягає в проведенні стадії полімеризації в 2 ступені. Спочатку одержують форполімер (продукт попередньої полімеризації стиролу в масі при 80...85°C протягом 6...9 год до конверсії 30...42% або продукт попередньої полімеризації розчину каучуку в стиролі до конверсії 25 ... 40% – у разі отримання УПС). Потім форполімер диспергують у водній фазі при перемішуванні і нагрівають суспензію при 90°C протягом 7...9 год під тиском до 0,8 МПа до отримання твердих гранул. Одним із серйозних недоліків полістиролу є його невисока стійкість до ударних навантажень (крихкість).

При співполімеризації можна збільшити розчинність полімеру, його еластичність, адгезійні властивості, теплостійкість, механічну міцність та інші показники. Стирол легко співполімеризується з багатьма мономерами. Практичне застосування знайшли співполімери стиролу з метилметакрилатом, акрилонітрилом, 23 α -метилстиролом, вінілкарбазолом, вінілтолуолом, бутадієном, дивінілбензолом. Більшість з перерахованих кополімерів одержують у промисловості суспензійним або блочно-суспензійним способом.

Виробництво полімерів і співполімерів стиролу емульсійним способом.

У виробництві полістиролу емульсійний спосіб ведення полімеризації менш затребуваний у порівнянні з блоковим і суспензійним. Емульсійний полістирол має більш високу молекулярну масу, найменший розмір полімерних частинок і застосовується, головним чином, для одержання пінополістиролу з уявною густиною не менше 100 кг/м^3 . Емульсійна полімеризація застосовується для отримання кополімерів стиролу з іншими вініловими мономерами. Серед кополімерів найбільш затребувані кополімери стиролу з бутадієном у виробництві емульсійних синтетичних каучуків марок СКС, а також ударостійкий полістирол марок СНП, УПС та АБС-пластики, кополімери стиролу з α -метилстиролом, відомі під маркою САМ і САМП. У промисловості емульсійні процеси реалізовані як в періодичному, так і в безперервному варіантах.

Типовий технологічний процес виробництва полістиролу періодичним емульсійним способом складається з наступних стадій:

- 1) підготовка компонентів;
- 2) полімеризація;
- 3) коагуляція (осадження) полістиролу;
- 4) центрифугування і промивання полімеру;
- 5) сушіння, просівання, грануляція полістиролу;
- 6) розфасування та упакування готового продукту.

Емульгаторами є поверхнево-активні речовини: натрієві або калієві солі стеаринової, олеїнової кислот, солі аліфатичних або ароматичних сульфокислот (лаурилсульфат, дибутилнафталінсульфат, додецилбензолсульфат натрію) в кількості $0,1 \dots 3\%$ мас. Зі збільшенням вмісту емульгатора зростає швидкість полімеризації, знижується молекулярна маса полімеру і зменшується розмір часток до $0,1 \dots 5 \text{ мкм}$. Ініціатори емульсійних процесів – водорозчинні пероксиди та гідропероксиди (пероксид водню, персульфати калію та амонію).

Для зниження температури полімеризації з 50...90°C до 15...20°C додають прискорювач розпадання ініціаторів та ініціювання процесу здійснюють окислювально-відновними системами: «персульфат калію – тіосульфат натрію», «гідропероксид водню – сульфат заліза (II) »та ін. Окислювально-відновні ініціюючі системи вимагають регулювання рН середовища за допомогою додавання буферних добавок (ацетати і фосфати натрію). Довжину полімерних ланцюгів регулюють додаванням активних 24 переносників ланцюга (додецілмеркаптан або діізопропілксантогендісульфід). Ефективним коагулянтном для полістирольних латексів є водний розчин алюмокалієвих галунів $KAl(SO_4)_2$.

Опис принципу дії реактора-полімеризатора.

Реакцією полімеризації називають процес з'єднання багатьох молекул мономеру у велику молекулу полімеру. Варто зазначити, що полімеризація (співполімеризація) супроводжується змінами в реакційній масі, з яких найбільш важливими є наступні:

- в'язкість безперервно зростає від сотих часток пуаза до 10^6 пуаз;
- полімеризація супроводжується виділенням значної кількості тепла, яка становить 168 ккал/кг (700 кДж/кг);
- реакція супроводжується зменшенням об'єму маси;
- зміною густини, густина полімеру – 1050 кг/м³, густина мономеру – 905 кг/м³.

Незважаючи на те, що існує багато типів установок і способів для промислової полімеризації стиролу, всі конструкції характеризуються двома основними факторами:

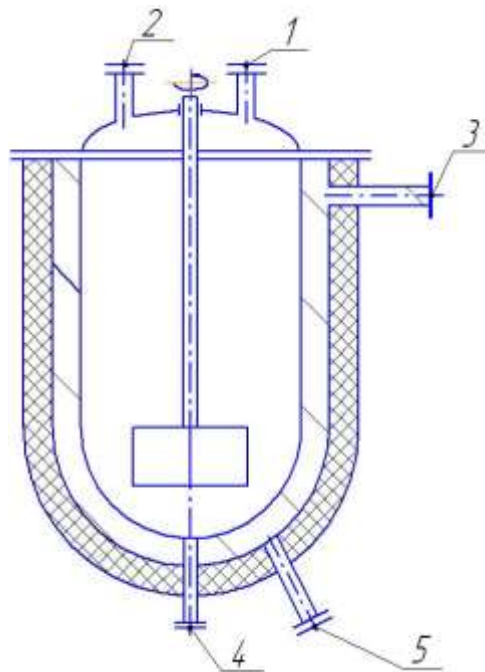
- 1) кінетичними межами процесу;
- 2) екзотермічною природою реакції і, як наслідок, необхідністю запобігання теплового вибуху.

Другий з цих факторів – проблема тепловідведення в умовах високов'язкого середовища є обмежуючим фактором, особливо при здійсненні процесу в промислових масштабах.

Одним із основних елементів технологічної схеми виробництва полімеру є реактор-полімеризатор, який є апаратом ємнісного типу з механічним перемішуючим пристроєм (рисунок 1). Апарат оснащений оболонкою (або іншими теплообмінними пристроями) через яку пропускається теплоносії. Розглянемо роботу апарату на прикладі процесу співполімеризації стиролу з каучуком.

Вихідна суміш – розчин каучуку в стиролі надходить з розчинника з вихідною концентрацією C_n безперервним потоком через штуцери 1 та 2. Коефіцієнт заповнення реактора $\gamma = 0,7$. Решта об'єму апарату заповнена азотом.

Схема апарату наведена на рисунку 1.



1, 2 – штуцери подачі реакційної маси; 2 – штуцер подачі охолоджуючого середовища; 4 – штуцер відводу продуктів реакції; 5 – штуцер відводу охолоджуючого середовища.

Рисунок 1 – Схема реактора-полімеризатора

У реакторі при температурі $\theta_{\text{сп}}$ (температура співполімеризації) та перемішуванні відбувається реакція співполімеризації стиролу з каучуком. Ступінь конверсії (перетворення) ω %, тобто, на виході з апарата реакційна маса містить ω % полімеру. Продукти реакції відводяться через штуцер 4.

Перебіг процесу залежить від багатьох факторів, найважливішим з яких є температура співполімеризації.

Основним недоліком розглянутої конструкції реактора-полімеризатора є мала продуктивність, що пов'язано зі складнощами у відводі теплової енергії. Для цього в оболонку через штуцер 2 подається охолоджуюче середовище, зазвичай це вода, яка відводиться через штуцер 5.

2 Методика розрахунку

Метою розрахунку є визначення оптимальної кількості обертів для даного типу перемішуючого пристрою та визначення складових рівняння теплового балансу реактора-полімеризатора для співполімеризації стиролу з каучуком.

Вихідними даними для розрахунку є:

- характеристики процесу (періодичний, безперервний),
- об'єм реактора,
- коефіцієнт заповнення,
- тип перемішуючого пристрою,
- ступінь конверсії,
- температура співполімеризації,
- теплофізичні властивості реакційної маси в процесі полімеризації.

Рекомендації щодо вибору основних характеристик та рівнянь такі:

1 Визначається об'єм реактора:

$$V = \frac{G \cdot \tau}{\gamma} \quad (1.1)$$

Де G – продуктивність. $\text{м}^3/\text{сек}$,

τ – час перебування в реакторі, сек,

γ – Коефіцієнт заповнення реактора

Після визначення об'єму реактора за залежністю (1.1) приймається найближче більше значення об'єму реактора з таблиці 1.

Таблиця 1 – Розміри реакторів

$V_{\text{ап}}, \text{м}^3$	1	2	4	5	8	10	16
$D_{\text{ап}}, \text{м}$	1	1,2	1,6	1,8	2	2,2	2,6
$F, \text{м}^2$	4,2	6,64	10,8	8,94	16,7	18,8	25,5

2 Обирається тип перемішуючого пристрою. Тип перемішуючого пристрою обирається з урахуванням в'язкості рідини, тому, що саме в'язкість визначає сили, що прагнуть уповільнити потік в системі з перемішуванням. На рисунку 2 зображені рекомендовані межі в'язкості рідин для найбільш розповсюджених типів мішалок.

Питання про вибір перемішуючого пристрою може бути остаточно вирішене, коли будуть визначені стійкі теплові режими реактора, що забезпечують необхідну продуктивність та надійність роботи.

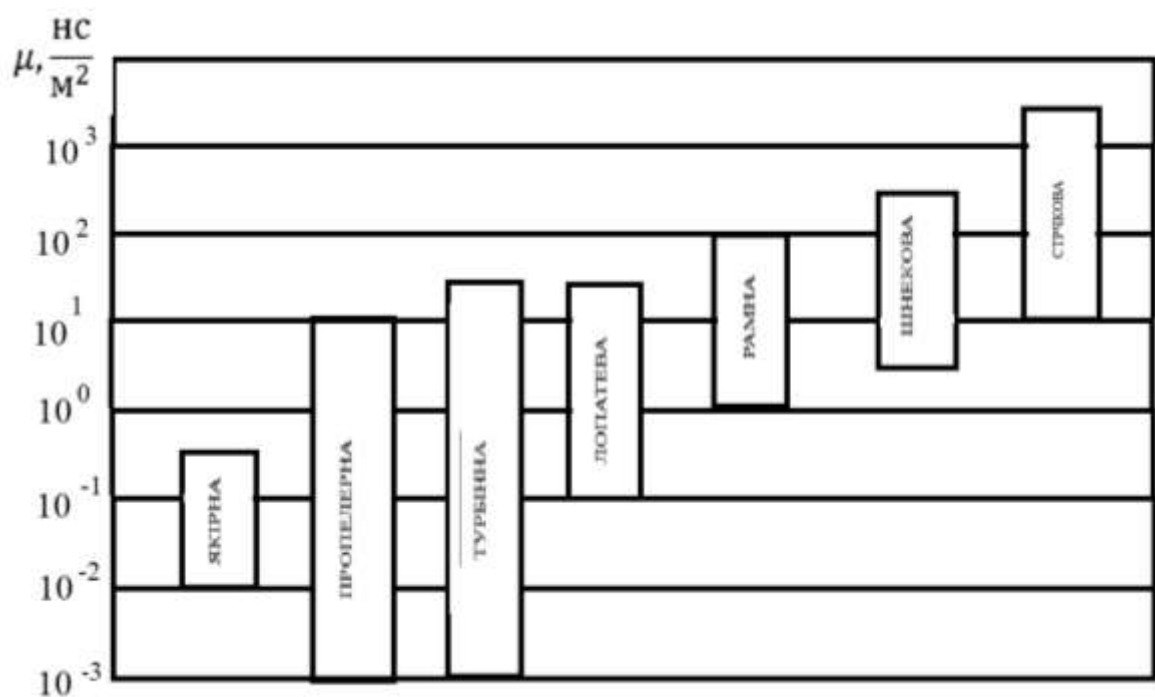


Рисунок 2 – Вибір мішалки в залежності від в'язкості рідини, що обробляється

Відомо, що геометричні співвідношення апарату та перемішуючого пристрою впливають на інтенсивність теплообміну та енергетичні витрати. Тому слід вибирати оптимальні геометричні співвідношення для вибраного типу перемішуючого пристрою.

3 Обирається вид (вода, високотемпературні теплоносії) та параметри теплоносія. Вид теплоносія визначається температурою полімеризації та можливостями виробництва. При виборі теплоносія варто керуватися

рекомендованими значеннями температурного напору на границі стінки – реакційна маса.

Реологічні параметри, що входять до рівняння, K та m визначаються по кривим течії:

$$\mu = f(\gamma),$$

де μ – в'язкість рідин, виміряна при швидкості зсуву, що мають місце в апараті, що розглядається;

K – коефіцієнт консистенції, який є приведеною в'язкістю в координатах $\mu = f(\gamma)$ при швидкості зсуву, що дорівнює 1 с^{-1} ;

m – показник неньютонівської поведінки, що дорівнює $1 - \text{tg}\varphi$,

φ – кут нахилу кривої течії до осі y (рисунок 3).

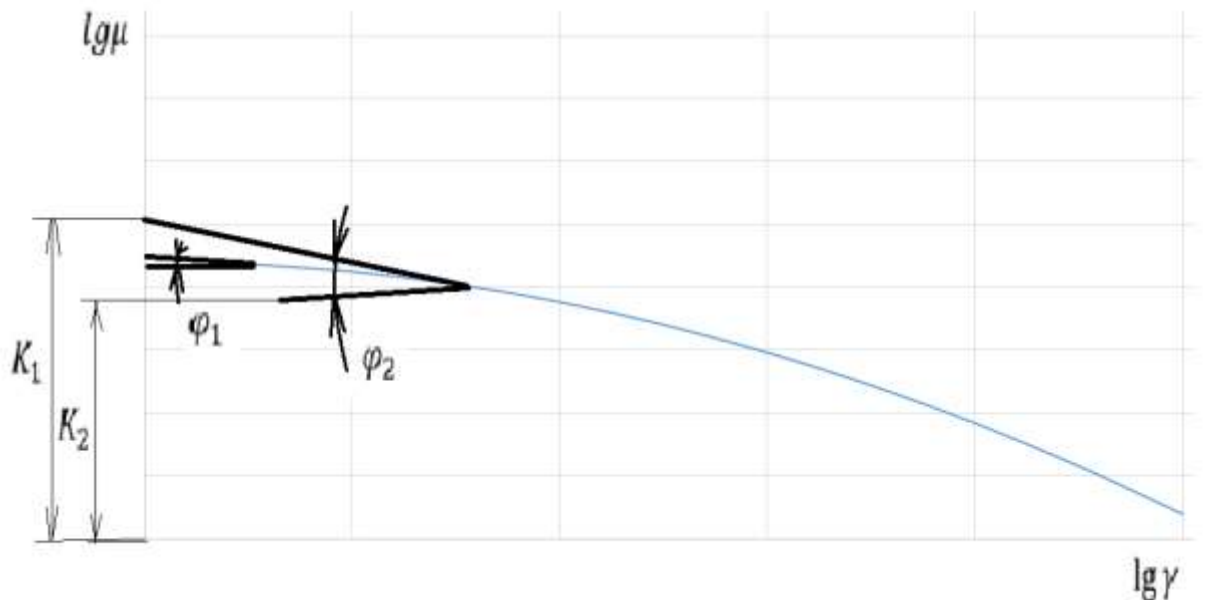


Рисунок 3 – Визначення коефіцієнта K

У реакторах при полімеризації зазвичай температурний напір $\Delta\theta$ знаходиться у межах $\Delta\theta = 7 \dots 26^\circ\text{C}$ при ступені конверсії ω у межах $\omega = 7 \dots 45\%$.

При цьому коефіцієнт консистенції K знаходиться у межах $K = 0,15 \dots 100 \text{ нс/м}^2$

Консистенція з англійської consistency, німецької Konsistenz – коефіцієнт консистенції – ступінь в'язкості або густини напівтвердих-напіврідких речовин (полімерів, мастил, мила, фарб, будівельних та бурових розчинів тощо).

Залежність коефіцієнта консистенції $K = f(\theta_c)$ можна навести як залежність:

$$K = 708 \cdot 10^{-0,0011 \cdot \theta} \quad (1.2)$$

Залежність коефіцієнта консистенції співполімеризації $K_{сп} = f(\theta_{сп})$ можна викласти рівнянням:

$$K_{сп} = 708 \cdot 10^{-0,0011 \cdot \theta_{сп}} \quad (1.3)$$

де $\theta_{сп}$ – температура співполімеризації

$$\theta_{сп} = \theta + \Delta\theta$$

4 Визначається діапазон швидкостей зсуву в апараті з перемішуючим пристроєм. Критерій Нусельта розраховується по залежності:

$$Nu = \frac{C \cdot n}{d_m} [Re^*]^a \cdot [Pr]^b \cdot \left(\frac{K}{K_{сп}}\right)^c, \quad (1.4)$$

де Re^* – перший вираз в квадратних дужках є модифікований критерій Рейнольдса,

Pr – другий вираз критерій Прандтля,

відношення $\frac{K}{K_{сп}}$ – симплекс в'язкості,

ρ – густина суміші, кг/м³,

n – число обертів мішалки, с⁻¹,

d_m – діаметр мішалки, м,

K – коефіцієнт консистенції, н · с/м²,

$K_{сп}$ – коефіцієнт консистенції співполімеризації, н · с/м²,

C , a , b , c – коефіцієнти. Значення коефіцієнту C та показників ступенів a , b , c вибираються по таблиці 2. Вони різні для різних типів перемішуючих пристроїв. Рівняння (1.1) придатне як для ньютонівських, так і для неньютонівських рідин.

Таблиця 2

Тип мішалки	Область визначення $Re_{ц}^*$	C	a	b	c
Лопатева	$4 \dots 10^5$	0,216	0,67	0,33	0,18

Теплофізичні властивості реакційної маси в рівняннях вибирається по таблиці 3.

Таблиця 3

$\theta_{сп}$	ω	λ	$a \cdot 10^6$	C_p	ρ
°С	%	$\frac{Вт}{м \cdot К}$	$\frac{м^2}{с}$	$\frac{кДж}{кг \cdot К}$	$\frac{кг}{м^3}$
100	10 ... 45	0,191 ... 0,23	0,085 ... 0,087	2,5 ... 2,3	835 ... 910
110	10 ... 45	0,147 ... 0,172	0,094 ... 0,098	1,71 ... 2,35	827 ... 915
120	14 ... 45	0,148 ... 0,172	0,101 ... 0,103	1,8 ... 1,75	818 ... 925

Модифікований критерій Рейнольдса знаходиться за виразом:

$$Re^* = \frac{\rho \cdot n^{2 \cdot m} \cdot d_M^2}{K} \cdot (4\pi)^{1-m} \quad (1.5)$$

де ρ – густина суміші, кг/м³,

n – число обертів мішалки, с⁻¹,

d_M – діаметр мішалки, м,

K – коефіцієнт консистентності, нс/м²,

m – показник ньютонівської поведінки.

Теплофізичні властивості реакційної маси в рівняннях вибирається по таблиці 3.

Критерій Прандтля

$$Pr = \frac{C_p \cdot K \cdot n^{m-1}}{\lambda} (4\pi)^{m-1} \quad (1.6)$$

де n – число обертів мішалки, с⁻¹,

K – коефіцієнт консистентності, н·с/м²,

C_p – теплоємність суміші, кДж/кгК,

λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/мК,

m – показник ньютонівської поведінки.

Теплофізичні властивості реакційної маси в рівняннях вибирається по таблиці 3.

Після підстановки критерій Нусельта матиме вигляд:

$$Nu = \frac{c \cdot \pi}{d_m} \left[\frac{\rho \cdot n^{2 \cdot m} \cdot d_m^2}{K} \cdot (4\pi)^{1-m} \right]^a \cdot \left[\frac{c \cdot K_n^{m-1}}{\lambda} (4\pi)^{m-1} \right]^b \cdot \left(\frac{K}{K_{ct}} \right)^c, \quad (1.7)$$

Коефіцієнт тепловіддачі α розраховується за формулою:

$$\alpha = \frac{\lambda \cdot Nu}{d_m}, \quad \frac{\text{кДж}}{\text{м} \cdot \text{К}} \quad (1.8)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/мК;

Nu розраховується за формулою (2.4).

Ефективний коефіцієнт тепловіддачі визначається за залежністю:

$$\alpha_{\text{еф}} = \alpha - \frac{Q_{\text{дис}}}{F \cdot \Delta\theta}, \quad \text{Вт/м}^2 \quad (1.9)$$

де $Q_{\text{дис}}$ – теплота дисипації, Вт, визначається за рівнянням:

$$Q_{\text{дис}} = \frac{A \cdot \rho \cdot n^3 \cdot d_m^5}{(Re^*)^c}. \quad (1.10)$$

де Re^* – модифікований критерій Рейнольдса знаходиться за виразом (1.5):

ρ – густина суміші, кг/м³,

n – число обертів мішалки, с⁻¹,

d_m – діаметр мішалки, м,

Значення коефіцієнта A і показника ступеня c в рівнянні (1.10) вибирається з таблиці 4 в залежності від типу перемішуючого пристрою і режиму руху.

Таблиця 4

Тип мішалки	Область Re^*	c	A
Лопатева	1 ... 10 ⁵	2,76	-1

Теплофізичні властивості реакційної маси в рівняннях вибирається по таблиці 3.

Далі будується графік $\alpha_{\text{еф}} = f(n)$. Приклад графіка наведено на рисунку 4. Оптимальне число обертів визначається по екстремальній точці кривої залежності.

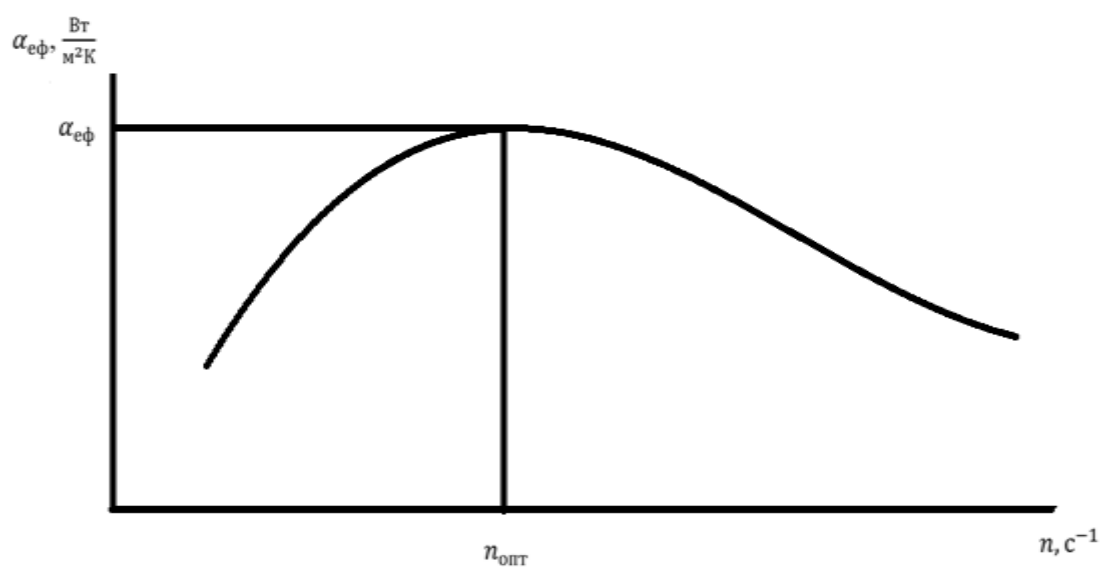


Рисунок 4 – Визначення $n_{\text{опт}}$

3 Вихідні дані

Процес	безперервний
Продуктивність, м ³ /сек	$G=(0,0032N\text{вар})$
Час перебування в реакторі, сек	$\tau=(100+10N\text{вар})$
Теплоносій	вода
Мішалка	Лопатева
Коефіцієнт теплопровідності	$\lambda = 0,15 \text{ Вт/мК}$
Густина	$\rho = 903 \text{ кг/м}^3$
Питома теплоємність	$C_p = 1,748 \text{ кДж/кгК}$
Об'єм апарата	$V_{\text{ап}} = 17 \text{ м}^3$
Питома теплота полімеризації	$q = 700 \text{ кДж/кг}$
Коефіцієнт заповнення	$\gamma = 0,7$
Степінь конверсії	$C_n = (5 + 0,01N\text{вар})\%$
Температура полімеризації	$\theta_{\text{сп}} = 100^\circ\text{C}$
Оптимальний температурний напір	$\Delta\theta = (10 + 0,1N\text{вар}) \text{ } ^\circ\text{C}$
Показник неньютонівської поведінки	$m = 0,7$

4 Алгоритм розрахунку

Розрахунок ведемо в такій послідовності:

1 Задаємося вихідними даними. При цьому вважаємо, що властивості реакційної маси: густина, теплопровідність, теплоємність змінюються незначно та їх можна вважати постійними. Це впливає з результатів експериментальних досліджень. Характеристика процесу, коефіцієнт заповнення апарата, об'єм апарата, початкова концентрація, ступінь конверсії нам відомий з умов процесу. Отже маємо вихідні дані:

ρ – густина реакційної маси, кг/м³

C_p – теплоємність реакційної маси, кДж/кгК

λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/мК

γ – коефіцієнт заповнення,

$V_{\text{ап}}$ – об'єм апарата, м³

C_n – початкова концентрація розчину каучуку в стиролі, %

ω – ступінь конверсії, %

F – поверхня апарата, м²

$F_{\text{ап}}$ – поверхня теплообміну, м²

2 Грунтуючись на рекомендаціях дослідників (рисунок 1.2) вибираємо тип пристрою, що перемішує, у випадку виконання розрахункової роботи, тип пристрою задано.

3 Обираємо вид теплоносія. Найбільш широко розповсюдженим теплоносієм є вода. Температура охолоджуючої води буде визначатися величиною вибраного температурного напору. Обираємо величину температурного напору згідно з завданням.

4 Визначається об'єм реактора за залежністю (1.1).

5 Визначається величини реологічних параметрів:

– коефіцієнт консистенції K за залежністю (1.2);

– коефіцієнт консистенції співполімеризації $K_{\text{сп}}$ за залежністю (1.3);

– показник неньютонівської поведінки. В результаті експериментальних досліджень виявлено, що в ході реакції співполімеризації стиролу з каучуком в робочому діапазоні температур $\theta_{\text{сп}} = 80 + 130^\circ$ показник неньютонівської поведінки залишається постійним (сталим) $m = 0,7$.

6 Визначається оптимальне число обертів, виходячи з ефективності енергетичних затрат:

А) Знаходиться значення модифікованого критерія Рейнольдса за залежністю (1.5).

Б) Знаходиться значення критерія Прандтля залежністю (1.6).

В) Знаходиться значення критерія Нусельта залежністю (1.4).

Г) Знаходиться значення коефіцієнта тепловіддачі залежністю (1.8).

Д) Знаходиться величину теплоти дисипації з виразу (1.10).

Е) Знаходиться значення ефективного коефіцієнта тепловіддачі залежністю (1.9).

Є) Розрахунки за підпунктами А...Г повторюються таку кількість разів, поки виконується умова $4 \leq Re^* \leq 10^5$. Причому $Re^* = \frac{\rho \cdot n^{2 \cdot m} \cdot d_M^2}{K} \cdot (4\pi)^{1-m}$.

Ж) Далі будується графік $\alpha_{\text{еф}} = f(n)$. Зразок наведено на рисунку 1. Оптимальне число обертів визначається по екстремальній точці кривої залежності.

Значення Γ_D та d_M для різних типів мішалок наведено у таблиці 5

Таблиця 5 – Значення Γ_D та d_M для різних типів мішалок

Тип мішалки	Γ_D	$V_{\text{ап}}, \text{м}^3$						
		1	2	4	5	8	10	16
		$d_M, \text{м}$						
Лопатєва	1,4	0,7	0,86	1,1	1,3	1,4	1,6	1,85

5 Склад, обсяг і структура розрахункової роботи

Розрахункова робота складається з розділів, наведених у зразку змісту (Додаток Б). Орієнтовний обсяг 15...25 аркушів формату А4.

Розрахункова робота включає:

- титульний аркуш (Додаток А);
- зміст (Додаток Б);
- перелік умовних позначень, символів, одиниць скорочень і термінів (за необхідності) (Додаток В);
- вступ;
- основна частина;
- висновки;
- перелік посилань;
- додатки (за необхідності).

Зміст аналітичного огляду подається безпосередньо після титульного аркуша, починаючи з нової сторінки (додаток Б). Зміст містить назву та номери початкових сторінок усіх структурних частин роботи.

«ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ СКРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ»

Перелік умовних позначень, символів, одиниць скорочень і термінів складається за умови повторення таких елементів більше трьох разів у тексті та вміщується безпосередньо після змісту, починаючи з нової сторінки. Інакше – їх розшифрування наводяться у тексті при першому згадуванні. Якщо у роботі вжита специфічна термінологія чи використано маловідомі скорочення, нові символи, позначення і таке інше, то їх перелік може бути поданий у вигляді окремого списку, який розміщують перед вступом [4].

Перелік треба друкувати двома колонками, в яких зліва за абеткою наводять скорочення, справа — їх детальне розшифрування.

«ВСТУП»

У вступі коротко надається інформація про призначення та актуальність обладнання. Далі у відповідності до змісту роботи ставляться мета та задачі роботи. В кінці вступу вказується, коли було видано завдання на аналітичний огляд.

Приблизний обсяг розділу – 1 аркуш.

«РОЗРАХУНОК РЕАКТОРА»

Наводиться розрахунок реактора. Наводиться схема екструдера, основні технічні характеристики. Зразок оформлення наведено у прикладі 1.

Приблизний обсяг розділу – 3-4 аркуші.

«ВИСНОВКИ»

У висновку наводяться аналіз результатів роботи.

Приблизний обсяг розділу – 1 аркуш.

«ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ»

Перелік посилань – елемент бібліографічного апарату, котрий містить бібліографічні описи використаних джерел. Порядкові номери джерел у переліку є посиланнями у тексті (номерні посилання). Список використаних джерел складають у тому порядку, за яким джерела вперше згадуються у тексті

або в алфавітному порядку. Відомості про джерела, включені до списку, необхідно давати відповідно до вимог ДСТУ 7.1:2006. Заборонено включати в бібліографічний список ті роботи, на які немає посилань у тексті роботи і які фактично не були використані.

Зразок оформлення наведено у Прикладі 3.

Приклад 3.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Інноваційні технології глибокої переробки органічних матеріал: конспект лекцій [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 133 Галузеве машинобудування, спеціалізації «Інжиніринг та комп'ютерно-інтегровані технології проектування інноваційного галузевого обладнання» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: М.П. Швед, А.Р. Степанюк, Д.М. Швед – Електронні текстові данні (1 файл: 29,8 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 221 с. (Повний текст, pdf, 5.9 Mb)

2. Патент 98758 Україна, МПК В29С 47/38 (2006.01). Черв'ячна машина для перероблення матеріалів з використанням високомолекулярних сполук / Мікульонок І.О., Сокольський О.Л., Сівецький В.І., Куриленко В. М. – u201411336; заявл. 17.10.2014; опубл. 12.05.2015, Бюл.№ 9.

3. ...

4.

6 Вимоги до оформлення розрахункової роботи

Аналітичний огляд є текстовим науковим документом і виконується відповідно ДСТУ 3008:2015 (на зміну 3008-95). Звіти у сфері науки і техніки [4].

Вимоги до форматування розрахункової роботи

Текст аналітичного огляду розділяють на розділи, відповідно до змісту.

Розділи повинні мати порядкові номери в межах усього документа (частини), позначені арабськими цифрами. Підрозділи повинні мати нумерацію в межах кожного розділу. Номери підрозділів складаються з номерів розділів або підрозділу, розділених крапкою. Наприкінці номера розділу або підрозділу крапка не ставиться. Розділи, як і підрозділи, можуть складатися з декількох пунктів.

Найменування розділів повинні бути короткими. Найменування розділів і підрозділів записують у вигляді заголовків з абзацу напівжирним форматом літер. Використання форматування курсивом, підкреслення та переноси слів у заголовках не допускаються. Крапку наприкінці заголовка не ставлять. Якщо заголовок складається з двох речень, їх розділяють крапкою. Розташовувати назву розділу, підрозділу та тексту на різних сторінках забороняється.

Відстань між заголовками розділу і підрозділу – 1,5 інтервали. Кожен розділ пояснювальної записки починають з нового листа (сторінки).

Нумерація сторінок повинна бути наскрізна для всього аналітичного огляду, включаючи додатки.

7 Рекомендації щодо порядку захисту розрахункової роботи

Процедура та порядок захисту розрахункової роботи відбувається за наступною схемою:

- перевірка відповідності зазначеної теми розрахункової роботи, темі вказаній у завданні,
- перевірка викладачем розрахункової роботи, про що свідчить підпис викладача на титульному аркуші розрахункової роботи;
- доповідь по темі розрахункової роботи.

8 Рекомендована література

1. Вступ до хімії полімерів : навч. посіб. / А. М. Скляр. – Суми : Видавництво СумДПУ ім. А. С. Макаренка, 2010. – 80 с.

2. Промислові полімери та Основи технології виробництва полімерних матеріалів: навчальний посібник до дисципліни та практикумів для студентів хімічного факультету / упорядн. І. О. Савченко, В. Г. Сиромятніков. – К. : Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет", 2012. – 112 с.

3. Радченко Л.Б. Переробка термопластів методом екструзії: Наук. посібник. – К.: ІЗМН, 1999. – 220с.

4. Дослідження лінії для виробництва рукавної полімерної плівки. Методичні вказівки до лабораторної роботи / Радченко Л.Б., Ружинська Л.І., Швед М.П., Степанюк А.Р. - К.: НТУУ “КПІ”, 1998. - 44 с.

5. Реологічні властивості неньютонівських рідин: лабораторний практикум з дисципліни Моделювання процесів та обладнання підготовки середовищ та отримання біотехнологічних матеріалів [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 133 «Галузеве машинобудування», спеціалізації «Інжиніринг, обладнання та технології хімічних та нафтопереробних виробництв» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: А.Р. Степанюк, Г.К. Іваницький – Електронні текстові дані (1 файл: 1,4 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 38 с. (Повний текст, pdf, 1.43 Mb)

6. Дослідження реологічних властивостей розплавів полімерів. Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи студентів спеціальності: 133 Галузеве машинобудування, спеціалізація: Інжиніринг, обладнання та технології хімічних та нафтопереробних виробництв, освітньо-кваліфікаційного рівня спеціаліст з дисципліни “Обладнання для синтезу і переробки полімерних матеріалів”: [Електронний ресурс] / „КПІ ім. Ігоря Сікорського”; уклад. М. П. Швед, А. Р. Степанюк. – Київ: НТУУ „КПІ”, 2017. 23с. Повний текст, pdf, 1,12 Mb

7. Радченко Л.Б. Сівецький В.І. Основи моделювання і конструювання черв'ячних екструдерів: Наук. посібник. – К.: Політехніка, 2002. – 152с.

Перелік посилань

1. Інноваційні технології глибокої переробки органічних матеріал: конспект лекцій [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 133 Галузеве машинобудування, спеціалізації «Інжиніринг та комп'ютерно-інтегровані технології проектування інноваційного галузевого обладнання» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: М.П. Швед, А.Р. Степанюк, Д.М. Швед – Електронні текстові данні (1 файл: 29,8 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 221 с. (Повний текст, pdf, 5.9 Mb).

2. Методичні вказівки до виконання практичних робіт з курсу «Технологія виробництва високомолекулярних сполук» для студентів напряму підготовки 6.051301 «Хімічна технологія та інженерія» / Укл.: М.Я. Кузьменко, С.М. Кузьменко, М.В. Бугрим. – Дніпропетровськ: ДВНЗ УДХТУ, 2015. – 60 с.

3. "Промислові полімери" та "Основи технології виробництва полімерних матеріалів" : навчальний посібник до дисципліни та практикумів для студентів хімічного факультету / упорядн. І. О. Савченко, В. Г. Сиромятніков. – К. : Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет", 2012. – 112 с.

4. ДСТУ 3008:2015 (на зміну 3008-95). Звіти у сфері науки і техніки

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ

“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ

ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”

Інженерно-хімічний факультет

Кафедра машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв

РОЗРАХУНКОВА РОБОТА

з дисципліни

ПРОЦЕСИ ВИРОБЛЕННЯ ВИСОКОМОЛЕКУЛЯРНИХ СПОЛУК

на тему: **Розрахунок реактора-полімеризатора**

Виконав студент IV курсу, групи ЛН-01

_____ Іван ІВАНОВ

Галузь знань: 13 «Механічна інженерія»

Спеціальність: 133 «Галузеве машинобудування»

Освітня програма: Комп'ютерно-інтегровані технології
проективання обладнання хімічної інженерії

Перевірив доцент, к.т.н.,

_____ Андрій СТЕПАНЮК

Кількість балів: _____

Київ 2024

Додаток Б . Приклад оформлення змісту розрахункової роботи

Зміст

Перелік умовних позначень, символів, одиниць скорочень і термінів	2
Вступ	3
1 Розрахунок реактора-полімеризатора	10
Висновки	19
Перелік посилань	20

					ЛМ21. 066700.001.ПЗ			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дат</i>				
<i>Розроб.</i>	Поковба				Визначення оптимального числа обертів мішалки реактора–полімеризатора Пояснювальна записка	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрюшів</i>
<i>Перевір.</i>	Степанюк						1	
<i>Н. Контр.</i>						КПІ ім. Ігоря Сікорського		
<i>Затверд.</i>								

Додаток В. Приклад оформлення Переліку скорочень, умовних позначень та термінів

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ

Умовні позначення

V – об’ємна продуктивність, м³/с;

G – масова продуктивність, кг/с;

P – тиск, Па.

Δp – втрати тиску, Па.

n – число ходів, шт.

m – число рядів, шт.

f – питома поверхня

n – частота обертання валу, с⁻¹.

N – потужність, Вт.

Критерії.

Re – число (критерій) Рейнольдса

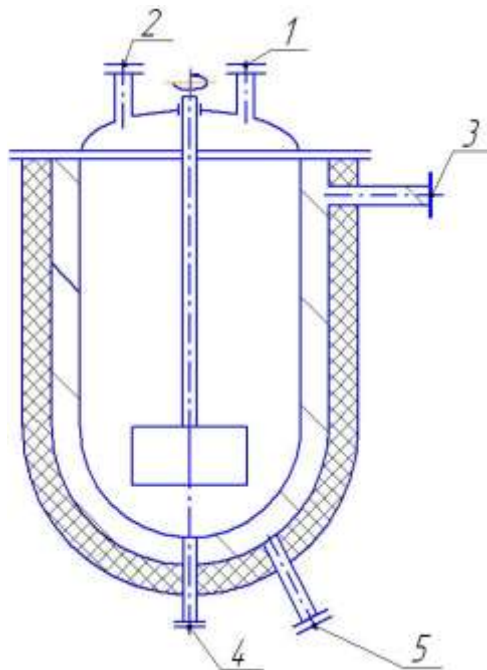
Ar – критерій Архімеда.

					ЛІМ21.066700.001.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		335

Додаток Г. Завдання до розрахункової роботи

Завдання до розрахункової роботи

Визначити оптимальне число обертів реактора-полімеризатора для виробництва полістиролу.



Реактор-полімеризатор

Продуктивність. м³/сек

$$G=(0,0032N\text{вар})$$

Час перебування в реакторі, сек

$$\tau=(100+10N\text{вар})$$

Коефіцієнт теплопровідності

$$\lambda = 0,15 \text{ Вт/м}^\circ\text{С}$$

Степінь конверсії

$$C_H = (5 + 0,01N\text{вар})\%$$

Температура співполімеризації

$$\theta_{\text{сп}} = 100^\circ\text{С}$$

Оптимальний температурний напір

$$\Delta\theta = (10 + 0,1N\text{вар}) ^\circ\text{С}$$

Група	Дата видачі	Студент	Варіант	Завдання видав