

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”  
ІНСТИТУТ ХІМІЇ ТА ХІМІЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

**Біобібліографія вчених  
Львівської політехніки**

**(випуск 47)**

**Ярослав Михайлович  
ГУМНИЦЬКИЙ**

*Біобібліографічний покажчик*

**До 70-річчя від дня народження**

Львів  
Видавництво Львівської політехніки  
2011

УДК 012:504 (477)  
ББК Е081д (4Ук) Гумницький. я1  
Г 945

*Укладач*

В.М. Атаманюк, д-р техн. наук, проф.

**Рецензенти:**

**Білей П.В.** проф., д-р техн. наук, завідувач кафедри Українського національного лісотехнічного університету;

**Суберляк О.В.**, проф., д-р техн. наук, завідувач кафедри Національного університету “Львівська політехніка”

*Рекомендувала Науково-методична рада Інституту хімії і хімічних технологій Національного університету “Львівська політехніка”  
(Протокол № 9 від 12.05.2011 р.)*

**Ярослав Михайлович Гумницький:** Біобібліографічний показник. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2011. – Вип. 47. – 120 с. (Біобібліографія вчених Львівської політехніки).

ISBN 978-617-607-106-8

Відображено наукову і педагогічну діяльність доктора технічних наук, відомого вченого в галузі хімічної інженерії та охорони навколишнього середовища, активного громадського діяча професора Ярослава Михайловича Гумницького. Подано короткий життєвий життєпис та список науковців, що захистили дисертації за його керівництвом.

Для наукових працівників, істориків науки, студентів та всіх охочих довідатися про особисті здобутки ювіляра у галузі фізико-хімії.

**УДК 012:504 (477)**

**ББК Е081д (4Ук) Гумницький. я1**

ISBN 978-617-607-106-8

© Національного університету  
“Львівська політехніка”, 2011

## Зміст

1. Від упорядника .....	4
2. Професор Ярослав Гумницький – вчений, педагог, громадський діяч .....	5
3. Біографія .....	13
4. Теми дисертаційних робіт професора Гумницького Я.М. ....	29
5. Список науковців, керівником та консультантом дисертаційних робіт яких був професор Гумницький Я.М. ....	29
6. Роман Лубківський. Грані особистості. ....	30
7. Геннадій Статюха. Міжнародна співпраця .....	35
8. Войцех Новак. Лист пошани .....	36
9. Роман Петрус. Поздоровлення .....	38
10. Тетяна Вітенько. Творча співпраця.....	40
11. Анотація і бібліографія основних наукових праць .....	54

## **Від упорядника**

Біобібліографічний покажчик підготовлений з нагоди 70-ліття доктора технічних наук, професора Ярослава Михайловича Гумницького, відомого вченого у галузі хімічної інженерії та охорони навколишнього середовища, педагога, громадського діяча. Професор Я. Гумницький віддав праці у Львівській політехніці майже 50 років, пройшов шлях від асистента до професора, завідувача кафедри хімічної інженерії та промислової екології у 1987–2002 роках, відновив спеціальність “Обладнання хімічних виробництв” та організував нову – “Екологія та охорона навколишнього середовища”. Ярослав Михайлович Гумницький підготував велику кількість магістрів та спеціалістів за зазначеними спеціальностями, які завжди тепло відгукуються про нього. Науковці, яким професор Я. Гумницький допоміг в їхніх наукових дослідженнях, вважають себе його учнями і вдячні долі за те, що мали саме такого Учителя, який завжди щедро ділився своїми знаннями, професійним і життєвим досвідом.

У покажчику подано біографічні дані ювіляра, список науковців, що захистили дисертації за його керівництвом і консультаціями, висловлювання колег та анотацію 8 напрямів наукових досліджень з їхньою основною бібліографією. У покажчик не увійшли значна кількість наукових і методичних праць автора та неопубліковані науково-дослідні роботи, а також виступи на наукових конференціях.

***Володимир Атаманюк,**  
за дорученням вдячних учнів  
Ярослава Михайловича Гумницького*

## **Професор Ярослав Гумницький – вчений, педагог, громадський діяч**

Професор, доктор технічних наук Ярослав Гумницький працює у Львівській політехніці з 1963 р. на посадах асистента, старшого викладача, доцента, професора, завідувача кафедри. Науковий доробок проф Я.М. Гумницького становить понад 400 наукових статей, доповідей і тез доповідей, патентів та понад 40 науково-методичних розробок.

Як видно з поданих нижче анотацій наукових праць, усі дослідження логічно поділено на 8 напрямів, кожен з яких є причетним до масообміну з твердою фазою. Їх відмінності проявляються у наявності інших фаз, що взаємодіють з твердою, різних гідродинамічних ситуаціях, ролі теплових явищ, методах інтенсифікації масообміну.

Перші три розділи анотацій стосуються масообміну в системі твердого тіла-рідини (розчинення та екстрагування), у якому важливу роль відіграє газоподібна фаза. Її застосування має інтенсифікувальну властивість і автор досліджує різні приклади використання цієї фази.

У першому розділі досліджено вплив зовнішнього газопідведення, коли основна роль газової фази зводиться до створення турбулентних пульсацій рідини, що зменшує товщину пограничного дифузійного шару і, відповідно, збільшує коефіцієнт масовіддачі.

У другому розділі проаналізовано дифузійно-контрольовані хімічні взаємодії між твердим тілом та рідким реагентом, що супроводжуються виділенням газової фази. Автор назвав цей процес “хімічним кипінням”, що вказує на його аналогію зі суто фізичним процесом теплообміну під час кипіння рідини, який широко застосовують у промисловості (наприклад, одержання пари для урохомлення турбін на теплових і ядерних електростанціях). Експериментально підтверджено наявність двох ефектів за рахунок газової фази: з одного боку – руйнування пограничного дифузійного шару та створення умов нестационарності, а з другого –

часткова ізоляція поверхні твердої частинки газовими бульбашками, що зменшує доступ до поверхні свіжого реагента. В області низьких концентрацій реагента, які є рушійною силою у процесі, основну роль відіграє перший ефект, в області високих – другий. Очевидно, існує концентрація, якій відповідають екстремальні значення коефіцієнта масовіддачі.

Крім хімічного кипіння в умовах вільної конвекції, автор досліджує вплив механічного перемішування на цей процес і доводить, що до певних концентрацій реагента такий вплив є додатним, але підвищена інтенсивність перемішування приводить до зростання транспортування реагента до поверхні твердої фази і завдяки цьому процес переходить у закритичну область, за якої коефіцієнти масовіддачі зменшують свої значення.

Надзвичайно цікавим є дослідження сумісного процесу газовиділення (хімічного кипіння) та газопідведення. Інертна газова фаза сприяє зриву бульбашок, що ростуть на поверхні твердої частинки за рахунок хімічної реакції, і відбувається оновлення поверхні твердої фази для доступу свіжого реагента. Порівняння механічного та пневматичного перемішування переконливо свідчить на користь останнього.

У дослідженні “хімічного кипіння” доведено, що утворення газової фази у вигляді бульбашок на поверхні частинок є значним інтенсифікувальним фактором масообміну. Під час наукової розвідки виникла ідея створити штучне газовиділення за рахунок вакуумування системи. Газові бульбашки завжди виникають на твердій поверхні через те, що робота над їхнім утворенням на твердій поверхні є значно меншою, ніж в об’ємі. Штучне газовиділення за рахунок вакуумування системи інтенсифікує масообмін. Вивчалось розчинення твердих тіл та екстрагування з твердої фази. В останньому випадку традиційні методи турбулізації рідини не впливають на швидкість молекулярно-дифузійного переміщення маси у тонких капілярах твердої фази. Застосування вакуумування дає змогу інтенсифікувати цей процес у капілярах за рахунок виникнення у них парогазових бульбашок, які під час свого зростання витісняють рідину з капілярів, а після їхнього

відриву на це місце заходить свіжий реагент. Ще вагомішого результату одержано під час періодичного вакуумування системи, тому що в разі зняття вакууму відбувається швидке сплескування бульбашок і рідина зі значними швидкостями рухається у капілярах, гідродинамічно діючи на процес екстрагування.

Подані у цьому розділі приклади практичного застосування лише підтверджують важливість теоретичних досліджень.

Професор Я.М. Гумницький зараховує застосування явища кавітації до розділу штучного газовиділення. Добре відома руйнівна дія кавітації, особливо на гребні гвинти суден. Але кавітація може бути використана і з метою інтенсифікації технологічних процесів. Саме ці процеси були предметом розгляду та дослідження автора і д-ра техн. наук Т.М. Вітенько. Автори визначають кавітацію як нову гідродинамічну закономірність, за якої рідина набуває властивостей, що не були характерними для ламінарного чи турбулентного режиму. Кавітаційний режим руху рідини, крім явища турбулізації, характеризується появою газопарової фази, зміною рН середовища, утворенням нових сполук, зокрема радикалів. Ці нові властивості сприяють зростанню інтенсивності масоперенесення.

У четвертому розділі зосереджено увагу на сорбційних процесах за участю твердої фази. До них належать фізична адсорбція, хемосорбція та йонний обмін. У цих роботах досліджено статистику, кінетику та динаміку процесу. Розроблено математичні моделі, основані на наявності в порах обмінника двох зон: об'ємної та поверхневої, кожна з яких характеризується своїми параметрами: концентрацією та коефіцієнтом дифузії. Розглядаючи процес хемосорбції у трифазній системі  $\text{SO}_2\text{-H}_2\text{O-CaCO}_3$  вперше у світовій практиці теоретично одержано значення коефіцієнта прискорення, який показує у скільки раз хемосорбційний процес у трифазній системі є інтенсивнішим від фізичної абсорбції. Теоретично обґрунтовано ступінь досконалості процесів фізичної адсорбції та її залежність від математичного представлення ізотерми сорбції.



*Професор Я.М. Гумницький із завідувачами кафедр екології та охорони навколишнього середовища професором М.С. Мальованим та хімічної інженерії професором В.М. Атаманюком*



*Голова спеціалізованої вченої ради Д35.052.09 професор Я. Гумницький з членами ради (2004 р.)*



У п'ятому розділі розглянуто процес нанесення полімерних покриттів на дисперсні матеріали, але особливу увагу звернуто на процес вивільнення цільового компоненту з капсульованої частинки. Процес вивільнення з капсульованих частинок вперше опубліковано у спільній польсько-українській монографії за участю автора. Полімерна оболонка по суті є мембраною, через яку дифундують корисні компоненти. Залежно від матеріалу мембрани, її товщини, способу нанесення покриття можна прогнозувати час вивільнення і давати рекомендації щодо самого процесу капсулювання. Запатентовано декілька складів полімерних дисперсій для капсулювання лікарських препаратів та мінеральних добрив.

Запатентовано метод регулювання швидкості вивільнення мінеральних добрив з капсульованих частинок, який полягає у внесенні в полімерну композицію легкорозчинної речовини, яка збільшує поровий простір капсули. Інтересним з теоретичного і практичного погляду є дослідження процесу вивільнення з частинок адсорбенту активного компоненту, що попередньо адсорбований. З теоретичного боку це масообмінна задача з граничними умовами четвертого роду.

У шостому розділі йдеться про масообмінні процеси у системі тверде тіло-газ. Розглянуто суто фізичний процес сушіння у стаціонарному шарі та дифузійно-контрольований процес хімічної взаємодії твердого тіла з газом. Сушіння є складним тепломасообмінним процесом, що містить зовнішню та внутрішню дифузію, а також теплові явища. Задача ще ускладнюється під час дослідження стаціонарного (нерухомого) шару. Математично описано гідродинаміку, кінетику та динаміку сушіння (теплові та масообмінні задачі).

На прикладі окиснення вольфрамо-кобальтового сплаву досліджено складну кінетику цього процесу, що використовується з метою розрахунку глибини ступеня окиснення та одержання заданих поверхонь (у роботах проводилось окиснення твердосплавних зубків шарошkových доліт для процесів буріння).

Метод забезпечує високу технологічність та покращує експлуатаційні властивості доліт.

Хімічні процеси супроводжуються тепловими ефектами, причому у системі тверде тіло-рідина, тверде тіло-газ джерело тепла знаходиться на міжфазній границі. Виділене тепло теплопровідністю відводиться у тверде тіло та конвективно до реагента. Найвища температура виникає на поверхні взаємодії, що впливає на кінетичні коефіцієнти у місці взаємодії. Автор одержує розв'язки задач для різних можливих випадків, що дають можливість визначити температури твердого тіла, реагента і, особливо, температуру на поверхні твердого тіла. Анотація цих праць подана у розділі 7.

У значній частині робіт висвітлено екологічні проблеми (розділ 8), якими автор займається в останні роки. Створено математичні моделі міграції забруднень у ґрунтове середовище. Особливо це стосується застосування мінеральних добрив, значна частина яких не засвоюється рослинами, а проникає до нижніх шарів ґрунту, забруднюючи поверхневі та підземні води. Як метод запобігання цим забрудненням, рекомендується використання капсульованих мінеральних добрив, що забезпечить регульоване вивільнення компонентів добрив та буде екологічно безпечним для навколишнього середовища.

У багатьох роботах вирішуються екологічні питання, пов'язані з охороною атмосфери від техногенних забруднень  $\text{SO}_2$  та  $\text{NO}_x$ , а в останній час очищення від  $\text{CO}_2$ , який, як відомо, є газом, що спричиняє парниковий ефект.

Свої наукові досягнення автор розділяє зі своїми учнями, серед яких є 3 доктори та 24 кандидати наук. Творча наукова співпраця продовжується і тепер.

Характерним для проф. Я. Гумницького є те, що він співпрацює не лише з науковцями Львова чи України, але серед авторів публікацій є науковці з Польщі, Росії, Японії, Великобританії, Узбекистану, Югославії, Бангладешу, Іраку, Судану.

Як педагог багато уваги зосереджує на навчальній та методичній роботі. Серед лекційних курсів необхідно виокремити

фундаментальні дисципліни: Процеси та апарати хімічної технології, Інженерна екологія, Теорія теплових та дифузійних процесів, Метеорологія та кліматологія. Він брав активну участь у модернізації лабораторії з процесів та апаратів, розробив концепцію лабораторії з “Основ екології” для всіх студентів Львівської політехніки, а також створив перші навчальні плани для спеціальності “Екологія та охорона навколишнього середовища” та програми курсів для цієї спеціальності. Кожного року 4–6 магістрантів під його керівництвом виконують свої магістерські кваліфікаційні роботи, які одержують високу оцінку під час їхнього захисту у Державній екзаменаційній комісії.

Професор Я.М. Гумницький – активний громадський діяч. Передусім це стосується його роботи зі студентством: виховання молодих людей патріотами України, плекання любові до своєї країни, утвердження її мови, культури. Сім’я Ярослава Михайловича постійно відвідує художні виставки, театри і, особливо, філармонію. Він завжди у курсі літературних новинок, знайомий особисто з багатьма діячами культури.

Свої професійні знання та громадянську позицію він проявив, будучи протягом 7-ми років членом експертної ради ВАК України, а з 2002 року головою спеціалізованої вченої ради щодо захисту докторських та кандидатських дисертацій. За час його головування у раді ВАК не відхилив жодної дисертаційної роботи, а від аспірантів та докторантів лунали лише слова вдячності за об’єктивний, неупереджений підхід до розгляду їхніх робіт. Багато молодих науковців скористались та користуються його науковими консультаціями, особливо у галузі математичного моделювання. За свою довгу наукову кар’єру він був членом оргкомітетів багатьох наукових конференцій, організовував та очолював оргкомітет двох міжнародних конференцій з хімічної інженерії, що відбувались у Львові.

Я.М. Гумницький є активним учасником рухів за екологічну безпеку, був довгий час заступником голови асоціації “Зелений світ”, разом зі студентами представляв Львівську політехніку на

міжнародних студентських конференціях з проблем охорони довкілля.

Професор Я.М. Гумницький є віце-президентом Української інженерно-хімічної асоціації України, академіком Української екологічної академії наук, членом Наукового товариства ім. Т. Шевченка.

Ми, завідувачі двох кафедр, що їх створено внаслідок поділу великої кафедри хімічної інженерії та промислової екології, якою впродовж 15-ти років завідував професор Я. М. Гумницький, від імені своїх колективів вітаємо ювіляра з його семидесятиліттям. Бажаємо йому міцного здоров'я, творчої наснаги, талановитих учнів, нових наукових звершень, успіхів у науковій, педагогічній роботі та громадській діяльності.

***Атаманюк В.М.,***

*доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри  
хімічної інженерії*

***Мальований М.С.,***

*доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри екології  
та охорони навколишнього середовища*

## Біографія

Я народився 10 вересня 1941 року в селі Острівець Тереховлянського району Тернопільської області.

Село Острівець розташоване у 6-ти км від княжого міста Тереховлі і відоме з 1471р., хоча це поселення існувало й раніше. Назва села походить від його розташування між двома річками – Серетом та його притокою Брусенець. Насправді це не острів, а півострів. Наявність двох річок, а також гориста місцевість унеможливили розбудову села. У його межах розмістилося лише близько 140 господарств. Основне населення було хліборобами, деяка частина працювала у каменоломнях, де добували та обробляли пісковик, який вивозили не лише до ближніх районів, але й до Львова та за кордон.

За етнічним складом це українське село, але проживало близько 20 родин поляків та дві родини євреїв. Під час операції “Вісла” майже усі польські родини були переселені до Польщі, а на їхнє місце заселили українців, депортованих з сучасної території Польщі. У селі функціонував греко-католицький храм та костел, а також польська та українська читальні-клуби. Батьківська садиба знаходилась у самому центрі села, межувала з українським клубом, капличкою, плебанією греко-католицького священика та обійстям маминого брата Романа. За городом протікала річечка Брусенець.

У кінці XIX – на початку XX століття душпастирем села був о. Іван Волянський, який на своїй парохії, до котрої, крім Острівця належали ближні села Застіноче, Зубів та Слобідка, організував церковні братства, хори, читальні. Він був знайомий та листувався з багатьма громадськими діячами того часу, зокрема з Іваном Франком. Не випадково митрополит Сильвестер Сембратович скерував його з першими переселенцями до Сполучених Штатів Америки, де о. Волянський не лише налагодив церковно-релігійне життя, але й світське. Він організував і був редактором української газети “Америка”. Після США митрополит Сембратович послав його до Бразилії, де він виконував таку саму функцію, що і в

Америці. Після завершення своєї місії о. Волянський повертається до Острівця і працює тут до 1913 року, після чого обмінюється парохіями з о. Платоном Карпінським, який був парохом в Острівці від 1913 до 1937 рік. Це була високоосвічена людина, фонди його приватної бібліотеки вважалися чи не найбільшими в Галичині того часу. Він обмінювався книжками зі Слов'янською бібліотекою у Празі. Володів кількома іноземними мовами. Його наступником був о. Осип Побережний, який воював у лавах Українських січових стрільців. Він мене хрестив. Своє життя він закінчив, як тисячі греко-католицьких священників, у таборах ГУЛАГу.

Острівець дав життя ще одному відомому душпастеру – єпископові Ізидору Борецькому, нашому сусідові, який тривалий час очолював Торонтську єпархію у Канаді.

Острівець – батьківщина Володимира та Степана Зеноновичів Гжицьких. Володимир Гжицький – відомий письменник, автор багатьох романів, повістей та оповідань. Був арештований і засланий на 23 роки (1933–1956 рр.) до Сибіру. Його брат – Степан Зенонович Гжицький – відомий вчений, біохімік, працював у Львівському зооветеринарному інституті, організував Український науково-дослідний інститут фізіології та біохімії сільськогосподарських тварин. Серед його учнів 15 докторів та 47 кандидатів наук. Його ім'я носить Національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій.

Не лише Володимир Гжицький приніс літературну славу нашому селу. Її продовжив мій товариш, однокласник Роман Лубківський – відомий поет, перекладач, громадський і політичний діяч. Його обрали народним депутатом першого скликання, Надзвичайним і Повноважним Послом України у Чехії та Словаччині, багато років очолював Львівську організацію Спільки письменників України. Роман Лубківський – лауреат Національної премії України імені Тараса Шевченка. Роман не пориває зв'язків з нашим селом. Завдяки його старанням збудовано нову школу, відбувається реконструкція та перебудова костелу, організовано музейну кімнату Володимира Гжицького.

З нашого села походять багато відомих людей, але я згадаю лише двох односельчан, які здобули інженерну освіту. Це – Любомир Побережний, який закінчив механічний факультет Львівської політехніки, та Володимир Гида – закінчив, як і я, хіміко-технологічний факультет. Захистив кандидатську дисертацію, працює у Дрогобицькому технічному університеті.

Час мого народження збігся із часом зміни трьох окупацій нашої подільської землі: польської (1939 р.), радянської і німецької (1941 р.). Мій батько Михайло Гумницький (1907 р. народження), син Івана та Ганни Гумницьких, працював у невеличкій крамниці в селі, що знаходилась у підсобному приміщенні на нашому дворі. До цієї роботи його заохотили селяни-українці у той час, коли було висунуто лозунг “свій до свого по своє”. Моя мати Стефанія Гумницька, дочка Петра і Катерини Луковських, на час мого народження вела домашнє господарство та виховувала мого старшого брата Олега (1936 р. народження).

Їхнє багатство складалось з 5 моргів (2,5 га) поля, яке оброблялось до спілки, бо коней у нас не було. Треба сказати, що господарів з великими наділами землі в нашому селі не було, тому після війни, коли треба було виконувати план щодо виселення куркулів, то не було людей, що підпадали б під статус “куркульства”, а арешти та виселення до Сибіру здійснювались через кваліфікацію “ворог народу – націоналістична діяльність”.

У 1944 році німецьку окупацію замінила радянська. Мій батько, як і інші чоловіки нашого села, був мобілізований і відправлений на фронт. Це були здебільшого старші мужчини, бо молодь воювала в УПА. Ненавчених, необстріляних, погано озброєних зразу кинули на таку ділянку фронту, де вони були “гарматним м’ясом”. Очевидно, що до цього прагнула комуністична верхівка. Дуже мало з них повернулось до рідних домівок. Вижили одиниці. Серед них мій батько, якого контузило і він ранений потрапив у полон до німців. Перебував у концентраційному таборі у Нойбрандербурзі. Додому батько повернувся лише влітку 1946 року. Пам’ятаю і чітко бачу епізод його повернення. На запитання, де він перебував увесь рік по закінченні

війни, батько ніколи не говорив, а казав, що був у госпіталі. Ми вважали його, на підставі повідомлення, що “пропав безвісти”. Очевидно проходив перевірку органами, які добре знали, що цих воїнів використано для відволікання уваги німців від справжнього напрямку удару, і тому через певний час батька відпустили додому. Весь цей час мати давала собі раду і з господаркою, і з нами – дітьми. Кінець сорокових років позначився комуністично-сталінським стилем правління: пошуки ворогів народу, виконання планових рознарядок щодо арештів та вивезень до Сибіру, знищення греко-католицької церкви, примусова колективізація, вихвалання “вождя і вчителя”. Вдома у нас завжди були наготові дві торби: одна – з сухарями, а друга – з макаронам.

У таких обставинах я у 1948 р. пішов у перший клас Острівецької початкової школи. З першого по четвертий клас нас навчала вчителька Анна Платонівна Іваницька, дочка о. Платона Карпінського, про якого я згадував вище. Як завжди, у класі виділялась група учнів, для яких навчання не було труднощами, і серед цих учнів знаходився і я. Мої родичі були у дуже добрих стосунках з Анною Платонівною і зберегли їх протягом усього життя. Моє спілкування з моєю першою вчителькою не обмежувалось лише шкільним періодом. На літні канікули до Анни Платонівни приїздили зі Львова її внуки – Ярема та Олег Славські, з якими я та Роман Лубківський проводили все літо. Ця дружба ніколи не припинялась. Наша початкова школа містилась у приміщенні, де проживали та вчили дітей батьки Володимира та Степана Гжицьких. З родиною моєї першої вчительки я підтримую контакти до цього часу.

Після четвертого класу початкової школи острівецькі діти у 1952 р. перейшли до Застіноцької семирічної школи, яку я закінчив у 1955 р. Ми об'єднались з дітьми з села Застіноче і заприятелювали з новими шкільними друзями, серед яких не можу не згадати Остапа Побережного, майбутнього доктора фізико-математичних наук, та Мирослава Петріцу, майбутнього директора школи та завідувача Теробвлянським райвно. Кожен предмет вів окремий вчитель і я та мої друзі – випускники школи з великою симпатією їх згадуємо.





*Батьки Ярослава Гумницького  
з братом Олегом (1939 р.)*



*IV клас Острівецької початкової школи (1952 р.).  
У центрі – вчителька А.П. Іваницька, ліворуч – Роман Лубківський,  
праворуч – Ярослав Гумницький*



*VII клас Застіноцької семирічної школи (1955 р.). Нижній ряд, ліворуч – Роман Лубківський, Ярослав Гумницький, Ганна Войнаровська, Ярکو Винницький, Остап Побережний. В центрі у вишній сорочці – Мирослав Петрица*



*Колектив кафедри хімічної інженерії та промислової екології (1995 р.). У нижньому ряді третій ліворуч – зав. каф. проф. Я. Гумницький*



*Колектив кафедри екології та охорони навколишнього середовища (2011 р.). На передньому плані учні професора Я.М. Гумницького*



*Вчена рада факультету інженерії та охорони довкілля Ченстоховської політехніки (2004 р.) У другому ряді третій праворуч – проф. Я. Гумницький*



*З внучкою Анною на відпочинку у розарії*



*Родина Ярослава Гумницького  
(дружина Наталя, дочка Олеся,  
внучка Анна-Стефанія,  
зять Ян, 2005 р.)*



*Ярослав Гумницький  
на могилах своїх батьків  
у с. Острівець*

Це – З. Бернадин і А. Пельц, директори школи, вчителі І. Білонога, В. Платко, Т. Назаренко, А. Мінчук, Б. Славська, Ю. Добровицька, Б. Кордонець. Більша частина наших вчителів походила зі Східної України, але навіть у ці роки не йшлося про якийсь поділ на Схід і Захід, про що говорять політики в незалежній Україні.

Середню освіту я здобував у Тереховлянській середній школі № 1 від 1955 до 1958 рік. Тепер до школи щоранку потрібно було долати шлях близько 6 км. Знову нові вчителі, нові предмети, нові друзі. Школа велика, тільки 8-х класів було чотири. Після 8 класу у школі ввели технічне навчання. Нічого кращого не придумали, як навчати нас управляти тракторами та сільськогосподарськими машинами. Звичайно, що цю техніку мали вивчати діти з сіл і чим даліше від райцентру, тим краще. Отже, нас перегрупували і створили клас з технічним навчанням. Дехто з нашого класу перейшов до інших шкіл, тому з 4-х класів створили 3, але з великою кількістю учнів. Так, у нашому класі було 40 учнів. Тож якщо у нормальних класах було максимум по 6 уроків, то у нашому мінімум 7, а деколи і 8. І це при тій далекій дорозі, яку ми долали пішки, бо тоді рідкістю були не лише автобуси, але й вантажні автомобілі. Влітку учні не технічних класів відпочивають, а ми практикуємось на тракторних бригадах колгоспів. Нічого, вивчилися на трактористів, а разом з тим здобули і атестати зрілості. Правда, зі 120 учнів ніхто не одержав золотої медалі. Серед міських дітей не виявилось достойних, а сільським медалей не потрібно, їх готували на трактористів. Це був 1958 рік, рік хімізації народного господарства. З усіх предметів я найбільше виділяв фізику та хімію, тому не випадково життєва стежка привела мене до хіміко-технологічного факультету Львівської політехніки. За добрі знання зі школи маємо завдячувати нашим вчителям: І. Свистуну, О. Гончарук, М. Матвієнко, О. Богдановій, Г. Бондар, Й. Яремчуку, Й. Гайві, А. Телявській, Н. Сервас та іншим.

Під час підготовки до вступу у Львівську політехніку доля знову звела мене з моєю першою вчителькою Анною Платонівною та її родиною: дочкою п. Дарусею, її чоловіком п. Іваном Бойком та їхніми синами – Андрієм та Юрієм. У їхній гостинній родині я

мешкав на час підготовки до екзаменів та і на час самих екзаменів. Відомо, що Міністерство освіти існує для того, щоб кожного року встановлювати нові правила прийому. Так було і в 1958 р. Згідно з правилами вступу 80 % абітурієнтів складала особи зі стажем 2 і більше років та демобілізовані з лав радянської армії. 20 % припадала на випускників шкіл, серед яких ще були пільговики. З 25 балів з 5-ти предметів я набрав 24 і був під знаком запитання щодо зарахування. Перед самим 1 вересня я був зарахований, мало того мене ще назначили старостою групи, у якій лише я та баскетболістка М. Ілкіна були цього річними випускниками. Мене зарахували на спеціальність “Технологія неорганічних речовин”, якою опікувалась кафедра “Технологія неорганічних речовин, процеси і апарати хімічних виробництв”. Завідував у цей час кафедрою декан нашого факультету кандидат технічних наук, доцент Олександр Чернявський. Навчання в інституті відрізнялось від шкільного. Спільні потокові лекції, лабораторні та практичні заняття, здача колоквиумів, дві заліково-екзаменаційні сесії. Але і тут навчання давалось мені доволі легко. Я одержував підвищену стипендію, а з четвертого курсу працював за сумісництвом у науково-дослідній лабораторії кафедри. Заняття з предметів хімічного циклу проводили професори (тодішні і майбутні): Я. Беркман, Т. Юрженко, Д. Голопко, Р. Візгерт (наш куратор), Г. Аксельруд, С. Посацький, В. Яворський, В. Пучин; доценти: О. Чернявський, А. Занько, М. Бланк, І. Фіклістов, Л. Походенко, О. Гаврилов, М. Яремчук та інші. Наші щорічні поїздки до колгоспу сформували колективи академічних груп. Жив я усі п’ять років у гуртожитку по вул. Пушкіна (теперішня Ген. Чупринки), 11а. Згуртувалось коло нових друзів: Б. Брезгін, Ф. Кархут, В. Ганжуга, П. Довгань, Р. Потирай, М. Британ, Д. Гребенюк, Б. Шемердяк, П. Тетерук, Д. Крикливий та інші. Дипломний проект виконував під керівництвом тоді асистента В. Яворського, захистив його на “відмінно” і отримав диплом з відзнакою. У той час двоє провідних фахівців кафедри за спеціальністю ТНР вступили до аспірантури і мене за рекомендацією доцента О. Чернявського зараховано на посаду асистента цієї кафедри. Мені одразу було доручено читання кількох

курсів: Загальна хімічна технологія (до речі, цей предмет тоді викладав у моєї майбутньої дружини), Обладнання заводів ТНР, Технологія зв'язаного азоту. Тоді завершував свою докторську дисертацію доцент Г. Аксельруд. Він розробив теоретичні основи масообміну в системі тверде тіло-рідина і виникла необхідність практичної експериментальної перевірки деяких положень. Він звернувся до мене з пропозицією провести ці дослідження. Звичайно, я погодився і після цього він запропонував мені бути його аспірантом. Так я став аспірантом-заочником і почав працювати над проблемою інтенсифікації процесів розчинення у вібраційному полі. У цей час на базі Львівської політехніки проходила конференція “Вібраційна техніка у машинобудуванні”, на яку ми подали тези доповіді, хоч до машинобудування моя тема мало стосувалася. Я сидів на засіданнях, слухав їхні доповіді. Конференція відбувалася доволі спокійно, було враження, що всі все знають. Нарешті підходить моя черга на виступ. Розуміючи, що я не зовсім у темі конференції, навіть хотів відмовитись від виступу, але тему оголосили і я почав свій виступ. По закінченні виступу і відповідей на численні запитання, відбулось жваве обговорення, причому виступали відомі вчені, що працювали у галузі вібраційної техніки. Таке жваве обговорення було викликане не моєю персоною, звичайно, а тим, що вони побачили нову велику ділянку застосування вібраційної техніки – хімічну технологію. Ці тези були моєю першою опублікованою науковою працею. На жаль, щоб проводити серйозні дослідження необхідна була добра вібраційна установка, якої у нас не було. Після марних спроб виготовити цю установку, ми відмовились від цих досліджень і проф. Г. Аксельруд запропонував нову тему з вивчення процесу йонного обміну та методу його інтенсифікації накладанням поля низькочастотних коливань. Розроблені математичні моделі вимагали їхнього розв’язання. Оскільки аналітично їх неможливо розв’язати, то цю проблему вирішено через застосування ЕОМ “Минск-1”, яка займала у головному корпусі дві великі кімнати. Значну допомогу у програмуванні мені надав проф. Р. Слоневський. Ця тема була успішною, я у 1971 р. захистив

кандидатську дисертацію і здобув науковий ступінь кандидата технічних наук.

З 1972 р. мене затвердили на посаді доцента кафедри.

Після розділення кафедри “ТНР, процеси і апарати хімічних виробництв” на дві кафедри, я залишився на кафедрі ПАХВ. Основним курсом, що читають на кафедрі є “Процеси і апарати хімічної технології”, іншими словами фізичні процеси, що супроводять хімічні перетворення. Тобто, я досягнув своєї шкільної мети, а саме поєднав фізику та хімію.

У 1972–1976 рр. працював заступником декана хіміко-технологічного факультету. У 1976–1977 рр. був на 10-місячному стажуванні в Угорщині на базі двох університетів: Веспремського хіміко-технологічного університету та Будапештського університету. Це була моя перша поїздка за кордон. Моїми керівниками стажування були відомі вчені-теоретики з хімічної інженерії професори Антал Ласло у Веспремі та Ласло Бенедек у Будапешті. Їхня спільна наукова монографія перекладена російською мовою. В Угорщині я проводив деякі наукові дослідження, вчив угорську мову та займався математичним моделюванням. Після повернення зі стажування зосередив свою увагу на наукових дослідженнях у процесах тепло-масообміну в системах з твердою фазою, а консультував мене професор Г. Аксельруд, який на цей час (з 1970 р.) очолював кафедру ПАХВ. Завдяки заслугам проф. Г. Аксельруда та співробітників кафедри, Академія наук призначила нашу кафедру координатором науково-дослідних робіт з процесів розчинення та екстрагування. На тоді припадає виконання моїх основних наукових досліджень, які лягли в основу докторської дисертації. Її захист відбувся у Московському інституті тонкої хімічної технології ім. М. Ломоносова у 1986 р. за спеціальністю “Процеси і апарати хімічної технології”. Представляла мою роботу відповідна кафедра, завідував якою видатний процесник професор Н.І. Гельперін, який був на захисті одним з моїх опонентів. У 1987 р. я був обраний на посаду завідувача кафедри процесів та апаратів хімічних виробництв. У цей час набирав обертів екологічний рух, що вимагав спеціалістів



відповідної кваліфікації. Екологічні спеціальності відкривались майже у всіх вищих навчальних закладах, тоді і мені вдалось підготувати необхідний пакет документів для відкриття спеціальності “Екологія та охорона навколишнього середовища” у Львівській політехніці, а в 1992 р. організовано перший набір на цю спеціальність. Кафедра була переіменована на кафедру “Хімічна інженерія та промислова екологія”. Швидко почав рости професорсько-викладацький штат кафедри і вже всередині 90-х років на кафедрі працювало 6 докторів наук, професорів, 14 кандидатів наук, доцентів. Готувались кадри вищої кваліфікації – кандидати наук. З 1987 р. функціонувала спеціалізована вчена рада щодо захисту докторських і кандидатських дисертацій за спеціальністю “Процеси й апарати хімічної технології”. Рада успішно функціонує до цього часу. У 1991–1997 рр. я представляв цю спеціальність у експертній раді Вищої атестаційної комісії . З 2002 р. протягом трьох каденцій був головою спеціалізованої вченої ради Д35.052.09 із захисту докторських і кандидатських дисертацій. Протягом 10 років був членом комісії Міністерства освіти і науки України з напрямку “Охорона навколишнього середовища”, на якій розглядалися науково-дослідні роботи за цим напрямом і визначався їх рейтинг. Тепер є академіком Української екологічної академії наук, обраний віце-президентом Української інженерно-хімічної асоціації, певний час був заступником голови Львівської організації “Зелений світ”. Член Наукового товариства ім. Т. Шевченка.

На запрошення ректорату Ченстоховської політехніки (Республіки Польща) обіймав у 1995–2008 рр. посаду професора на кафедрі теплопостачання, вентиляції та охорони атмосфери. Моїм обов'язком було вести викладання дисциплін, що стосуються екологічних проблем охорони атмосферного повітря, а саме: “Метеорологія та кліматологія” і “Охорона атмосфери”. Крім цього, здійснював наукове керівництво магістерськими роботами. Був офіційним рецензентом науково-дослідних робіт Міністерства освіти Польщі. За спільну українсько-польську монографію одержав нагороду від Міністра освіти Польщі. З нагоди 60-річчям

Ченстоховської політехніки у 2008 р. нагороджений дипломом та медалю ректора політехніки.

Постійно займаюся підготовкою кадрів вищої кваліфікації – кандидатів та докторів наук. Під моїм керівництвом та науковими консультаціями захищено 3 докторські та 24 кандидатські дисертації. Здебільшого це роботи за спеціальністю “Процеси та апарати хімічної технології”, а також за спеціальностями “Екологічна безпека” та “Матеріалознавство у машинобудуванні”. Не всі мої учні дожили до цього часу. Трагічно пішли з життя кандидати наук В. Кривошеєв та громадянин Іраку Фарід аль-Алусі.

Регулярно представляю роботи свої та моїх учнів на всесоюзних та міжнародних конференціях і конгресах. Серед них особливо важливим є Міжнародний конгрес з хімічної та процесної інженерії, який проводиться у Празі щодва роки. У конгресі беруть участь більше тисячі учасників приблизно з 50 країн світу. Презентуються найновіші тенденції розвитку хімічної інженерії. На жаль, українські вчені через брак коштів дуже мало задіяні у таких престижних міжнародних наукових форумах.

Моя дружина Наталя працює науковим співробітником Міжнародного інституту освіти, культури та зв'язків з діаспорою Національного університету “Львівська політехніка”. Її родове прізвище Кивелюк і вона є далекою родичкою Івана Кивелюка – громадського діяча, голови “Просвіти” у 1910–1920 рр. Наталя стояла біля витоків відновлення Наукового товариства імені Тараса Шевченка, багато праці доклала до його розвитку. Є активною громадською діячкою, вболіває за укріплення незалежності нашої держави, за те, щоб Україна була українською. Друкується у газеті “День”.

Дочка Олеся закінчила Національний лісотехнічний університет, кандидат наук. Зять Ян Вітовський – математик. Працюють у м. Варшаві. Внучка Анна-Стефанія вчиться у першому класі.

Мої захоплення – література, театр, класична музика, розв'язування sudoku.

Завершуючи свою біографію, не можу не згадати своїх найближчих родичів, кожен з яких постраждав через чужі Українці тоталітарні режими.

Родина мого батька Михайла Гумницького. Мій дід Іван помер задовго до мого народження і дітьми опікувалася моя бабця Ганна. Крім батька, були ще батькова сестра Євгенія та брат Олексій. Про батька я уже сказав, а сестра померла під час другої світової війни, залишивши на бабцю Ганну двох малолітніх синів – моїх двоюрідних братів Ореста та Ігоря, батько яких воював. Контужений, але живий він повернувся з війни. Молодший брат Олексій перед війною був арештований НКВД і на початку війни розстріляний у Тернополі, як тисячі ні у чому не винних українців.

Родина моєї матері Стефанії Луковської була численнішою. У Петра і Катерини Луковських було шестеро дітей. Діда Петра я не пам'ятаю. Найстарший син Максим (1900 р. народження) закінчив Тербовлянську гімназію і під впливом революційних ідей відступив з військом Примакова на Східну Україну, закінчив Київську сільськогосподарську академію, готував до захисту дисертацію. У 1933 р. був заарештований, але не розстріляний, як багато українських діячів культури того часу. Думаю, що тут зіграв той факт, що він не був гуманітарієм. Його дочки – мої двоюрідні сестри Ольга та Льонгіна пройшли всю війну, будучи медсестрами. Після закінчення війни прибули до нас, до Острівця, і тут працювали у фельдшерсько-акушерському пункті. Молодша дочка Надя закінчила з відзнакою Київський державний університет ім. Т. Шевченка, відпрацювала 3 роки на Камчатці, після чого закінчила аспірантуру і працювала в Інституті фізичної хімії ім. Писаржевського. Максим Луковський був звільнений і реабілітований у 1956 р., приїхав до нас у село і працював до виходу на пенсію агрономом колгоспу.

Дочка Льонгіна (1903 р. народження) була одружена з лікарем, вихідцем з хліборобської родини. Батьки за панської Польщі змогли вивчити його на лікаря, але не були у змозі забезпечити лікарською практикою, тому молоде подружжя виїхало у пошуках кращої долі до Аргентини. До 1939 р. з ними велось переписування, але із встановленням радянської влади всі контакти припинились і втратився будь-який слід.

Син Роман (1905 р. народження) був хліборобом. У 1944 р. його мобілізовано на війну, де він і загинув, залишивши хвору дружину Северину та трое дітей – Богдана, Юрія та Марію.

Дочка Стефанія (1907 р. народження), моя мати, вела у селі домашнє господарство. Через те, що батько був на фронті, ми не були репресовані, хоч сухарі та макарони були завжди наготові.

Дочка Михайлина (1909 р. народження) була замужем за Романом Борецьким – воїном УПА. Вона зі своїми малолітніми синами Олегом та Степаном була арештована та виселена до Сибіру у м. Заозерне Красноярського краю, де працювала на слюдяній фабриці. Там і похована.

Наймолодший син Євген (1916 р. народження), як і більшість тодішньої молоді, брав найактивнішу участь у національно-визвольній боротьбі як проти радянських, так і проти німецьких окупантів. Його арештували німецькі власті, перебував у німецькому концтаборі, чудом вижив. Знаючи, що його чекає на батьківщині, потрапив до американської зони окупації та емігрував до США. Там працював на шахті, був активним учасником у роботі української громади.

Здавалось, що не було вже кого арештовувати та вивозити. Проте план щодо вивезення нашої сім'ї, очевидно, ще не був до кінця виконаний, тому у 1946 р. засуджують і висилають мою 70-річну бабцю Катерину, яка повернулась у рідне село лише після смерті Сталіна.

Не все я можу написати про своїх рідних, тому що родичі нас обєрігали і не все нам оповідали. Але навіть така скупа інформація лише про одну родину свідчить, що за окупаційних режимів немає того, про що писав Тарас Шевченко: “В своїй хаті своя й правда, і сила, і воля”.

*Ярослав Гумницький*

## Теми дисертаційних робіт професора Я.М. Гумницького

*Кандидатська дисертація:* Дослідження кінетики йонного обміну під час пульсаційного руху рідини (1971 р.)

*Докторська дисертація:* Масообмін у системі тверде тіло – рідина в умовах газовідведення і газовиділення (1985 р.)

**Список науковців, керівником та консультантом  
дисертаційних робіт яких був проф. Я.М. Гумницький**

**а) кандидатські дисертації**

1. Зеліньскі Марек (Польща) 1974
2. Креховецький О.М. 1983
3. Кривошеєв В.І. 1985
4. Вінніков О.Я. 1986
5. Маллік Сіддесвар (Бангладеш) 1987
6. Малик Ю.О. 1989
7. Пелех М.П. 1990
8. Демчук І.А. 1991
9. Фарід аль-Алусі (Ірак) 1991
10. Анісуззаман Мохаммод (Бангладеш) 1991
11. Лучейко І.Д. 1993
12. Атаманюк В.М. 1995
13. Осман Атия Ель-Хабіб (Судан) 1995
14. Абуобейда Ахмед Ель-Хасан (Судан) 1997
15. Нагурський О.А. 1998
16. Волікова Н.М. 1998
17. Пелех Т.М. 1998
18. Майструк І.М. 2000
19. Попович О.Р. 2001
20. Дерейко Х.О. 2002
21. Сабадаш В.В. 2005
22. Венгер Л.О. 2005
23. Сеньків В.М. 2007
24. Люта О.В. 2009

**б) докторські дисертації**

1. Мальований М.С. 1997
2. Атаманюк В.М. 2007
3. Вітенько Т.М. 2010

## Грані особистості

Не раз думається: коли б Ярослав Гумницький народився не в минулому, ХХ-му столітті, а, скажімо, на п'ять століть раніше, то в найпрестестижніших енциклопедіях Європи про нього було б сьогодні можна прочитати: універсальний талант, багатогранна особистість. Це означає: за покликанням і основним фахом – учений-хімік; за складом душі, безумовно, непересічний гуманітарій. Або таке: унікальний талант, котрий відзначається взаємопроникністю суто наукових інтересів та виразних мистецьких орієнтацій, що впливають із широкого мистецького кругозору.

Так, українці епохи Відродження добре володіли циркулем і астролябією, ретортою і підзornoю трубою, різцем гравера і пером поета... А якщо брати “ближчі” епохи, виникають постаті наших “подільських краян” – Івана Пулюя та Івана Горбачевського.

Якщо ж упритул наблизитись до історії нашого рідного села Острівця, що неподалік од літописної Теревовлі, то побачимо, як матінка-природа бережно розподіляє наукові й творчі таланти. Ось брати Гжицькі – Володимир і Степан. Один – майбутній письменник, другий – майбутній учений-біохімік... Але гуманітарна, гуманістична основа – в обидвох братів-острівчан – визначальна.

Чому згадую про Володимира Зеноновича і Степана Зеноновича Гжицьких? Тому, що ми з Ярославом (а для мене – Славком) провчилися в місцевій початковій школі чотири роки, не знаючи нічогосінько про дітей місцевих учителів, котрі з цього приміщення на початку століття пішли в світ широкий. Зате наша перша вчителька Ганна Платонівна Іваницька, дочка місцевого пароха-просвітянина, громадського діяча, великого бібліофіла Платона Карпінського, від нього передала своєрідну естафету, а залишки його бібліотеки (чи не найбільшої в Галичині) потрапляли й до наших рук – я захоплювався белетристикою, краєзнавством, а Ярослав – театром, природничими публікаціями з календарів “Просвіти”.



*Наталія і Роман Лубківські*



*Святкування Дня незалежності у селі Рокитному (2010 рік)  
на дачі Романа Лубківського*

Моя доволі широка преамбула, можливо, допоможе уяснити якісь причиново-наслідкові зв'язки у формуванні таланту видатного вченого, професора, доктора наук. Так, ми – з одного року і з одного села, наші шляхи до випускного класу були паралельними, ба більше, перепліталися, а інколи сходилися в один спільний. І таких моментів було багато. Згадати б найдавніше: коли в семирічній, а потім і в середній школі “математик номер один” рятував мене на контрольних роботах чи іспитах зі “своїх” предметів, то я відповідно “надавав йому братню допомогу” у написанні “творів” на задану вчителькою-філологом тему. А от сценічним мистецтвом острівських артистів ми захоплювалися однаково: я ж, глядач, загублений серед доволі строкатої публіки переживав сценічну гру відсторонено, а Ярослав – безпосередньо: йому, “штатному” суфлерові, доводилося виручати героїв вистав, коли вони забували погано завчені монологи, або переінакшували репліки, пристосовуєчи їх до суб'єктивного розуміння п'єси...

У ті давні п'ятдесяті роки доводилося Ярославові бути учасником і цілком реалістичних, житейських сцен – суперечок, навіть конфліктів: у малесенькій хатинці Гумницьких осінніми й зимовими вечорами надовго “засідали” чоловіки-сусіди. Селяни довіряли батькам Ярослава свої таємниці, дозволяли собі кпини як із “малої”, так і з “великої” влади. Ніхто в цьому “клубі” не боявся, розмовляли щиро й відверто. Сини Гумницьких – старший Олег і молодший Ярослав – виховувалися воістину в атмосфері гуманній, доброзичливій.

Я любив бувати в хатинці Гумницьких, у цьому крихітному старосвітському житлі під старезним каштаном, з маленькими віконцями в комірчині-кухонці і дещо більшої світлиці, де ми готувалися до уроків. Поміж родинних фотографій на стіні привертав увагу портрет Тараса Шевченка – здається, копія з твору І. Репіна в гарній різьбленій рамі.

Окрім спільного навчання (від першого по десятий клас), в пам'яті залишилися напівлегальні уроки з церковної історії (в о. Осипа Побережного), наші відвідини сільської та районної бібліотек, зухвали походи по приміських садах – від ранньої осені до грудневих завірюх.



Не можу не згадати про те, як у 9–10 класах нас ні з того, ні з усього навчали “тракторної справи”. Ярославу вона давалася легко, мені ж доводилося і тут користуватися його допомогою – під час креслення деталей, розшифрування формул тощо. Трактористами ми так і не стали. Багато десятиліть тому ми на якийсь час розійшлися. Хоча жили у Львові, але навчалися у різних вишах. А вже коли в нас з’явилися власні сім’ї, давнє приятелювання набуло родинного характеру. Ярослав став хрещеним батьком мого старшого сина Маркіяна, а мій молодший син Данило – хрещеним батьком внучки Ярослава і Наталії Гумницьких – Анни-Стефанії.

Та повернуся до початку своєї “сильвети”.

Працючи в галузі хімічної інженерії, Ярослав Михайлович зробив багато наукових відкриттів. Він опублікував понад 400 наукових праць, чимало його наукових здобутків запатентовано. Учений вивів “у світ широкий” 24-х кандидатів наук, благословив 3-х докторів. Багато років попрацював в університетах Польщі, брав участь у міжнародних наукових симпозиумах і конференціях.

Учений-хімік за покликанням і фахом, він, як особистість – істинний “гуманітарій” – знає і любить літературу, відзначається вишуканим мистецьким смаком, зокрема в царині музики й театру. Ярослав належить до тих людей, чий патріотизм закорінений не в риторичі, а в улюбленій науковій та педагогічній праці, у рідній подільській землі, й ширше – у родовій, глибинній національній пам’яті.

Видатний учений, зразковий сім’янин, людина, котра, здається, ніколи не мала супротивників, Ярослав Михайлович з гідністю зустрічає поважний ювілей, що асоціюється з ранньою щедрою осінню.

Ми з ним не лише країани, а ровесники – різниця між нашими днями народження – один місяць. Я із серпня, він із вересня 1941 року. Наше покоління називають дітьми війни. Пам’ятаємо її мало, але винесли з неї – через батьків і родини – немислимо важкий тягар. Наша молодість припала на період ідеологічної “відлиги” тоталітарної держави, зрілими мужами тому 20 років ми вийшли на новий історичний рубіж – відновлення державної незалежності

України. Перед нами постала воістину історична місія: закладати політичні, наукові, культурні підвалини незалежної соборної української Держави.

У кожного з нас свій спосіб, своя манера і свій почерк у цій дорогій роботі. Але досвід життєвий і громадський багато в чому подібний. За нами – чимало створеного і набутого власною працею і власними зусиллями, часто дуже й дуже нелегкими. Але мусимо більше думати не лише про минуле, як про майбутнє. Думати не лише про власні долі, а й про долі внуків, і, дастьбі, правнуків. Вони повинні бути людьми свого часу, людьми Епохи українського Відродження, яку Ти, мій країянине і побратиме, втілюєш у своїй особі з честю і гідністю.

15.05.2011 р.

*Роман Лубківський*

## Міжнародна співпраця

Доктор технічних наук професор Ярослав Михайлович Гумницький належить до провідних науковців України у галузі процесів та апаратів хімічної технології. Свій значний науковий доробок він часто презентує на міжнародних конференціях та конгресах, серед яких особливо важливим є Міжнародний конгрес з хімічної та процесної інженерії (CHISA).



*З професором Г.О. Статюхою  
на конгресі CHISA–2006*

Цей престижний науковий форум проводиться щодва роки у Празі й у ньому беруть участь більше 1000 вчених із понад 50 країн світу. Незмінним учасником, на жаль, не численної української делегації ось уже 20 років є професор Гумницький. Щоразу він презентує свої нові наукові здобутки і досягнення своїх учнів, які викликають інтерес серед дослідників з різних країн світу.

Цінним у його роботі є те, що представлено та описано не тільки фізико-хімічну інтерпретацію досліджуваного явища у галузі тепло-масообміну з твердою фазою, але і розроблено математичну модель цього явища. Свідченням цього є його участь та презентація доповідей на міжнародній конференції “Математичні методи у техніці та технологіях”, яка одночасно відбувається у багатьох країнах, зокрема шість секцій та два симпозиуми організовано на базі Національного технічного університету “Київський політехнічний інститут”

*Геннадій Статюха,  
доктор технічних наук, професор,  
завідувач кафедри кібернетики хіміко-технологічних процесів  
Національного технічного університету  
“Київський політехнічний інститут”*



## List intencyjny Лист пошани

Pan Profesor Jarosław Gumniński będąc pracownikiem Wydziału Inżynierii i Ochrony Środowiska Politechniki Częstochowskiej uczestniczył w wielu pracach naukowych, dydaktycznych oraz organizacyjnych prowadzonych na Wydziale. Podczas pracy na Politechnice Częstochowskiej prowadził cieszące się ogromną popularnością wykłady z ochrony atmosfery oraz klimatologii i meteorologii. Swoją wiedzę dzielił się nie tylko ze studentami, ale także z pracownikami naukowymi, których wspierał swoim doświadczeniem badawczym. Obecnie Pan Profesor intensywnie współpracuje z Politechniką Częstochowską w projekcie *“A novel method of gas and petrochemical pollutants removal using adsorbents based*

Професор Ярослав Гумницький, як працівник факультету інженерії та охорони довкілля Ченстоховської політехніки брав участь у багатьох наукових працях, навчальних та організаційних, що виконуються на факультеті. Під час праці у Ченстоховській політехніці читав лекційні курси з “Охорони атмосфери” та “Метеорології і кліматології”, що користувались великою популярністю. Своїми знаннями ділився не лише зі студентами, але також з науковими співробітниками, яким допомагав завдяки своїм науковим знанням. Тепер професор інтенсивно співпрацює з Ченстоховською політехнікою у проекті “Новий спосіб усунення газових і нафтопохідних забруднень під час використання адсорбентів, виготовлених на

*on fly ashes*” finansowanym z Mechanizmu Finansowego EOG oraz Norweskiego Mechanizmu Finansowego. W niniejszym projekcie prof. J. Gumniński koordynuje z ramienia Politechniki Lwowskiej moduł dydaktyczny “Czysta energia z węgla”. Moduł ten obejmuje między innymi staże dla doktorantów Politechniki Lwowskiej na Wydziale Inżynierii i Ochrony Środowiska Politechniki Częstochowskiej.

*Z poważaniem Dziekan  
Wydziału Inżynierii i Ochrony  
Środowiska  
Politechniki Częstochowskiej  
Prof. dr hab. inż.  
Wojciech Nowak*

основі золи виносу”, що його фінансує Фінансовий механізм ЄС та Норвезький фінансовий механізм. У цьому проєкті проф. Я. Гумницький координує з боку Львівської політехніки навчальний модуль “Чиста енергія з вугілля”. Цей модуль передбачає також стажування для докторантів Львівської політехніки на факультеті інженерії та охорони довкілля Ченстоховської політехніки.

*З повагою  
декан факультету інженерії та  
охорони довкілля Ченстоховської  
політехніки проф., д-р габ. інж.  
Войцех Новак*



Drogi Jarosławie z okazji 70-tych urodzin przyjmij serdeczne życzenia wszelkiej pomyślności w działalności naukowej i życiu osobistym.

Nasza znajomość i współpraca naukowa trwa już ponad 25 lat. W 1985 roku przyjechałem po raz pierwszy do Politechniki Lwowskiej, by nawiązać współpracę z Katedrą Procesów i Aparatów Technologii Chemicznej w zakresie inżynierii chemicznej. W jednostce (Zakład Inżynierii i Sterowania Procesami Chemicznymi), którą reprezentowałem nie było wtedy żadnego profesora i z mozołem uczyliśmy się inżynierii Chemicznej.

Дорогий Ярославе, з нагоди 70-ти річчя від дня народження прийми сердечні побажання успіхів у науковій діяльності та особистому житті.

Наше знайомство та наукова співпраця тривають більше 25 років. У 1985 році я приїхав вперше до Львівської політехніки, щоб установити співпрацю з кафедрою процесів і апаратів хімічної технології у сфері хімічної інженерії. У структурній одиниці (Заклад інженерії та керування хімічними процесами), яку я репрезентував, у цей час не було жодного професора і з тяжким трудом вчилися хімічної інженерії.



*Проф., д-р габ. інж. Роман Петрус, демонструє нашу спільну доповідь на міжнародному конгресі CHISA-2008*

Prof. G.A. Aksielrud zaproponował w 1987 roku, by w ramach prowadzonej współpracy napisać wspólną książkę. Po wielu mozołach i szukaniu pieniędzy w 1998 roku została wydana książka: Petrus R., Aksielrud G.A., Gumnicki J.M., Piątkowski W.: *“Wymiana masy w układzie ciało stałe – ciecz”*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej 1998. W następnym roku zespół autorski za napisanie tej książki otrzymał nagrodę zespołową Ministra Edukacji Narodowej. W przeciągu tych 25 lat byliśmy razem na wielu konferencjach naukowych na Ukrainie, w Polsce a także w Pradze na konferencjach CHISA, gdzie zaprezentowaliśmy 12 wspólnych prac naukowych. Mam nadzieję, że nasza dalsza współpraca będzie równie owocna jak dotychczas.

Проф. Г.А. Аксельруд запропонував у 1987 році написати спільну книжку. Після важкої праці та пошуку грошей у 1988 році була видавництво Жешувської політехніки видало книжку: Петрус Р., Аксельруд Г.А., Гумницький Я.М., Піонтковський В. *“Масообмін у системі тверде тіло – рідина”*. Наступного року авторський колектив за цю книжку одержав нагороду Міністра народної освіти.

Протягом цих 25 років перебували разом на багатьох наукових конференціях на Україні, у Польщі, а також у Празі на конгресах ХІСА, де презентували 12 спільних наукових праць. Маю надію, що наша подальша співпраця буде плідною, як це і було до цього часу.

## Творча співпраця

Львівська політехніка – одна з найдавніших академічних технічних шкіл у Європі, де проводять фундаментальні та прикладні дослідження, де сформувались наукові школи. На початку 60-х років наукові дослідження кафедри хімічної інженерії об'єдналися у наукову школу з масообміну в системах з твердою фазою. У цій школі й дотепер успішно працюють доктори й кандидати наук, аспіранти. Одним з провідних науковців цього напрямку є Ярослав Михайлович Гумницький, доктор технічних наук, професор, особистість якого я завжди пов'язую з професійністю, людяністю, надзвичайною інтелігентністю. Насамперед я вдячна йому за науку життя і спілкування з людьми. Це вчений, поле діяльності якого є надзвичайно широким, а його інтереси завжди пов'язані з найактуальнішими науковими проблемами. Джерела формування різнобічності вченого, висвітлення видів його діяльності, ідей наукової творчості відображено у наукових працях і публіцистичних статтях.

З Ярославом Михайловичем я вперше зустрілась у 1995 році, коли приїхала до Львівської політехніки доповідати свою кандидатську дисертацію на кафедру хімічної інженерії та промислової екології, яку він очолював на той час. З перших хвилин знайомства мене вразила професійність і організованість Ярослава Михайловича, вміння коректно і делікатно вирішувати всі питання. Таке враження не змінилось і пізніше на етапі проходження попереднього слухання роботи й оформлення документів.

З роками наші шляхи розійшлися і я мала змогу лише знайомитись з науковими роботами Ярослава Михайловича, які завжди надихали мене на нові творчі ідеї. У 2004 році за рекомендацією спільної колеги по кафедрі знову звернулась до Ярослава Михайловича з проханням щодо консультування докторської дисертації, над якою почала працювати. Після ознайомлення з моїми працями та спілкування зі мною особисто, розпочалася наша багаторічна співпраця.





*Професор Т.М. Вітенько з професорами кафедри ЕОНС –  
Я.М. Гумницьким та М. С. Мальованим (2007 р.)*



*Проф. Я. Гумницький  
біля могили Івана Пулюя  
у Празі*

## Участь у наукових конференціях



*Презентація доповіді  
на конференції з хімічної інженерії  
у Гданську (2010 р.)*



*Доповідь на конференції  
з математичного моделювання  
(Київ, 2010 р.)*



*Презентація доповіді на конгресі з  
хімічної інженерії CHISA–2002*



*Президія міжнародної  
конференції з охорони довкілля  
(Краків, 2000 р.)*



*Презентація спільної доповіді з науковцями Ченстоховської політехніки (доктор І. Майхжак-Куцемба, професор Г. Отвіновські)*



*Презентація доповіді на конгресі з хімічної інженерії CHISA–2010*

## **Контакти з міжнародними вченими**



*Професор Я. Гумницький з дружиною та академіком РАН, головним редактором журналу ТОХТ професором О.М. Кутеповим*



*Зустріч з професорами Токайського університету Ї. Токано, Й. Мацуїта та учнем канд. техн. наук Т. Пелехом (Японія)*



*Зустріч голландського вченого-еколога доктора Франца ван дер Воерда (2006)*



*Зустріч з академіком ПАН  
професором Р. Погорецькі  
та професором Р. Петрусом*



*На міжнародному конгресі  
у Празі з професором  
О. Суберляком та професором  
С. Рудобаїштою (Росія)*

## **Педагогічна робота**



*Перший випуск екологів Львівської політехніки у 1996 р.*



*Випуск магістрів-екологів Львівської політехніки (2000 р.)*



*Після захисту магістерських робіт екологами  
Ченстоховської політехніки (2004 р.)*



*Професор Я. Гумницький  
голова міжнародної  
студентської конференції  
у м. Кракові (2001 р.)*



*Львівські студенти екологи  
на міжнародній  
студентській екологічній  
конференції у Краківській  
політехніці: вгорі студенти  
О. Ольховик та  
І. Чопко (2000 р.);  
внизу – студенти  
В. Сабадаш, Ю. Ятчишин,  
А. Срібна*



## Християнські цінності тербовлянської землі



*Село Зарванця – центр прощі*



*З родиною біля меморіального комплексу патріарху Йосипові Сліпому у с. Заздрість*



*Дружина Наталя з внучкою Анною біля ікони Тербовлянської Божої Матері у соборі св. Юра*



*Участь у Святій Літургії, яку відправив Святіший Отець Іван Павло II (2001 р.) та коронував ікону Тербовлянської Божої Матері*



## Ярослав Гумницький і культура



*Біля пам'ятника  
Тарасові Шевченку в Києві*



*Біля пам'ятника  
Тарасу Шевченку у Варшаві*



*Дружина Наталя з українською  
діячкою Тетяною Беднаржовою на  
могілі Олександра Олеся у Празі*



*Біля пам'ятника Івану Підкові  
у Львові*



*Під час сесії НТШ  
з професором Іриною  
Даценко та професором  
Степаном Стойком*



*На посвяченні пасок  
з народним художником  
України Володимиром  
Патиком та його  
дружиною Ромою*



*З художниками Лесею та Євгеном Безнісками*



*З художниками Олею та Романом Безпалків*



*На відпочинку з народним артистом України Володимиром Ігнатенком*



*З письменником Левком Різником*

## Нагороди професора Я. Гумницького



Окреслене ним коло досліджень, що було пов'язане з кавітаційними механізмами впливу на технологічні процеси виявилось дуже широким, але впродовж усіх років, що пов'язані з науковою роботою, Ярослав Михайлович завжди вмів зосередитись на головному, знайти зерно й коректно відсікти зайве. Його поради послуговували фундаментальним внеском у розуміння механізмів кавітаційної дії та в розвиток теорії кавітації загалом.

На той час, коли дисертація була підготовлена й передана йому для редагування доводилось працювати ще більше разом. Він завжди аргументовано й професійно знаходив слабкі місця, надавав консультації та просто й зрозуміло відповідав на всі запитання.

Вражає його здатність працювати з великою кількістю літератури, зокрема польською й англійською мовами, глибока духовність, обізнаність щодо всіх новинок творчості літераторів і театралів, прагнення пізнання історичної культури Української нації. За найменшої можливості Ярослав Михайлович цікавиться всім, що стосується наукової, літературної та духовної спадщини України. Так, згадую, з яким натхненням він розповідав мені про Івана Пулюя, могилу якого відвідав у Празі, перебуваючи на міжнародній конференції, і таких прикладів безліч. Немає жодної прем'єри у драматичному чи оперному театрах Львова, які би він не відвідав. На столі у нього завжди лежать свіжі номери літературної газети. Він дуже любить своє місто й багато розповідає про Львівський історичний музей, який є другим за розмірами історичним музеєм України, про Національний музей та його скарбниці українського мистецтва, Львівську галерею мистецтв, Етнографічний музей тощо.

Однак для Ярослава Михайловича головним кредом залишається “Працювати для науки та загальних ідей – це і є особистим щастям”, – як сказав А.П. Чехов.

*З глибокою повагою Т.М. Вітенько,  
доктор технічних наук, професор Тернопільського національного  
технічного університету ім. Івана Пулюя*

## Анотація і бібліографія наукових праць

### 1. Масообмін у системі тверде тіло – рідина за умови зовнішнього газопідведення

Газопідведення до системи тверде тіло-рідина (Т – Р) перетворює її з двофазної у трифазну (Т-Р-Г). Інертна газова фаза, діючи гідродинамічно на систему Т-Р, спричиняє ефекти двох видів:

1) перемішує рідину, збільшуючи швидкість її турбулентних пульсацій, що супроводжується зменшенням товщини пограничного дифузійного шару  $\delta_\theta$ , який зв'язаний з коефіцієнтом масовіддачі  $\beta$  співвідношенням

$$\beta = D / \delta_\theta, \quad (1.1)$$

де  $D$  – коефіцієнт молекулярної дифузії.

2) контактуючи короткочасно з твердою фазою, газові бульбашки ізолюють її від доступу свіжого реагенту, що загалом уповільнює масообмін.

Проведено дослідження різних аспектів організації трифазної системи. У кожному дослідженні найскладніше було оцінити пульсаційну компоненту швидкості рідини, визначити яку теоретично чи інструментально є неможливо.

Передусім вивчали розчинення фіксованої твердої частинки у рідині, що перемішується газом. Як відомо гідродинамічна ситуація

визначається числом Рейнольдса  $Re = \frac{v_f l}{\nu}$  ( $v_f$  – пульсаційна

компонента швидкості рідини;  $l$  – характерний лінійний розмір;  $\nu$  – коефіцієнт кінематичної в'язкості). Значення швидкості оцінювалось на основі теорії локальної ізотропної турбулентності А.М. Колмогорова, згідно з якою між енергією дисипації та швидкістю  $v_f$  у турбулентному потоці існує залежність

$$\varepsilon \approx \frac{v_f^3}{L}, \quad (1.2)$$

де  $L$  – лінійний масштаб пульсації рідини.

Експериментальні результати узагальнено критеріальною залежністю

$$Sh = 0,224 Re^{0,65} Sc^{0,33}, \quad (1.3)$$

у якій  $Sh = \beta l / D$  – число Шервуда;  $Sc = \nu / D$  – число Шмідта.

Однією із сучасних моделей масообміну є модель обнови поверхні, згідно з якою у турбулентному режимі відбувається заміщення елементів рідини біля поверхні твердої фази через безконечно малі відрізки часу. Якщо вважати, що розчинення з твердої поверхні відбувається у напівбезмежному середовищі, як у теорії Хікбі, Данквертса, Кишиневського для системи рідина – газ, і масовіддача реалізується як молекулярна дифузія через шар рідини товщиною  $\delta$ , то

$$\delta \approx \sqrt{Dt}, \quad a \quad \beta \approx \sqrt{D/t}. \quad (1.4)$$

Перевірка прийнятої концепції проводилась у вертикальній трубі-розчиннику. Закріплена тверда частинка омивалась газорідинним потоком, що рухався у снарядному режимі, внаслідок чого частинка поперемінно контактувала або з рідиною, або з газовим снарядом, що змивав рідину з її поверхні. Короткочасний контакт рідини з твердою частинкою дає змогу вважати умови масообміну нестационарними, а час контакту  $t$  необхідний для оцінки коефіцієнта  $\beta$  визначався

$$t \approx \frac{d(1-\alpha)}{v_{g0}} \left( 1 + \frac{l_0}{d} \right), \quad (1.5)$$

де  $l_0$  – довжина рідинного елемента;  $v_{g0}$  – фіктивна швидкість газу;  $\alpha$  – газовміст.

Результати експериментів узагальнено критеріальною залежністю

$$Sh = 0,07 \left( 1 + Fr^{0,2} \right) \sqrt{Pe}, \quad (1.6)$$

де  $Pe = \frac{v_{f0}d}{D(1-\alpha)}$  – число Пекле;  $Fr = \frac{V_c^2}{gd^5\alpha}$  – модифікований критерій Фруда.

Залежність  $Sh \approx \sqrt{Pe}$  корелюється із аналогічною залежністю, що одержана внаслідок узагальнення розчинення одинарної частинки у суто рідинному потоці ( $Fr = 0$ ) з точністю до постійного коефіцієнта.

Розчинення завислої частинки у газорідинному потоці також спричинює нестационарні аспекти за рахунок попереминого попадання твердої частинки у газову бульбашку чи в елемент рідини. У цьому разі необхідно враховувати як гідродинамічну ситуацію за рахунок обтікання, так і пульсаційну складову, тому узагальнення дослідних даних визначається двочленним критеріальним рівнянням

$$Sh = \left(0,8 Re^{0,5} + 4,5 * 10^{-2} Re_*^{0,8}\right) \sqrt[3]{Sc}, \quad (1.7)$$

де  $Re = wd/v$ ;  $Re_* = v_f d/v$ ;  $w$  – лінійна швидкість руху рідини.

У промисловій практиці розчиненню підлягає не одна частинка, а їхня множина, що утворює стаціонарний або “киплячий” шар. У разі стаціонарного шару введення газової фази у рідинний потік збільшує швидкість її переміщення без зростання витрати рідини. Це приводить до істотного збільшення коефіцієнта масовіддачі  $\beta$  за одночасного зростання вихідних концентрацій. Одержане кінетичне рівняння, що описує масообмін стаціонарного шару з газорідинним потоком, таке

$$Sh = \left(0,395 + 4,71\varepsilon^{3,33}\right) Re_e^m Sc^{0,33}, \quad (1.8)$$

де  $\varepsilon$  – газоміст шару;  $Re_e = v_f d_e/v$  – число Рейнольдса для характеристики гідродинаміки у шарі зернистого матеріалу;  $d_e$  – еквівалентний діаметр шару

$$m = 0,8 - 0,55\varepsilon \text{ для } 0,3 \leq \varepsilon \leq 0,97$$



$$m = 0,64 \text{ для } 0 \leq \varepsilon < 0,3$$

Умовам без газовідведення відповідає значення  $\varepsilon = 0$ , а рівняння (1.8) повністю збігається з поданою в літературі залежністю.

У разі завислих частинок, що розчиняються у газорідинній суміші (“киплячий” шар), одержано залежність

$$Sh = 0,32 Re^{0,8} Sc^{0,33} \left( \frac{d}{L} \right)^{0,5}, \quad (1.9)$$

яка означає зростання коефіцієнта масовіддачі  $\beta$  зі збільшенням діаметру частинки  $d$ , що пояснюється більшою інерційністю крупних частинок. Це приводить до виникнення більших відносних швидкостей обтікання твердих частинок рідиною. Значення  $\varepsilon$  визначалось через енергію, що її віддає газ рідині, а пульсаційна компонента швидкості рідини  $v_f$  тоді дорівнюватиме

$$v_f \approx \sqrt[3]{v_g g L}.$$

У геотехнологічних методах добування мінеральної сировини, створенні підземних сховищ нафти і газу розчиненню підлягають об’єкти з великими лінійними розмірами. До особливостей підземного розчинення належить трудність одержання високих відносних швидкостей руху рідини. У багатьох випадках розчинення відбувається в умовах природної конвекції, а будівництво підземного сховища триває довгий час. Застосування газових та газорідинних струмин забезпечує ефект вертикальної інтенсифікації розчинення і разом з тим не впливає на кінцеві вихідні концентрації розчину. На основі теоретичного аналізу дано оцінку пульсаційної компоненти швидкості рідини  $w_f$ , що генерується енергією введеного газу, за величиною дисипованої енергії та закону загасання інтенсивності хвиль

$$w_f \approx \frac{v_g d_c^2 g H}{\nu^2} e^{1/L}. \quad (1.10)$$

Ми описали кінетику розчинення плоских вертикальних об’єктів критеріальними залежностями для двох характерних прикладів, що лімітуються роллю газової фази:

а) приклад, коли далекобійність струмини  $l$  є меншою від відстані сопла до стінки  $L$ :

$$Sh = 1,57 * 10^{-8} Re^{1,76} Sc^{0,33} \left( \frac{l}{L} \right)^{1,27}; \quad (1.11)$$

б) далекобійність газової струмини  $l$  є більшою за відстань  $L$ :

$$Sh = 65,85 Re^{0,28} Sc^{0,33} Fr^{-0,58} \quad (1.12)$$

Re – число Рейнольдса на виході із сопла.

1. Аксельруд Г.А., Гумницький Я.М., Креховецький О.М., Зелінськи М. Массообмен между закрепленным телом и газожидкостной смесью // Теор. основы хим. технологии. – 1977. – Т. 11. – № 1. – С. 134–136.

2. Гумницький Я.М., Креховецький О.М. Растворение слоя твердых частиц газожидкостным потоком // Вест. ЛПИ Химия и хим. технология. – Львов: Вища шк., 1979. – № 130. – С. 147–149.

3. Гумницький Я.М., Креховецький О.М. Исследование процесса растворения стационарного слоя твердых частиц газожидкостным потоком // Журн. прикл. химии. – 1979. – С. 470. – Деп.ВИНИТИ, 1978, № 2225-78.

4. Гумницький Я.М., Креховецький О.М. Растворение твердых тел в вертикальном газожидкостном потоке, движущемся в снаряжном режиме // Теор. основы хим. технологии. – 1983. – Т. 17. – № 6. – С. 767–770.

5. Аксельруд Г.А., Гумницький Я.М., Креховецький О.М. Математическая модель процесса растворения руды в проточном и противоточном растворителе // Хим. машиностроение. – 1985. – Вып. 42. – С. 99–102.

6. Гумницький Я.М., Малык Ю.А. Кинетика растворения твердых тел в движущемся газожидкостном потоке // Журнал прикладной химии. – 1986. – Деп в ВИНИТИ 11.10.86, № 7153-В86.

7. Гумницький Я.М., Креховецький О.М. Массообмен между витающими твердыми частицами и жидкостью, перемещаемой газом // Теор. и практика перемешивания в жидких средах. Тез. и докл. V Всес. конф.- Ленинград. – 1986. – С. 169–171.

8. Гумницький Я.М., Креховецький О.М. Массообмен при фильтрационном движении газожидкостной смеси через слой твердого материала // Доклады и научные сообщения. – Львов. – С. 151–153.

9. Гумницький Я.М., Басий В.А. Интенсификация растворения затопленными газовыми струями // Вестник ЛПИ. Химия, технология веществ и их применение. – 1988. – № 221.

10. Гумницький Я.М., Орел С.М. Математическое моделирование процесса растворения твердых веществ при проектировании и управлении гибкой системой // Реахимтехника-3. Тез. докл. – Черкасы. – 1989. – С. 171–172.

11. Гумницький Я.М., Малик Ю.О. Інтенсифікація масообміну в трьохфазній системі // Тези доп. ІХ міжнародної конф. “Удосконалення процесів та апаратів хім., харч. і нафтохім. виробн.”. – Одеса. – 1996. – Ч. 3. – С. 51.

12. Gumnitsky J., Nowak W. Wpływ hydrodynamiki na wymianę masy w układzie trójfazowym // Materiały Ogólnopolskiej konferencji przepływów wielofazowych-Gdansk. – 1997. – S. 88–91.

13. Gumnitsky J., Jurym I. Intensification of physical processes of dissolution of solid bodies in three – phase system/ Materiały Ogólnopolskiej konferencji przepływów wielofazowych. – Gdansk. – 1997. – S. 92–95.

## 2. Дифузійно-контрольовані процеси хімічної взаємодії, що супроводжуються виділенням газової фази (хімічне кипіння)

### 2.1. Вільна (природна) конвекція

У хімічній, металургійній, харчовій та інших галузях промисловості існують процеси, в яких внаслідок хімічної взаємодії між твердим тілом і рідиною виділяється газова фаза. Цей процес ми назвали за аналогією з теплообміном під час кипіння рідини “хімічним кипінням”. Накопичення газу в рідині приводить систему в метастабільний стан. Переведення системи у стійкий (стабільний) стан супроводжується утворенням нової газоподібної фази. Визначено критичний радіус газової бульбашки та значення концентрацій реагенту, за яких відбувається їхнє зародження. Зароджена на твердій поверхні газова бульбашка збільшується до значення відривного діаметру за рахунок підведення газу із рідини, що його оточує. Визначено два крайні випадки у механізмі підведення газу до поверхні бульбашки. Перший випадок відповідає умовам рівності рівноважних концентрацій газу у всіх точках за рахунок інтенсивного перемішування. Для цих умов швидкість зростання визначається

$$\frac{R^2}{D_g t} = A_1 Ja, \quad (2.1)$$

де  $R$  – радіус бульбашки у момент часу  $t$ ;  $D_g$  – коефіцієнт дифузії газу у рідині;  $Ja$  – дифузійне число Якоба.

Другий випадок відповідає умовам, коли газова бульбашка оточена шаром реагенту, у якому концентрація газу перевищує рівноважну. Для цих умов швидкість зростання дорівнює

$$\frac{R^2}{D_g t} = A_2 Ja^2, \quad (2.2)$$

$A_1, A_2$  – коефіцієнти.

Методом фотографування експериментально досліджувалося зростання бульбашок  $\text{CO}_2$ . Кінетичне рівняння зростання має такий вигляд

$$\frac{R^2}{D_g t} = 0,2Ja^{1,55}. \quad (2.3)$$

Показник степеня у числі Якоба свідчить про змішаний механізм зростання бульбашок.

Відривний діаметр бульбашок  $d_0$ , який визначався методом фотографування, дав змогу виявити наявність двох режимів їхнього утворення. Збільшення та відривання бульбашок  $CO_2$  відбувається у квазістатичних умовах, де основну роль відіграють сили поверхневого натягу. У разі відривання бульбашок гідрогену основну роль відіграють інерційні сили з боку рідини, які значно переважають сили поверхневого натягу.

Експериментальні дослідження масообміну під час “хімічного кипіння” проводились в умовах вільної (природної) конвекції. Термін “вільна конвекція” використано у такому змісті, що перемішування здійснюється лише газовими продуктами, що виділяються внаслідок хімічної реакції, та відсутні інші зовнішні джерела перемішування. За умов вільної конвекції значення коефіцієнта масовіддачі  $k_R$  визначаються концентрацією реагенту  $c_R$ . Графічна інтерпретація цієї залежності дала змогу виділити три області: область низьких концентрацій, у якій  $k_R$  спадає зі збільшенням концентрації; область концентрацій, у якій зі збільшенням концентрацій  $k_R$  зростає, та область високих концентрацій, де фіксується значний спад коефіцієнта масовіддачі. Така складна залежність пояснюється цією роллю, яку відіграють перш за все газоподібні продукти реакції у кінетиці розчинення.

В області низьких концентрацій бульбашки газу не досягають відривного розміру, а гідродинаміка системи визначається природною конвекцією розчинних продуктів реакції. Зі збільшенням  $c_R$  окремі бульбашки відриваються з твердої поверхні. Виникає два протилежних потоки, що мінімізує значення коефіцієнта масовіддачі. В області концентрацій реагенту  $c_R > 2\text{кг/м}^3$  перемішування газовими бульбашками є переважним, коефіцієнт масовіддачі зростає зі зростанням  $c_R$ , аналогічно як в

умовах теплообміну під час кипіння збільшується коефіцієнт тепловіддачі зі зростанням температурного напору. Ми назвали цю область областю розвинутого бульбашкового режиму. Гідродинаміка системи визначалась числом Рейнольдса, в якому швидкість перемішування рідини газовими бульбашками оцінювалась швидкістю газоутворення, а число Рейнольдса запишеться

$$Re_* = \frac{nk_R c_R d}{\rho_g V_p} . \quad (2.4)$$

Для широкого значення чисел  $Re_*$  ( $10^{-2} - 10^3$ ) дослідні дані узагальнено критеріальним рівнянням

$$Sh_0 = 24 \sqrt{Re_*} \sqrt[3]{Sc} . \quad (2.5)$$

За певних величин концентрації реагенту коефіцієнти масовіддачі досягають максимального значення, після чого відбувається їхнє зменшення. Аналіз різних систем дав змогу узагальнити досягнення максимальних (критичних) масових потоків, що характеризуються найвищими значеннями  $k_R$  критеріальною залежністю

$$Re_{*kp} = 3,8 \cdot 10^{-7} Ar^{0,7} , \quad (2.6)$$

у якій у число Рейнольдса входить критична концентрація реагенту, а  $Ar$  є числом Архімеда.

В області концентрацій вищих за критичні, спостерігається зниження  $k_R$  під час зростання концентрації за рахунок ізоляції твердої поверхні газовими бульбашками. Якщо ефект перемішування оцінюється числом  $Re_*$ , то ефект екранування поверхні ми охарактеризували комплексом  $\psi$ , що представляє собою долю поверхні, що зайнята газовими бульбашками. Критеріальна залежність, що описує масообмін в області високих концентрацій має такий вигляд

$$Sh_0 = 0,11 \sqrt{Re_*} \sqrt[3]{Sc} \psi^{-0,6} \frac{\rho_p}{\rho_g} . \quad (2.7)$$

Одержані результати підтверджують аналогію хімічного кипіння з процесом теплообміну під час кипіння в умовах

природної конвекції. Разом з цим, виявлено відмінності між цими процесами. Головні з них: протилежні напрямки руху розчинних продуктів реакції та газових бульбашок у процесі масообміну на відміну від теплообміну під час кипіння, неможливість одержання плівкового режиму газоутворення, що відповідно блокує транспорт реагента до поверхні взаємодії.

1. Гумницький Я.М., Зелински М. Массообмен между твердым телом и жидкостью в трехфазной системе // Доклады и научные сообщения. – Львов: Вища шк. – 1974. – С. 130–132.

2. Аксельруд Г.А., Гумницький Я.М., Дубинин А.И. Кинетика процессов выщелачивания, сопровождающихся выделением газообразной фазы // В кн. Тез. докл. 1. Всесоюзной конф. по гидрометалургии. – М., 1974. – С. 29–30.

3. Аксельруд Г.А., Гумницький Я.М., Зелински М. Массообмен между твердым телом и газожидкостной смесью, осложненный выделением газообразной фазы // Инж.-физ. журнал. – 1975. – Т. 28, № 4. – С. 417–422.

4. Аксельруд Г.А., Гумницький Я.М., Зелински М. Влияние абсорбции на газовыделение в случае массообмена между твердым телом и жидкостью // Вест. ЛПИ Химия и хим. технология. – 1975. – № 95. – С. 171–173.

5. Akselrud G.A., Dubynin A.I., Gumnitsky J.M. Solid – liquid mass transfer followed by evolution of gaseous phase // Lect. Summaries J: 5. Int. Congress of Chem. Engng. – Prague. – 1975. – P. 19–21.

6. Gumnitsky J. The kinetic of bubbles growth on solid surface by chemical reaction // Proceedings of the 3<sup>rd</sup> Conference on Appl. Chem. unit Operat. and Proc. – Veszprem. – 1977. – P. 129–133.

7. Akselrud G.A., Gumnitsky J.M., Dubynin A.I. Heat and mass transfer in chemical reactions accompanied by gas evolution // Heat Transfer – Soviet Research. – 1978 – V. 10. – № 2. – P.147–151.

8. Гумницький Я.М., Кривошеев В.И., Аксельруд Г.А. Влияние продуктов реакции на кинетику массообменных процессов, сопровождающихся газообразованием // Журн. прикл. химии. – 1982. – Т. 55. – № 4. – С. 837–841.

9. Гумницкий Я.М., Кривошеев В.И. Гидродинамика и массообмен между твердым телом и жидкостью, сопровождающихся газообразованием, в условиях свободного падения // Инж.-физ. журнал. – 1983. – Т. 45. – № 1. – Деп. В ВИНТИ, № 1074–83.
10. Абдельазиз Р., Гумницкий Я.М. Кинетика гетерогенного химического взаимодействия, сопровождающегося газовойделением // В кн. Интенсификация тепло – и массообменных процессов в хим. технологии. Тез. докл. – Казань. – 1984. – С. 61–62.
11. Гумницкий Я.М. Химическое кипение в условиях свободной конвекции // Инж.-физ. журнал. – 1985. – Т. 48, № 5. – С. 788–792.
12. Аксельруд Г.А., Гумницкий Я.М. Кинетика гетерогенных химических реакций, сопровождающихся газовойделением // Журн. прикл. химии. – 1986. – Т. 59. – № 10. – С. 2185–2189.
13. Аксельруд Г.А., Гумницкий Я.М., Маллик С. Исследование кинетики химического кипения в области пузырькового режима // Инж.-физ. журнал. – 1987. – Т. 52. – № 2. – С. 205–209.
14. Маллик С., Гумницкий Я.М. Механизм взаимодействия меди с азотной кислотой // Вест. ЛПИ. Химия, технология веществ и их применение. – Львов:Вища школа. – 1987. – № 211. – С. 74–75.
15. Гумницкий Я.М., Маллик С. Анализ процессов газовойделения при взаимодействии твердого тела с жидким реагентом на основании внутренних характеристик // Теор.основы хим. технологии. – 1988. – Т. 22. – № 1. – С. 126–128.
16. Гумницкий Я.М., Малык Ю.А., Кривошеев В.И. Процессы химического растворения сопровождающиеся образованием побочных фаз // Chemical Enginireeng Problem of Momentum, Heat and Mass Transfer. – Wroclaw (Poland). – 1988. – P. 198–204.
17. Аксельруд Г.А., Гумницкий Я.М., Дубинин А.И. Кинетика химического взаимодействия твердого тела с жидкостью в условиях газообразования // Теор. основы хим. технологии. – 1989. – Т. 23. – № 1. – С. 28–33.
18. Анисуззаман М., Гумницкий Я.М. Массообмен при взаимодействии твердого тела с жидкостью в условиях газовойделения при повышенных давлениях // Теор.основы хим. технологии. – 1990. – Т. 24. – № 1. – С. 689–691.



## 2.2. Хімічне кипіння в умовах вимушеної конвекції

Рухома рідина проявляє додаткову динамічну дію на газові бульбашки, які утворюються на твердій поверхні взаємодії фаз. Під впливом цієї дії зменшується відривний діаметр бульбашок, покращується транспорт реагенту до поверхні взаємодії, збільшується число центрів газоутворення і частота їхнього відривання тощо. Ці фактори впливають на масообмін. Дослідження розчинення закріплених кулястих частинок у розчинах кислот різних концентрацій в апараті з мішалкою показало, що значення коефіцієнта масовіддачі визначаються співвідношенням між інтенсивністю масообміну, обумовленого газовиділенням, та інтенсивністю конвективного масообміну, що обумовлений вимушеним рухом рідини. Обидва фактори є співрозмірними. В області низьких концентрацій реагенту важливішою є роль вимушеної конвекції, за високих концентрацій реагенту вплив вимушеної конвекції значно слабшає, але може настати навіть ситуація, коли в умовах перемішування значення  $k_R$  стають меншими за аналогічні значення в умовах вільної конвекції. Гідродинамічна ситуація за вимушеної конвекції визначається числом Рейнольдса для механічного перемішування  $Re_M$ , а процеси утворення і виділення газу через дифузійний критерій Якоба  $Ja$ . Ступінь інтенсифікації оцінювалась через співвідношення коефіцієнтів масовіддачі в умовах вимушеної конвекції до природної конвекції

$$\frac{Sh}{Sh_0} = 1 + 1,15 * 10^{-4} \frac{Re_M}{Ja} + 1,2 * 10^{-9} \left( \frac{Re_M}{Ja} \right)^2. \quad (2.8)$$

У реалізованих у промисловості процесах розчиненню підлягає не окрема частинка, а ансамбль частинок, які характеризуються певним дисперсним складом, формою, співвідношенням твердої та рідкої фаз тощо. Експериментальні дослідження показали практично незалежність  $k_R$  від інтенсивності перемішування. Винятком є лише область невисоких концентрацій, де спостерігається незначне газовиділення. Одержані дані дали змогу

зробити висновок, що за концентрацій  $c_R > 2,3 \text{ кг/м}^3$  недоцільно затрачати значну потужність на перемішування рідини. Дослідні дані для розчинення з газовиділенням в апараті з пропелерною мішалкою у широкому діапазоні концентрацій та діаметрів частинок дали змогу встановити залежність

$$Sh = 1,187 \sqrt[3]{Sc Ar} Ja^{-0,5} \left( \frac{d}{d_M} \right)^{-0,5}. \quad (2.9)$$

Дослідження процесу хімічного кипіння у завислому стані твердої фази, який утворюється рідким реагентом, дало можливість встановити складну залежність коефіцієнта масовіддачі  $k_R$  від концентрації реагенту. За концентрацій  $c_R = 10\text{--}40 \text{ кг/м}^3$  значення  $k_R$  не залежать від  $c_R$ , а відбувається взаємна компенсація газоутворення і вимушеної конвекції. Зі збільшенням  $c_R$  посилюється внесок газоутворення, але ослаблюється внесок вимушеної конвекції.

Дослідні дані узагальнено критеріальними рівняннями для двох діапазонів концентрацій

$$\begin{aligned} 1) \quad 10 < c_R < 40 \text{ кг/м}^3 \quad Sh &= 0,21 \sqrt[3]{Sc Ar} \\ 2) \quad 40 < c_R < 180 \text{ кг/м}^3 \quad Sh &= 0,64 \sqrt[3]{Sc Ar} Ja^{-0,5} \end{aligned} \quad (2.10)$$

### **2.2.1. Масообмін за сумісного газовиділення та газовідведення**

Суть проблеми полягає в тому, що до системи, у якій відбувається масообмін з виділенням газової фази, вводиться додатково інертний газ, роль якого полягає у турбулізації реагенту, зриву з поверхні газових бульбашок ще до досягнення ними відривних діаметрів, часткової короткочасної ізоляції твердої поверхні, що сприяє умовам нестационарності, для яких є характерним досягнення високих коефіцієнтів масовіддачі. Порівняння механічного перемішування з пневматичним засвідчило, що останнє є кращим засобом інтенсифікації. Цей парадокс пояснюється тим, що під час механічного перемішування рідина обтікає тверду частинку з бульбашками газу, що

знаходяться на поверхні, і penetрація реагенту в простір між бульбашками є утрудненою. Пневматичне перемішування, зриваючи з твердої поверхні газову фазу, сприяє підведенню багатой реагентом рідини.

Під час барботування газу сумарний ефект інтенсифікації масообміну одержується за рахунок накладання двох ефектів: газотворення і газопідведення. У разі розчинення закріплених частинок у рідині, що перемішується газом, ефект інтенсифікації узагальнений критеріальною залежністю, яка за формою нагадує залежність (2.8)

$$\frac{Sh}{Sh_0} = 1 + 9,5 * 10^{-4} \frac{Re_*}{Ja} + (0,54 - 0,025Ja) Re_*^{0,1}, \quad (2.11)$$

де  $Re_*$  – це число Рейнольдса, у якому пульсаційна компонента швидкості рідини визначається через енергію дисипації газу.

Дослідження масообміну між твердим тілом і газорідним потоком в умовах хімічного кипіння гідродинаміка оцінюється не лише наведеними вище числами  $Re_*$  та  $Ja$ , але і числом  $Re$ , що визначає гідродинаміку рідини.

Отримана узагальнена критеріальна залежність має вигляд

$$\frac{Sh}{Sh_0} = 1 + (5,75 - 0,25Ja) * 10^{-7} Re_*^{1,5} Re^{0,45} Ja^{-1,3}, \quad (2.12)$$

у якій  $Sh_0$  – це число Шервуда для умов вільної конвекції.

1. Аксельруд Г.А., Гумницький Я.М., Дубинин А.И., Зелінські М. Массообмен при химическом взаимодействии твердого тела с движущейся жидкостью, осложненный выделением газообразной фазы // Инж.-физ. журнал. – 1974. – Т. 26. – № 1. – С. 64–67.

2. Аксельруд Г.А., Зелінські М., Гумницький Я.М. Массообмен в трехфазной системе в условиях механического и пневматического перемешивания // Инж.-физ. журнал. – 1975. – Т. 28. – № 3. – С. 417–422.

3. Гумницький Я.М., Кривошеев В.И. Кинетика процессов массообмена, сопровождающихся газообразованием, при механическом перемешивании // Журн. прикл. химии. – 1980. – Т. 53. – № 10. – С. 2378–2380.

4. Гумницкий Я.М., Кривошеев В.И. Кинетика растворения частиц шарообразной формы в условиях свободного падения // Вест. ЛПИ Химия, техн. веществ и их применение. – Львов: Вища шк. – 1980. – № 139. – С. 98–100.

5. Гумницкий Я.М., Кривошеев В.И. Гидродинамика и массообмен между твердым телом и жидкостью, сопровождающийся газообразованием, в условиях свободного падения // Инж.-физ. журнал. – 1983. – Т. 45. – № 1. – С. 147. – Деп. В ВИНТИ, № 1074-83.

6. Гумницкий Я.М., Малик С. Кинетика растворения с газовойделением в аппарате с мешалкой // Сб.: Химическое машиностроение. – К., 1987. – С. 47–49.

7. Гумницкий Я.М., Кривошеев В.И., Орел С.М. Химическое растворение с газовойделением в аппарате с мешалкой // Журнал прикладной химии. – 1987. – Т. 52. – № 2. – С. 205–209.

8. Гумницкий Я.М., Орел С.М., Кривошеев В.И. Химическое растворение с газовойделением в реакторе с мешалкой // Теор. и практика перемешивания в жидких средах. – Тез. докл. V Всес. конф. – Ленинград. – 1986. – С. 91–94.

9. Гумницкий Я.М., Малык Ю.А., Кривошеев В.И. Процессы химического растворения, сопровождающиеся образованием побочных фаз // Chem. Engineering Problem of Momentum, Heat and Mass Transfer. – Wroclaw (Poland). – 1988. – P. 198–204.

10. Аксельруд Г.А., Гумницкий Я.М., Дубынин А.И. Кинетика химического взаимодействия твердого тела с жидкостью в условиях газообразования // Теор. основы хим. технологии. – 1989. – Т. 23, № 1. – С. 28–33.

11. Gumnitsky Ya., Volikova N. Mathematical simulation of the diffusion-controlled processed of chemical interaction // International AMSE conference: Applied Modelling & Simulation. – AMSE 93 Press. – P. 279–282.

12. Гумницкий Я.М., Малик С. О роли газообразной фазы в кинетике взаимодействия меди в азотной кислоте // Укр. хим. журнал. – 1989. – Т. 55. – № 5. – С. 473–476.

13. Гумницкий Я.М., Новак В., Заман М. Массообмен при растворении плоских пластин, образующих горизонтальной целевой канал // Теор. основы хим. технологии. – 1999. – Т. 33. – № 4. – С. 375–379.

## 2.3. Практична реалізація масообміну в умовах газопідведення та газовиділення

2.3.1. *Інтенсифікація розчинення калійних руд введенням інертного газу.* Інтенсифікація досягається за рахунок переведення частинок калійної руди у зважений стан, що сприяє збільшенню як коефіцієнта масовіддачі, так і поверхні контакту фаз. Розроблена математична модель процесу розчинення полідисперсної руди на основі рівнянь матеріального та кінетичного балансу, у якому коефіцієнт масовіддачі залежить від діаметра частинок, за умови перемінної рушійної сили. Математична модель розроблена для реального тристадійного протитечійного розчинника. Розв'язок моделі, що складалася з системи диференціальних рівнянь, записаних для кожної комірки, яка імітувала реактор ідеального перемішування, проводився за допомогою комп'ютера і розрахункові дані порівнювались з дослідними.

1. Аксельруд Г.А., Гумницький Я.М., Креховецький О.М. Математическая модель процесса растворения руды в прямоточном и противоточном растворителе // Хим. машиностроение. – 1985. – Вып. 42. – С. 99–102.

2. Гумницький Я.М., Орел С.М., Кречмер Г.А. Математическая модель процесса получения хлористой меди реактивной квалификации в реакторе колонного типа // Всесоюзная конф. “Реахимтехника-2”. Тез. докл. – Ч. II. – 1985. – С. 91–92.

3. Гумницький Я.М., Орел С.М., Кривошеев В.И. Химическое растворение с газовойделением в реакторе с мешалкой // Теор. и практика перемешивания в жидких средах. Тез. докл. V Всес. конф. – Ленинград. –1986. – С. 91–94.

4. Гумницький Я.М., Орел С.М. Математическое моделирование процесса растворения твердых веществ при проектировании и управлении гибкой системой // Реахимтехника-3. Тез. докл. – Черкассы. – 1989. – С. 171–172.

5. Гумницький Я.М., Орел С.М., Кречмер Г.А. Универсальная установка для растворения порошкообразных и кусковых материалов // Всесоюзная конф. “Реахимтехника-3”. Тез. докл. – Черкассы. – 1989. – С. 54.

2.3.2. Розклад фосфогіпсу у трифазному реакторі з пневмотранспортом реагуючої системи. Одержання фосфатної кислоти сірчаноокислотним розкладом фосфорної сировини супроводжується утворенням великих об'ємів гіпсу з певними залишками фосфатної кислоти (фосфогіпсу). Перероблення фосфогіпсу є актуальним завданням. Ми запропонували метод перероблення фосфогіпсу в амонію сульфат та кальцію карбонат. Досліджено механізм та кінетику процесу взаємодії гіпсу з амоній карбонатом, який одержується в реакторі під час реакції водного розчину аміаку з вуглекислим газом, який виконує не лише функцію реагенту, але і перемішуючого та транспортуючого засобу. До особливостей цього процесу слід зарахувати той факт, що на поверхні гіпсу відкладається твердий продукт взаємодії – кальцію карбонат, через шар якого відбувається дифузія реагенту до твердої поверхні. Ми встановили, що процес протікає у змішаній області, тобто швидкість дифузії та швидкість хімічної реакції можна зіставити. Кінетичне рівняння, що визначає швидкість зменшення відносного діаметра частинки  $\varphi$ , має вигляд

$$\frac{t}{1-\varphi} = \frac{\rho_s R^2}{n D c_R} \left[ \frac{(1+\varphi)}{2} + \frac{1}{2(\alpha-1)(1-\varphi)} \left\{ 1 - [\alpha - (\alpha-1)\varphi^3]^{0.667} \right\} \right] + \frac{\rho_s R}{n k_R c_R}, \quad (2.13)$$

де  $t$  – час;  $D$  – коефіцієнт дифузії;  $k_R$  – константа швидкості реакції;  $R$  – радіус;  $c_R$  – концентрація;  $\alpha$  – коефіцієнт.

За низьких температур процес протікає у змішаній області. Підвищення температури сприяє швидшому зростанню  $k_R$ , що переводить процес у дифузійну область.

Розроблено математичну модель реактора, рекомендації щодо його впровадження.

1. Гумницький Я.М., Малык Ю.А., Ратыч Л.Ф. Кинетика процесса разложения гипса раствором карбоната аммония // Вест. ЛПИ Химия, технология веществ и их применение. – Львов: Вища шк. – 1985. – № 191. – С. 71–72.

2. Способ переработки фосфогипса на сульфат аммония и карбонат кальция: А.с. 1296512, МКИ С0 1с 124 / Г.А. Аксельруд,

Я.М. Гумницький, Ю.А. Малык – Опубл. 15.03.85, Бюл. изобр. № 10. – С. 3.

3. Гумницький Я.М., Малык Ю.А. Кинетика растворения твердых тел в движущемся газожидкостном потоке // Журн. приклад. химии. – 1986. – Деп. в ВИНТИ 11.10.86, № 7153–В86.

4. Гумницький Я.М., Малык Ю.А., Юрым Н.Ф. Разложение фосфогипса в трубчатом реакторе с пневмотранспортом трехфазной реагирующей смеси // Химия, техн. соединений азота, фосфора. Тез. докл. – Ч. II. – Львов, – 1988. – С. 51–52.

5. Гумницький Я.М., Малык Ю.А., Вынар Г.Ю. Механизм и кинетика процесса разложения гипса карбонатом аммония, сопровождающегося образованием нерастворимой пленки продуктов реакции // Деп. УкрНИИНТИ 1990, № 207– Ук90. – 12 с.

6. Gumnitsky J., Malyk J., Abuobeida A. Utylizacja osadów z przemysłu kwasu fosforowego // Wykorzystanie osadów sciekowych – techniczne i prawne uwarunkowania. Materiały konferencyjne. – Czestochowa. – 1996. – S. 239–243.

7. Гумницький Я., Малик Ю., Мальований М. Хемічне перероблення фосфогіпсу для охорони довкілля від шкідливого антропогенного забруднення // Праці Наукового Товариства ім. Т. Шевченка. Екологічний збірник. – 2001. – Т. VII. – С. 129–134.

8. Гумницький Я.М., Малик Ю.О. Масообмін при хімічній переробці фосфогіпсу в трифазній системі // Науковий вісник УДЛУ. Розробка сучасних технологій деревообробки. – Львів, 2001. – Вип. 11.2. – С. 126–128.

2.3.3. *Технологія нітратнокислотного розчинення сірковмісної сировини.* Основною породою, що входить до складу сірчаних руд, є кальцію карбонат. Хімічна взаємодія  $CaCO_3$  з нітратною кислотою дає змогу вивільнити сірку. Цей процес був особливо актуальним для перероблення флотоконцентрату. Зазначена взаємодія є дифузійно-контрольованою реакцією, що супроводжується виділенням газової фази. На дослідно-промисловій установці періодичної дії відпрацьовано норми технологічного режиму всіх стадій процесу та розроблено технологічну схему цього процесу.

1. Гумницький Я.М., Кривошеев В.И., Третьевич А.В., Черненко Т.А. Физико-хімічні основи розкладання серної руди азотною кислотою в присутстві нітрату кальцію // В кн.: Проблеми совершенствования технологии производства серы. – М.: НИИТЭХИМ. – 1981. – С. 52–57.

2. А.с.СССР 808360 С01В17/027 Способ переработки серо-содержащих руд // Черненко Т.А., Гумницький Я.М., Кривошеев В.И. и др. – Опубл. 30.11.1982 в Б.И. № 44.

3. Черненко Т.А., Гумницький Я.М., Кривошеев В.И., Третьевич А.В. Кинетика разложения серосодержащих руд азотной кислотой в присутствии нитрата кальция // В кн.: Технология производства серы. – М.: НИИТЭХИМ, 1980. – С. 63–66.

4. Черненко Т.А., Третьевич А.В., Гумницький Я.М., Кривошеев В.И. Технологическая схема получения серы из флото-концентрата методом кислотного разложения // В кн. Перспективы повышения качества серы и расширение ее ассортимента Тез. докл. Всесоюз. совещание. – Черкассы. – 1980. – С. 43–44.

5. Гумницький Я.М., Кривошеев В.И., Черненко Т.А. Расчет продолжительности азотнокислотного разложения известняка // Вест. ЛПИ Химия, технология веществ и их применение. – Львов: Вища шк. – 1982. – № 163. – С. 78–79.

2.3.4. Масообмін під час хімічного розкладу фосфатної сировини у виробництві екстракційної фосфатної кислоти. Екстракційна фосфатна кислота одержується згідно з гетерогенною хімічною реакцією між фосфоритом та кислотою, найчастіше сульфатною:



Внаслідок взаємодії утворюються три нові фази: рідка (фосфатна кислота), тверда (кальцію сульфат) і газова (гідроген флюорид, а також можливе виділення діоксиду вуглецю). Утворені продукти значно впливають на кінетику розкладу. Вперше одержано залежності коефіцієнта масовіддачі для цього процесу, які враховують сумісний вплив газоутворення та дисперсності



сировини на кінетику:  $\beta = f(c, d)$ . Складено математичну модель процесу, що дає змогу серед інших параметрів визначити час розкладу частинок фосфатної сировини  $\tau$  до їхнього певного розміру  $d$

$$\tau = \int_d^{d_0} \frac{d(d)}{Ad^2(B + \psi d^3)^{1,85}}, \quad (2.14)$$

де  $A, B, \psi$  – параметри, що визначаються масовими, концентраційними, фізичними величинами.

Запропоновано математичну модель процесу розкладу для полідисперсної системи з використанням кривої розподілу частинок за їхнім діаметром та розбиттям всього інтервалу розмірів частинок на відрізки з певним кроком, що є необхідним, враховуючи залежність  $\beta$  від діаметру. Рішення одержується у виді кривих розподілу у певні проміжки часу, а площа під кривими функцій розподілу відповідає масі непрореагованого фосфату.

Проведено дослідження щодо оптимізації норми затравки кальцію сульфату (400–500 % від стехіометричної кількості). Досліджено розклад фосфоритів Каратау на дослідно-промисловій установці, змонтованій на Самаркандському хімічному комбінаті, у якій основним апаратом слугував трифазний реактор. Проведення процесу розкладу у цьому реакторі неперервним методом показало, що за ступеня розкладу вихідної сировини 97–98 % питома продуктивність щодо  $P_2O_5$  з одиниці об'єму реактора у 1,5–3 рази вища за аналогічний показник в наявному промисловому апараті.

1. Аксельруд Г.А., Гумницький Я.М., Винников А.Я. Оптимизация работы промышленного экстрактора в производстве фосфорной кислоты // Химическая технология. – 1983. – № 6. – С. 32–33.

2. Гумницький Я.М., Винников А.Я., Якубов Р.Я. Кинетика разложения фосфоритов Каратау в трехфазной системе // В кн.: Тезисы докладов отраслевого совещания: Проблемы производства экстракционной фосфорной кислоты и охрана природы. – М. – 1985. – С. 24–25.

3. Гумницький Я.М., Винников А.Я., Якубов Р.Я. Механизм и кинетика разложения фосфоритов Каратау смесью серной и фосфорной кислот. – Львов, 1983. – 9 с. – Деп. в УкрНИИНТИ 10 апр. 1984. – № 639 УкД84.

4. Гумницький Я.М., Винников А.Я. Влияние соотношения гипс: апатит на степень разложения апатитового концентрата // Вест. ЛПИ Химия, технология веществ и их применение. – Львов: Вища шк. – 1982. – № 181. – С. 92–93.

5. Гумницький Я.М., Винников А.Я. Кинетика разложения апатита серной кислотой // Львов. политех. ин-т. – Львов, 1985. – 12 с. – Деп. УкрНИИНТИ 1985. – № 2040 – Ук85.

6. Гумницький Я.М., Воликова Н.Н. Математическая модель азотнокислотного разложения полидисперсной смеси апатита // Теор. основы хим. технологии. – 1995. – Т. 29. – № 6. – С. 639–642.

7. Гумницький Я.М., Воликова Н.М. Математична модель процесу кристалізації гіпсу при сірчаноокислотному розкладі фосфатної сировини // Вісник ДУ “Львівська політехніка” “Хімія, технологія речовин та їх застосування. – 1996. – № 298. – С. 108–110.

8. Гумницький Я.М., Мальований М.С., Малик Ю.О., Воликова Н.М. Комплексна переробка фосфатної сировини України // Хімічна промисловість України. – 1998. – № 1. – С. 8–9.

9. Гумницький Я.М., Воликова Н.М. Математична модель сірчаноокислотного розкладу мілкодисперсних частинок фосфориту // Вісник ЛПИ Хімія, технологія речовин та їх застосування. – Львів, 1993. – № 270. – С. 57–59.

10. Способ кристаллизации из растворов преимущественно сульфата кальция и устройство для его осуществления: А.с. 1724302 СССР / Я.М. Гумницький, В.И. Кривошеев, Н.Ф. Юрим, О.Я. Винников. – Оpubл. 07.04.92. Бюл. изобр № 13.

11. Gumnitsky J., Volikova N. Mathematical simulation of the diffusion-controlled process of chemical interaction // Applied Modelling and Simulation. – Lviv: AMSE Press. – 1993. – P. 107–112.

12. Гумницький Я.М., Малик Ю.О., Воликова Н.М. Безвідходна технологія одержання екстракційної фосфорної кислоти // Стан і

перспективи розвитку хімічної науки та промисловості в Західному регіоні України. Тези наук. конф. – Львів, 1994. – С. 195.

13. Гумницький Я.М., Волікова Н.М. Визначення часу розчинення при азотнокислотному розкладі апатиту // Вісник ДУ “ЛП”. “Хімія, технологія речовин та їх застосування”. – Львів, 1995. – № 285. – С. 95–97.

2.3.5. *Каталітичні процеси у системі тверде тіло-рідина, що супроводжуються газовиділенням.* Досліджувались каталітичні процеси у системі тверде тіло-рідина, що супроводжуються газовиділенням, напр., реакція деалкілювання за наявності твердого каталізатора з метою одержання антиоксидантів. Ці процеси належать до дифузійно-контрольованих. Основна увага зосереджувалась на розробленні конструкцій реакторів, у яких за високого ступеня перетворення досягається ефективна дегазація газорідинної суміші за рахунок створення низького гідростатичного тиску в шарі каталізатора.

1. Лучейко И.Д., Гумницький Я.М., Горбовой П.М., Бодров В.П. Определение состава комплекса 2-трет-бутил-4-метилфенол : метиленгликоль весовым методом. – К., 1990. – 7 с. – Деп. в УкрНИИНТИ 20.02.1990. – № 252.

2. А.с. 1632485 СССР, МКИ<sup>3</sup> В01 J 8/02. Каталитический реактор конденсации / Лучейко И.Д., Гумницький Я.М., Бодров В.П. и др. – Опубл. 07.03.91. Бюл. № 9.

3. Лучейко И.Д., Гумницький Я.М., Бодров В.П. Элементарная теория разбрызгивания жидкой среды в аппаратах с горизонтальной лопасной мешалкой // В сб. Теория и практика перемешивания в жидких средах. Тез. докл. – Ленинград, 1990. – С. 45–46.

4. Лучейко И.Д., Гумницький Я.М., Бодров В.П. К расчету пусковой мощности мешалки с криволинейными лопастями // В сб. Теория и практика перемешивания в жидких средах. Тез. докл. – Ленинград, 1990. – С. 47.

### 3. Масообмін у системі тверде тіло – рідина за умов штучного газовиділення

Теоретичним та експериментальним дослідженням процесів масообміну в системі тверде тіло – рідина з газовиділенням встановлено інтенсифікувальну роль газової фази, яка полягає у безпосередній дії на пограничний дифузійний шар, тому що вона зароджується, зростає та відривається лише від твердої поверхні. Значення газової фази полягає у переміщенні рідини дифузійного шару у разі збільшення газових бульбашок, руйнуванні цього шару та створенні умов нестационарності, що характеризуються високими значеннями коефіцієнтів масовіддачі. Крім цього, відриваючись від твердої поверхні, газові бульбашки інтенсивно перемішують рідину, що також інтенсифікує процес масообміну. Ми досліджували штучне газовиділення вакуумуванням системи та застосуванням явища кавітації.

#### 3.1. Фізичне розчинення твердих тіл за умови вакуумування системи

Розчинення твердих тіл відбувається з їхньої поверхні, на якій за умови вакуумування системи виникає парова фаза. Процес здійснюється за таких умов вакуумування, коли рідина закипає. Парова фаза гідродинамічно діє на систему, інтенсифікуючи процес масообміну. Одночасно випаровується деяка частина рідини, що підвищує концентрацію розчину та зменшує у подальшому витрати теплової енергії на стадії його концентрування.

Дослідження гідродинаміки за умови вакуумування системи дали змогу встановити залежність інтенсивності перемішування рідини  $I, м^3/(м^2с)$  від величини розрідження  $P$  та діаметра апарата  $D$

$$I = 3 * 10^{-3} D^{-1,23} P^{0,34}. \quad (3.1)$$

Підтверджено аналогію масообміну в умовах вакуумування системи з виділенням парової фази у вигляді бульбашок та тепловіддачі під час кипіння рідини. До досягнення значень коефіцієнта масовіддачі  $4 * 10^{-4} м/с$  між аналогічними коефіцієнтами існує пряма пропорційна залежність. Однак за вищих значень

теплого потоку експериментальні значення  $\beta$  менші за теоретичні, що пов'язано зі збільшенням ступеня екранування поверхні твердої частинки паровими бульбашками  $\varphi$ , а кореляційна залежність має вигляд

$$\beta = \alpha 10^{-7} (1 - \varphi). \quad (3.2)$$

Порівняння розчинення в умовах вакуумування системи до традиційних методів дало змогу виявити більшу інтенсивність масообміну, що пов'язано з специфікою пароутворення на твердій поверхні та руйнуванням пограничного дифузійного шару.

Досліджено розчинення нерухомого шару зернистого матеріалу та встановлено значну інтенсифікацію цього процесу як за рахунок дії бульбашок на пограничний шар, так і за рахунок зростання швидкості руху рідини через наявність у ній парової фази. Дослідні дані узагальнено складною напівлогарифмічною залежністю, в якій гідродинаміка оцінюється двома числами Рейнольдса:  $Re$  характеризує поступальний рух рідини, а  $Re_*$  – гідродинаміку, що визначається паровою фазою та оцінюється на основі локальної ізотропної турбулентності

$$\frac{Sh}{\sqrt[3]{Sc}} = 10,2 + 0,395 Re^{0,64} + 5,05 \ln Re_* \quad (3.3)$$

Порівняння розчинення великих плоских об'єктів дало можливість встановити залежність швидкості розчинення від їхньої орієнтації. Якщо для горизонтально розміщених зразків ступінь інтенсифікації досягла значення 2,98, то за таких самих умов для вертикальних зразків вона становила 3,3. В останньому прикладі існує додаткова інтенсифікація паровою фазою, що піднімається вгору.

1. *Gumnitsky J., Yurym M., Osman Atyja.* The mass transfer during dissolving solids in condition of gas supply and in vacuum // Konferencja naukowa. Inzenieria chemiczna. – 1994. – Т. 1. – Р. 319–326.

2. *Гумницький Я.М., Осман Атія, Юрим М.Ф.* Ідентифікація дифузійно-контрольованих процесів хімічного кипіння // Стан і перспективи розвитку хімічної науки та промисловості в Західному регіоні України. Тези наук. конф. – Львів. – 1994. – С. 196.

3. Гумницький Я.М., Осман Атія, Юрим М.Ф. Інтенсифікація процесу розчинення твердих тіл у вакуумі // Вісник ДУ “ЛП” “Хімія, технологія речовин та їх застосування”. – Львів, 1995. – № 285. – С. 90–92.

4. Гумницький Я.М., Осман А., Юрим І.М. Кінетика фізичного і хімічного розчинення плоских об’єктів // Вісник ДУ “ЛП” “Хімія, технологія речовин та їх застосування”. – Львів, 1996. – С. 106–108.

5. Гумницький Я.М., Майструк І.М. Інтенсифікація процесу хімічного розчинення у трифазній системі при розрідженні // Хімічна промисловість України. – 1999. – № 2. – С. 23–26.

6. Gumnitsky J., Yuryum I., Pelekh T. The mass transfer at the system with solid phase accompanied by evolution of gaseous phase // 12<sup>th</sup> International Congress of Chemical and Process Engineering. CHISA 96. – Praha, 1996. – P. 157–162.

7. Гумницький Я.М., Майструк І.Н. Растворение твердых частиц при кипении под вакуумом. Аналогия процесса с теплообменом при кипении // Теор. основы хим. технологии. – 2002. – Т. 36. – № 2. – С. 156–160.

8. Gumnitsky J., Jurym I. Intesification of phisical processes of dissolution of solid bodies in three – phase system / Materiały Ogólpolskiej konferencji przepływów wielofazowych. – Gdansk, 1997. – S. 92–95.

9. Гумницький Я.М., Юрим І.М. Розчинення твердих частинок в умовах кипіння рідини // Вісник ДУ “ЛП” “Хімія, технологія речовин та їх застосування”. – Львів, 1997. – С. 149–151.

10. Гумницький Я.М., Юрим І.М. Інтенсивність перемішування паровою фазою // Вісник ДУ “ЛП” “Хімія, технологія речовин та їх застосування”. – Львів, 1997. – № 333. – С. 194–195.

11. Гумницький Я.М., Майструк І.М. Кінетичні закономірності розчинення твердих тіл в мовах вакуумування // Технічні вісті. – 1998. – № 1. – С. 39–42.

12. Гумницький Я.М., Майструк І.М., Юрим М.Ф. Аналогія процесів розчинення при вакуумуванні та теплообміну при кипінні // Тези доповідей X міжнародної конференції “Вдосконалення процесів та апаратів хімічних та харчових виробництв” (ІССТ-99). – Львів, 1999. – С. 53–54.

13. *Gumnitsky J., Majstruk I., Nowak W.* Mechanism and kinetics of physical process of dissolution with vacuuming of the system // 14<sup>th</sup> International Congress of Chemical and Process Engineering (CHISA 2000). – Praha, 2000. – P. 224.

14. Деклараційний патент на винахід 28632 А. Масообмінний апарат для системи тверда фаза-рідина / *І.М. Майструк, Я.М. Гумницький, М.Ф. Юрим.* Опубл. – 16.10.2000, Бюл. “Промислова власність” № 5-П.

15. Деклараційний патент на винахід 29215 А. Масообмінний апарат киплячого шару для системи тверда фаза-рідина / *І.М. Майструк, Й.Й. Ятчишин, М.Ф. Юрим.* Опубл. – 16.10.2000, Бюл. “Промислова власність” № 5-П.

### **3.2. Екстрагування з твердих тіл в умовах вакуумування системи**

Екстрагування з твердих тіл загалом лімітується внутрішньою дифузією з низькими коефіцієнтами масоперенесення. Турбулізація рідкої фази не впливає, або дуже незначною мірою прискорює цей процес. Одним із істотних методів інтенсифікації екстрагування з твердої фази є проведення процесу в умовах кипіння під вакуумом. Парові бульбашки зароджуються на твердій поверхні, зокрема на поверхні порового простору твердої частинки. Під час збільшення парова бульбашка витісняє з капіляру багату на цільовий компонент рідину у зовнішню рідинну фазу, а її місце займає екстрагент з низькою концентрацією компонента. Виникають високі градієнти концентрацій, що сприяє інтенсивному перенесенню маси. Під час свого збільшення бульбашка переміщає рідину всередині капіляру, що є відсутнім у звичайних методах екстрагування. Тобто всередині капіляру вимушено переміщається рідина, а кожне переміщення, як відомо, позитивно впливає на масообмін.

Для окремо взятих капілярів підтверджено наявність двох зон: конвективної дифузії та молекулярної дифузії. Одержано рівняння, яке визначає швидкість переміщення зони розчинення у капілярі

$\frac{dl}{d\tau}$  з урахуванням обох зон:

$$\rho_s \frac{dl}{d\tau} = \frac{1}{\frac{1}{\beta} + \frac{l}{D}} \left( c_s - \rho_s l \frac{S}{W} \right), \quad (3.4)$$

де  $\rho_s$  – густина твердої фази;  $c_s$  – концентрація насичення;  $S$  – поверхня розчинення;  $W$  – об'єм рідини.

У процесі досліджень виявлено циклічний характер відриву парових бульбашок, що підтвердило гіпотезу щодо нестационарного процесу масообміну, а також істотне збільшення зони конвективної дифузії, що дає змогу кінець кінцем рахунку у 2–3 рази інтенсифікувати процес під час вакуумування, порівнюючи з механічним перемішуванням.

Постійне вакуумування має той недолік, що парова бульбашка повинна вирости до відривного діаметра, за якого піднімальна сила перевершуватиме силу поверхневого натягу. Враховуючи, що

швидкість збільшення газової бульбашки  $\frac{dR}{d\tau}$  обернено

пропорційна до радіусу бульбашки  $R$

$$\frac{dR}{d\tau} = \frac{a}{R},$$

швидкість переміщення поверхні бульбашки буде тим меншою, чим більший її радіус. Тобто, у кінцеву фазу збільшення газової бульбашки її гідродинамічна дія на рідину всередині капіляра буде зменшуватись. Цього недоліку можна уникнути, застосувавши періодичне кипіння рідини, яке полягає у почерговому вакуумуванні системи та збільшенні тиску в системі до атмосферного, за якого відбувається сплескування бульбашок. Періодичне кипіння рідини дає змогу з одного боку досягти високих швидкостей переміщення поверхні бульбашки на початковій стадії її збільшення, а з іншого – внаслідок сплескування бульбашки відбувається швидкий приплив екстрагента всередину твердої частинки. Інтенсивний конвективний потік розчинника уможливорює істотно прискорити розчинення цільового компонента в поровому просторі за рахунок виникнення високих градієнтів концентрацій, створення нестационарних умов масообміну.



Проведені дослідження з одинарними капілярами, використовуючи залежність пересування границі розділу фаз  $l$  з часом  $t$ , дає змогу визначити  $D_e$ :

$$l = \sqrt{\frac{2D_e}{\rho_s} (c_s - c_n) \sqrt{t}}, \quad (3.5)$$

де  $D_e$  – ефективний коефіцієнт дифузії;  $c_s$ ,  $c_n$  – концентрації насичення та біля отвору капіляра.

Порівнянням значень  $D_e$  для різних методів інтенсифікації встановлено значну перевагу періодичного вакуумування. Наприклад, екстрагування калію хлориду з капіляру діаметром 0,7 мм за температури 75 °C дало можливість встановити такі величини  $D_e$ : механічне перемішування рідини –  $1 \cdot 10^{-8}$  м<sup>2</sup>/с; постійне вакуумування –  $3,1 \cdot 10^{-8}$ ; періодичне вакуумування –  $13,6 \cdot 10^{-8}$ . Наведені дані вказують на ефективність застосування методу періодичного вакуумування через зростання зони конвективної дифузії. Визначено оптимальне співвідношення між часом вакуумування та часом перемішування рідини після сплескування парової бульбашки, що складає відповідно 30 і 300 с.

Візуальні спостереження та дані кінознімання засвідчують, що швидкість сплескування бульбашки в умовах експерименту дорівнює швидкості її збільшення. Для цієї умови розраховано швидкість руху рідини в капілярі, а гідродинаміку визначено модифікованим числом Рейнольдса  $Re_m$ . Оцінка ефективності екстрагування в умовах періодичного вакуумування проводилась на основі параметрів, що є незмінними у конвективній області: ефективного коефіцієнта дифузії  $D_e$  та коефіцієнта молекулярної дифузії  $D_m$ . Симплекс дифузійної подібності визначався як функція числа  $Re_m$ :

$$D_e/D_m = f(Re_m). \quad (3.6)$$

1. Гумницький Я.М., Венгер Л.О., Юрим М.Ф. Оцінка зовнішньо – дифузійної стадії екстрагування з позиції нестационарності при вакуумуванні системи // Вісник НУ “Львівська політехніка” – 2001. – № 426. – С. 68–73.

2. Гумницький Я.М., Венгер Л.О. Юрим М.Ф. Експериментальне дослідження екстрагування з твердих частинок при вакуумуванні системи // ISSN 0321-0499. Вісник

Національного університету “Львівська політехніка” “Хімія, технологія речовин та їх застосування”. – Львів, 2002. – № 447. – С. 182–184.

3. Гумницький Я.М., Юрим М.Ф., Сеньків В.М.Т верда фаза, інтенсифікація екстрагування в умовах вакуумування системи // “Хімічна промисловість України”. – 2005. – № 1. – С. 28–30.

4. Gumnitsky Ja, Statyukha G., Senkiv V. Influence of Periodical Boiling of Under the Vacuum on Extraction from Solid Phase // CHISA 2006.–17<sup>th</sup> International Congress of Chemical and Process Engineering. – Praga. – 2006. – Summ. 2. – P. 448.

5. Гумницький Я.М., Сеньків В. Экстрагирование твёрдого вещества из линейных капилляров под вакуумом // Теор. основы хим. технологии. – 2006. – Т. 40. – № 3. – С. 272–277.

6. Гумницький Я.М., Сеньків В.Н. Исследование влияния гидродинамических условий на экстрагирование вещества из линейных капилляров // Вопросы химии и химической технологии. – 2006. – № 3. – С. 157–161.

7. Гумницький Я.М., Венгер Л.О., Юрим М.Ф. Масообмінний апарат для системи тверда фаза-рідина // Патент України № 66505 7В01J8/18 Опубл. 17.05.2004. – бюл. № 5.

8. Гумницький Я.М., Венгер Л.О., Юрим М.Ф. Масообмінний апарат для системи тверда фаза-рідина // Патент України № 66504 7В01J8/18 Опубл. 17.05.2004. – бюл. № 5

9. Гумницький Я.М., Юрим М.Ф., Сеньків В.М. Масообмінний апарат для системи тверда фаза-рідина // Патент України № 10143 Україна, 7В01J8/18 Опубл. 15.11.2005. – бюл. № 11.

Одним із методів інтенсифікації технологічних процесів є застосування явища кавітації, яке полягає у розриві суцільності рідинних струмин, появі парогазових бульбашок, виникненні пульсуючих тисків, хімічних перетвореннях у рідині тощо. Основна інтенсифікувальна роль кавітації для дифузійно-контрольованих процесів належить паро-газовій фазі через зародження, збільшення та подальше сплескування бульбашок. Дослідження виконувались в апараті з механічним перемішувальним пристроєм, що уможливорює виникнення кавітаційного режиму. Весь діапазон гідродинамічних режимів може бути поділений на: ламінарний, перехідний,

турбулентний та кавітаційний. Перші три режими не змінюють структури рідини, її фізичних та хімічних властивостей. Ці параметри рідини істотно змінюються за кавітаційного режиму, який виникає під час введення до системи більшої кількості енергії. Можемо говорити, що виникнення кавітаційного режиму, застосовуючи філософську термінологію, означає перехід кількості до нової якості. Межа переходу турбулентного режиму до кавітаційного визначається критичними числами Рейнольдса  $Re_{kp}$  і числа кавітації  $\sigma_{kp}$  і ці границі залежать від конструктивних особливостей апарату та фізико-хімічних властивостей середовища. Наприклад, для перемішувального пристрою з діаметром  $0,05 < d < 0,12$  м критичне число кавітації  $\sigma_{kp}$ , що є мірою відношення різниці тисків до динамічного напору, визначається емпірично отриманою залежністю

$$\sigma_{kp} = 0,56d^{-0,4}. \quad (3.7)$$

Визначено затрати енергії на кавітацію через функціональну залежність критерію Ейлера від числа Рейнольдса, а також співвідношення ефективної енергії, що спричиняє кавітаційні ефекти, до споживаної. Оскільки для масообмінних процесів головну роль відіграє парогазова фаза, оцінено її параметри – газоміст та діаметр бульбашок.

Гідродинаміка кавітаційного процесу визначається не лише швидкістю переміщення рідини та її турбулізацією. Крім цих факторів, вона визначається наявністю парогазової системи та продуктами фізико-хімічних перетворень у рідині. Відбувається зміна рН середовища, утворюється пероксид водню, озон, радикали, зокрема гідроксильні, що ідентифікувались аналітично. Математичне моделювання цих процесів ґрунтується на гіпотезі, що вода у кавітаційному полі стає активованою, а концентрація молекул активованої води  $c_{H_2O^*}$  є пропорційною питомій ефективній потужності  $\varepsilon$

$$c_{H_2O^*} = a \varepsilon, \quad (3.8)$$

внаслідок чого, наприклад, кінетичне рівняння, що описує процес надходження радикалів  $OH^*$  у воду, має вигляд

$$\frac{dc_{OH^*}}{d\tau} = k\varepsilon, \quad (3.9)$$

де  $k$  – константа швидкості.

Вплив кавітації на технологічні процеси досліджено на ряді об'єктів. Передусім досліджувався процес розчинення як дифузійно-, так і кінетично-контрольованих процесів. Інтенсивність розчинення оцінювали за коефіцієнтом масовіддачі  $\beta$  та порівнювали його значення з аналогічним коефіцієнтом за умови механічного перемішування. Коефіцієнт масовіддачі в умовах кавітації зростає на 5–30 %, що пояснюється як наявністю газової фази, так і подрібнювальним ефектом. Кінетично контрольоване розчинення вивчалось на прикладі розчинення лангбейніту. Коефіцієнти швидкості розчинення у 7,5–9 разів перевищують аналогічні коефіцієнти за умови розчинення у турбулентному режимі, що пояснюється зміною структури рідкої фази.

Зміна структури рідини дає змогу інтенсифікувати процеси екстрагування (у 1,5–3 рази), що підтверджено на реальних об'єктах (*Leonagus cardiaca* і *Valerianae officinalis*). На прикладі реакції окиснення йодистого калію з утворенням молекулярного йоду та конверсії лангбейніту у каїніт досліджено вплив кавітації на хімічні процеси. Показано перспективність застосування кавітації для хімічних процесів.

Досліджено інактивуючу дію гідродинамічної кавітації на мікроорганізми. Кавітаційний вплив зумовлений механічним руйнуванням клітин та їхньою хімічною деградацією під час контактування з радикалами і пероксидом водню.

1. *Витенько Т.Н., Гумницький Я.М.* Использование кавитационных устройств в массообменных процессах химической технологии // Промышленная теплотехника. – 2007. – Т. 29. – № 7. – С. 148–154.

2. *Vitenko T., Gumnitsky Y.* Hydrodynamic cavitation. Mechanism and kinetic appropriateness of mass transfer intensification in chemical technological processes // Materiały konferencyjne XIX Ogólnopolska konferencja Inżynierii Chemicznej i Procesowej. – 2007. – P. 471–472.

3. *Viten'ko T.N., Gumnitskiy Ya.M.* Массообмен при растворении твердых тел с использованием гидродинамических кавитационных устройств // Теоретические основы химической технологии. – Т. 40. – № 6. – М., 2006. – С. 639–644.

4. *Viten'ko T.N., Gumnitskiy Ya.M.* Mass transfer during dissolution of solids using hydrodynamic cavitation devices // Theoretical foundations of chemical engineering. – М., 2006. – V. 40. – № 6. – P. 598–603.

5. *Viten'ko T.M., Gumnitskiy Ya.M.* Вплив парогазової фази на кінетику розчинення в умовах кавітації // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – Харків. – № 3/6 (39). – 2009. – С. 4–8.

6. *Viten'ko T.M., Gumnitskiy Ya.M.* Дифузійні константи процесу екстрагування валеріани при попередній кавітаційній обробці екстрагенту // Вопросы химии и химической технологии – 2009. – № 2. – С. 161–166.

7. *Viten'ko T.M., Гащун О.Р., Гумницький Я.М.* Інактивація мікроорганізмів *e.coli* під час знезаражування йонами срібла в умовах кавітаційного перемішування // Вісник Нац. у-ту “Львівська політехніка” Хімія, технологія речовин та їх застосування. – 2010. – № 667. – С. 258–260.

8. *Vitenco T., Gashchyn O., Gumnitsky Ya., Petrus R.*, Mechanism and kinetic dependences of cavitation on microorganisms // Materials of the 19<sup>th</sup> International Congress of Chemical and Process Engineering CHISA. Summaries 3: Hydrodynamic Processes and Process Engineering. – Praha. – 2010. – P. 11.

9. *Vitenko T., Gumnitsky J.* Mass Transfer During Dissolution of Solids using Hydrodynamic Cavitation Devices // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 2006. – V. 40. – № 6. – P. 598–603.

10. *Vitenko T., Gumnitsky J.* Mechanism of the Activating Effect of Hydrodynamic Cavitation on Water // Journal of Water Chemistry and Technology. – 2007. – V. 29. – № 5. – P. 231–237.

## 4. Сорбційні процеси за участю твердої фази

Сорбційні процеси знаходять широке застосування у промисловості, особливо у хімічній, нафтопереробній, харчовій та в охороні навколишнього середовища. У навколишньому середовищі ґрунт є природним сорбентом, що поглинає газові та рідинні токсичні сполуки. За участю твердих сорбентів можливі такі сорбційні процеси:

Фізична адсорбція — Хемосорбція — Йонний обмін.

### 4.1. Фізична адсорбція

Процеси фізичної адсорбції широко вивчаються і з цього приводу опубліковано велику кількість наукових праць, серед яких багато монографій. Це питання висвітлено й у монографії, написаної також за участю автора:

1. *Petrus R., Aksehrud G., Gumnitsky J., Piantkowski W. Wymiana masy w ukladzie cialo stale – ciecz / Wyd. Politechniki Rzeszowskiej. – 1998. – 365 s.*

Проблематика досліджень процесу фізичної адсорбції охоплює коло питань щодо природи адсорбентів, їх активності, модифікації, статистики, кінетики та динаміки сорбції, математичного моделювання процесу, розрахунку апаратури. Особливо складними є процеси у нерухомому шарі адсорбенту.

Досліджено статистику та кінетику процесу адсорбції багатокомпонентної системи, характерної для переробної промисловості сільськогосподарської сировини. Дослідження проводились для діапазону концентрацій, що відповідають реальним стічним водам підприємств цієї промисловості. Ці концентрації лежать в області лінійної ізотерми адсорбції Ленгмюра та можуть бути описані рівнянням Генрі

$$a_i^* = m c_i, \quad (4.1)$$

де  $c_i$  – концентрація  $i$ -го компонента;  $a_i^*$  – статична активність компонента;  $m$  – коефіцієнт пропорційності.

Як адсорбенти, використовуються природні та синтезовані речовини. Ми синтезували сорбент на основі золи виносу теплових електростанцій та здійснили його модифікацію. Цей сорбент має властивості цеолітів. Досліджено його структуру та сорбційні властивості (активність, швидкість поглинання нафтових забруднень).

Математичні моделі процесу адсорбції ґрунтуються на рівняннях рівноваги, кінетики та балансових. З метою одержання аналітичних рішень виконується кускового-лінійна апроксимація ізотерми адсорбції, що для багатьох випадків є грубим наближенням, тому що операція диференціювання є дуже чутливою до кускових відрізків. Використання у математичній моделі рівняння ізотерми Ленгмюра дає змогу точніше описати динаміку процесу, що є дуже важливим для проектування адсорберів, визначення ефективності їхньої роботи, а також часу адсорбції до проскоку.

Введення в аналіз процесів адсорбції безрозмірної довжини шару адсорбенту  $\omega$ , що є комплексом

$$\omega = \frac{D\varepsilon Z}{wR^2}, \quad (4.2)$$

показує, що один і той самий шар висотою  $Z$  залежно від умов може або розтягуватись, або стискуватись ( $\varepsilon$  – пористість,  $D$  – коефіцієнт дифузії;  $R$  – радіус;  $w$  – швидкість). Ступінь досконалості будь-якого процесу визначається його коефіцієнтом корисної дії. Для адсорбції у шарі адсорбенту такою величиною слугує коефіцієнт використання шару  $K$ , який є відношенням маси адсорбованої речовини до проскоку максимальної адсорбційної здатності

$$K = \int_0^\omega \frac{\eta}{\eta + \delta} \left[ 1 - \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp(n^2 b(\eta)\tau) \right] d\omega \cdot 100\%. \quad (4.3)$$

Залежність (4.3) відповідає використанню нелінійної ізотерми адсорбції, що описується рівнянням Ленгмюра. Наприклад, розрахунок  $K$  для значень проскокової концентрації  $\eta = 0,1$  за величини  $\omega = 1$ ,  $K = 80$  %. У разі лінійної апроксимації ізотерми рівноваги ця величина не перевищує 20 %.

1. *Тижбір Г.А., Гумницький Я.М., Кочубей В.В.* Модифікація золи виносу ТЕС та властивості синтезованого на її основі адсорбенту // Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка” Хімія, технологія речовин та їх застосування. № 667. – 2010. – С. 245–250.

2. *Тижбір Г.А., Гумницький Я.М.* Теоретичний аналіз динаміки адсорбції у нерухомому шарі адсорбенту // I міжнародний конгрес. Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування. Збірник матеріалів. Львів. – 2009. – С. 54.

3. *Мацуська О.В., Гумницький Я.М., Параняк Р.П., Сабаш В.В.* Моделювання статистики та кінетики адсорбції йонів амонію // Тези доповідей II Міжнародної науково-практичної конференції “Комп’ютерне моделювання в хімії та технологіях і сталій розвиток”. – К., 2010. – С. 96–98. .

4. *Мацуська О.В., Параняк Р.П., Гумницький Я.М.* Адсорбція компонентів сточних вод природними сорбентами // Хімія і технологія води. – 2010. – Т. 32. – № 4. – С. 399–407.

5. *Gumnitsky J., Stepanov V., Obejda A.* Mass Transfer for Adsorption in layer // Konferencja naukowa “Inzenieria Chemiczna – wspolczesne kierunki badawcze”. – Krakow, 1994. – P. 319–326.

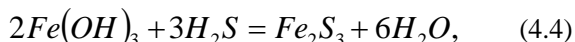
6. *Gumnitsky J., Stepanov V., Obejda A.* The Process of Adsorption in Fixed Layer of Adsorbent // CHISA 96. -12<sup>th</sup> International Congress of Chemical and Process Engineering. – Praga, 1996. – P. 142.

7. *Humnytsryy Y., Matsuska O.* Statics and Kinetics of Ammonium Nitrogen Sorption on Natural Zeolite under Periodic Conditions // Chemistry & Chemical Technology. – 2011. – Vol. 5. – № 1. – P. 7–11.



## 4.2. Хемосорбція

Хемосорбцією називається процес поглинання субстанції за участю хімічних реакцій. У цьому разі сорбентом є тверді високопористі речовини, які з адсорбтивом утворюють хімічні сполуки, через що унеможливується їхня десорбція, що особливо важливо для екологічної безпеки. Досліджено механізм та кінетику хемосорбційного поглинання  $H_2S$  синтезованим на основі природного бентоніту адсорбенту. Наявність у глині карбонатної складової дає змогу проводити її модифікування кислотними розчинами солей металів з введенням у склад глини гідролізованих металоформ (солі феруму та купруму). Наявність у складі сорбенту цих компонентів приводить до їх хімічної взаємодії з  $H_2S$



а сумарний процес складається з таких стадій:

- а) дифузія  $H_2S$  до поверхні адсорбенту та поверхнева реакція;
- б) дифузія  $H_2S$  всередину сорбенту;
- в) хімічна реакція всередині сорбенту.

Аналіз одержаних експериментальних результатів та їхній математичний опис дали змогу визначити коефіцієнт масовіддачі для стадії зовнішньої дифузії, коефіцієнт внутрішньої дифузії та константу швидкості хімічної реакції. Завдяки тому, що швидкість хімічної реакції значно перевищує швидкість дифузійних процесів, загалом весь процес лімітується дифузією і належить до процесів, що вивчає хімічна інженерія.

Іншим прикладом хемосорбційного процесу є використання твердих сорбентів для поглинання газових компонентів через їхню взаємодію у рідкій фазі, тобто процес хемосорбції відбувається у трифазній системі тверде тіло – рідина – газ. Хемосорбційний процес поглинання сірки діоксиду вапняковою суспензією складається з двох послідовних стадій:

1. Фізична абсорбція  $SO_2$  водою з утворенням сульфітної кислоти.
2. Хімічна взаємодія частинок вапняку з одержаною абсорбцією сульфітною кислотою.

Хемосорбція у системі газ – рідина теоретично та експериментально досліджена, про що свідчить значна кількість публікацій та монографій. Ефективність хемосорбції оцінюється коефіцієнтом прискорення  $E$ , який є відношенням густини масового потоку під час хемосорбції до фізичної абсорбції. Для трифазної системи за участю твердого сорбенту коефіцієнт  $E$  є відношенням рушійної сили процесу хемосорбції до рушійної сили фізичної абсорбції. Його значення одержано вперше і записується так:

$$E = \frac{1}{1 + \chi} \left( \chi e^{\tau_f} + e^{-\chi \tau_f} \right), \quad (4.5)$$

де  $\tau_f$  – безрозмірний час;  $\chi$  – відношення густин масових потоків.

На основі рівняння (4.5) розраховано та побудовано графічні залежності коефіцієнта  $E$  від безрозмірного часу  $\tau_f$  за різних значень величини  $\chi$ . Аналіз коефіцієнта прискорення вказує на шляхи інтенсифікації хемосорбції, передусім збільшення питомої поверхні твердого сорбенту та часу контактування газу з рідиною. Досліджено також процес хемосорбції хлористого водню вапняковою суспензією.

1. *Stepova K., Gumnitsky Y., Maquarrie D.* Mechanism and Mathematical Model of H<sub>2</sub>S Chemisorption on Modified Bentonite // Chemistry & Chemical Technology. – 2009. – V. 3. – № 3. – P. 169–172.

2. *Гумницький Я.М., Крип І.М., Степова К.В.* Модель хемосорбційного поглинання сірководню модифікованими природними сорбентами // Тези доповідей II Міжнародної науково-практичної конференції “Комп’ютерне моделювання в хімії та технологіях і сталий розвиток”. – К., 2010. – С. 177–118.

3. *Степова К.В., Гумницький Я.М., Макквейєрі Д.* Хемосорбція H<sub>2</sub>S на бентоніті модифікованому хлоридом міді (II) // Збірник тез доповідей V – ої науково-практичної конференції “Поступ в нафтогазопереробній та нафтохімічній промисловості”. – Львів. – 2009. – С. 252–253.

4. Гумницький Я.М., Дерейко К.О. Теоретический анализ процесса хемосорбционного поглощения газов в трехфазной системе // Теоретические основы химической технологии. – М. – 2007. – Т. 41. – № 4. – С. 365–370.

5. Gumnitsky J., Derejko K., Maliovanuj M., SO<sub>2</sub> chemisorption in three-phase system // Environmental protection into the Future. – Czestochowa: Wyd. Politechnika Czestochowska, 2007. – P. 173–177.

6. Дерейко Х.О., Гумницький Я.М., Мальований М.С. Хемосорбція діоксиду сірки суспензією твердого поглинача // Хімічна промисловість України. – 2001. – № 6. – С. 15–19.

7. Дерейко Х.О., Гумницький Я.М., Мальований М.С. Дослідження механізму та способів інтенсифікації хемосорбційного поглинання діоксиду сірки розчином гідроксиду натрію // Экологические и ресурсосбережение. – 2002. – № 2. – С. 33–37.

8. Гумницький Я.М., Дерейко Х. О., Новак В. Хемосорбція діоксиду сірки в апаратах з активною гідродинамікою // Сборник научных трудов международной научно-техн. конф. “Современные проблемы химической технологии неорганических веществ”. – Одеса. – 2001. – Т. 1. – С. 62–64.

9. Gumnitsky J., Derejko K., Yatchyshyn Y. Chemosorption treatment of flue gases produced by municipal solid waste incineration // 15th Intevnational Congress of Chemical and Process Engineering. – CHISA 2002. – 2002. – Summaries 3. – P. 231.

10. Дерейко Х.О., Гумницький Я.М., Мальований М.С. Хемосорбція SO<sub>2</sub> лужними розчинами у апаратах з високоінтенсивною гідродинамікою // Вісник ДУ “Львівська політехніка”. – 1999. – № 361. – С. 127–130.

#### **4.3. Йонний обмін**

Йонообмінні процеси грунтуються на вибіркового поглинанні одного або декількох компонентів йонообмінниками та виділенні у середовище заміщені на іоніті протийони. Як правило, хімічна взаємодія є швидкою, а процес лімітується дифузією. Ми розглянули процес обміну, що грунтуються на наявності у порах

обмінника двох зон: об'ємної та поверхневої. Це приводить до виникнення двох потоків йонів як у розчині в об'ємі пор, так і на внутрішніх поверхнях обмінника. Кожний з потоків характеризується своєю концентрацією  $c_2$  (у об'ємі) та  $c_a$  (на поверхні пор), а також відповідними коефіцієнтами дифузії  $D_c$  і  $D_a$ . За лінійної апроксимації кривої рівноваги з тангенсом кута нахилу ізотерми  $\Gamma$  ефективний коефіцієнт дифузії  $D^*$  має вид:

$$D^* = \frac{D_c + \Gamma D_a}{1 + \Gamma}. \quad (4.6)$$

а число Біо, яке характеризує граничні умови третього роду, записується

$$Bi = \frac{kR}{D_{1c} + \Gamma D_{1a}}. \quad (4.7)$$

Рішення диференціального рівняння з відповідними крайовими умовами та з врахуванням (4.6) і (4.7) дає результат для визначення середньої концентрації у зерні йонообмінника  $\bar{c}_a$

$$1 - \frac{\bar{c}_a}{c_p} = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \exp\left(-\mu_n^2 \frac{D^* t}{R^2}\right), \quad (4.8)$$

де  $\mu_n$  – корені характеристичного рівняння;  $B_n$  – коефіцієнт, що залежить від  $Bi$

Величини  $D^*$  і  $Bi$ , що входять у рівняння (3.8), мають складну структуру та відображають особливості кінетики йонного обміну. Відповідно до цієї теорії повинні спостерігатись такі особливості йоннообмінного процесу:

1) Кінетика процесу визначається областю зміни концентрацій  $c_2$ , яку можна поділити на дві частини: а) область  $\Gamma \gg 1$  та б) область  $\Gamma \approx 0$ . У першій з цих областей відповідно до залежності (4.6)  $D^* = D_a$ , а у другій –  $D^* = D_c$ . Якщо  $D_a$  і  $D_c$  значно відрізняються за величиною, то повинні спостерігатись різні швидкості йонного обміну згідно з відмінностями цих коефіцієнтів.

2) Критерій Біо визначає характер кінетики процесу. За малих значень  $Bi$  кінетика є зовнішньодифузійною, за великих –

внутрішньодифузійною. Із залежності (4.7) випливає, що в області  $\Gamma \gg 1$  за умови  $D_{1a} \neq 0$  можливі умови, за яких  $Bi < 1$ , режим є зовнішньодифузійний. Інтенсифікація обміну для цього випадку пов'язана з гідродинамічним впливом на систему. Для області  $\Gamma \approx 0$  характерним буде внутрішньодифузійний режим обміну.

Експериментальні дослідження йонного обміну катіонів  $Ca^{2+}$  та  $Hg^{2+}$  довели, що за однакової гідродинаміки величина  $Bi$  є значно меншою для  $Hg^{2+}$ , ніж для  $Ca^{2+}$ , тому можна передбачити ймовірніший зовнішньодифузійний механізм для йонів ртуті.

Наведені у літературі математичні моделі внутрішньодифузійної кінетики оснований на допущенні рівності рухомості обмінних йонів. Якщо ці рухомості не однакові, то необхідно враховувати і електроперенесення. Результируючий потік для цього випадку виражається законом Нернста-Планка, запис якого у безрозмірній формі має вигляд

$$\frac{\partial \gamma}{\partial \tau} = \frac{1}{\varphi^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left[ \varphi^2 \left( \frac{1+b\gamma}{1+a\gamma} \right) \frac{\partial \gamma}{\partial \varphi} \right], \quad (4.9)$$

де  $\gamma$  – безрозмірна концентрація;  $\varphi$  – безрозмірний діаметр;  $a, b$  – коефіцієнти, що залежать від величини зарядів йонів.

Розв'язок цього рівняння для умов досліду за пульсаційного руху рідини було виконане на ЕВМ “Минск-1” у 1969 р. і розрахункові значення були зіставлені з експериментальними. Виявилось, що відношення коефіцієнтів дифузії йонів водню до обмінюваних йонів кальцію дорівнює 2, що свідчить про необхідність врахування електричного потенціалу.

Дослідження процесу йоннообмінної сорбції лягло в основу розроблення технології переробки розчинів амонію сульфату на амонію нітрат із застосуванням катіоніту.

1. Аксельруд Г.А., Гумницький Я.М., Фиклисов И.Н. Кинетика ионного обмена // Инженерно-физический журн. – 1969. – Т. 17. – № 4. – С. 593–600.

2. Аксельруд Г.А., Гумницкий Я.М. Некоторые особенности кинетики ионного обмена при пульсационном движении жидкости // Инженерно-физический журн. – 1970.– Т. 19. – № 2. – С. 323–326.

3. Аксельруд Г.А., Гумницкий Я.М. Влияние пульсаций жидкости на эффективность использования слоя ионита // Инженерно-физический журн. – 1971. – Т. 20. – № 5. – С. 867–872.

4. Аксельруд Г.А., Гумницкий Я.М., Фіклістов І.М., Слоневський Р.В. Рішення рівняння кінетики йонного обміну на ЕОМ “Минск-1” // Вісник ЛПІ Хімія і хім. технологія. – 1971. – № 60. – С. 38–40.

5. Гумницкий Я.М., Малык Ю.А., Воликова Н.Н. Химическая переработка фосфогипса с использованием ионообменной технологии // Тезисы докл. “Экология и здоровье человека. Охрана водного и воздушного бассейнов. – К., 1995. – С. 41–42.

6. Гумницкий Я., Малик Ю., Мальований М. Хемічне перероблення фосфогіпсу для охорони довкілля від шкідливого антропогенного забруднення // Праці Наукового Товариства ім. Т. Шевченка. Екологічний збірник. – 2001. – Т. 7. – С. 129–134.

## **5. Нанесення покрить на тверді частинки та кінетика вивільнення цільових компонентів**

У фармацевтичній, хімічній, харчовій промисловості широкого застосування набули тверді дисперсні матеріали, покриті полімерними оболонками (капсулами). Полімерне покриття дає змогу захистити матеріал від шкідливого впливу вологи, світла, кисню повітря, регулювати вивільнення активного компонента залежно від зовнішніх умов, отримати речовини із заданою розчинністю, понизити небезпечність токсичних речовин. Капсулювання дає можливість зменшити необхідну дозу лікарських препаратів, створювати об'єкти напрямленої та пролонгованої дії, покращити екологічну обстановку під час застосування мінеральних добрив, отрутохімікатів.

До особливостей нанесення покрить на тверді частинки належить зараховувати той факт, що одночасно відбуваються декілька процесів: псевдозрідження твердої фази, нанесення полімеру з розчину плівкоутворювача, випаровування розчинника, забезпечення необхідної товщини покриття. Досліджено процес мікрокапсулювання в апараті з фонтануючим шаром твердих частинок. Розроблено математичну модель мікрокапсулювання, числове рішення якої уможливує прогнозування основних параметрів процесу. Встановлено взаємозв'язок між гідродинамічними та температурними режимами процесу мікрокапсулювання і його ефективністю. На якість полімерного покриття значний вплив мають добавки – пластифікатори, пігменти та стабілізатори. Досліджено процеси мікрокапсулювання лікарських препаратів (вітаміну А, каротину, прімеату), капсулювання мінеральних добрив, частинок адсорбенту з сорбованим цільовим компонентом. Розроблено конструкції апаратурного оформлення процесу капсулювання твердих частинок, які захищено авторськими свідоцтвами та патентами. Розроблено і запатентовано деякі склади полімерних дисперсій для капсулювання мінеральних добрив.

Значну увагу зосереджено на процесах вивільнення цільового компонента з частинок покритих полімерними композиціями. Математичне моделювання процесу вивільнення компонента та встановлення кінетичних констант дають змогу розрахувати швидкість масоперенесення через полімерну оболонку та час вивільнення компонента.

Процес вивільнення компонента з капсульованої частинки умовно можна розбити на три періоди. У першому періоді відбувається просочування полімерної оболонки розчинником. У другому періоді проходить розчинення твердої фази оболонки та дифузія компонента до оточуючого частинку розчину. Другий період закінчується повним розчиненням твердої фази. У третьому періоді здійснюється дифузія розчиненого у полімерній оболонці компонента внаслідок того, що концентрація в середині оболонки є вищою, ніж концентрація в оточувальному розчині та триватиме до цих пір, поки ці концентрації не вирівняються. Очевидно, що найважливішим є другий період. Ми одержали низку математичних залежностей для плоских і кулястих за формою частинок, а також для нерозчинних та розчинних оболонок. Наприклад, одна з найпростіших залежностей встановлює залежність між радіусом твердої частинки всередині капсули під час її розчинення та часом вивільнення  $\tau$ . Ця залежність має вигляд:

$$\frac{1}{3} \ln \left[ \frac{a^3 + R^3}{a^3 + r^3} \right] = k \frac{c_s}{\rho} \frac{R^2}{a^3 + R^3} \tau, \quad (5.1)$$

де  $R$  – початковий радіус частинки;  $r$  – біжучий радіус;  $k$  – коефіцієнт масопередачі через оболонку;  $c_s$  – концентрація насичення;  $a$  – коефіцієнт.

Дуже часто у фармацевтичній практиці кількість активного компонента є доволі незначною, тому він знаходиться разом з інертним наповнювачем. Існує дифузія компонента через шар інертної фази до внутрішньої поверхні оболонки, масопровідність через полімерну плівку та масовіддача до рідинного середовища. Розроблена математична модель на основі рівняння матеріального балансу та кінетичного дає змогу визначити середню концентрацію



компоненту всередині капсули для будь-якого часу вивільнення, швидкість переміщення границі розчинення, концентрацію активного компонента у розчині. Адекватність моделі перевірено експериментальними дослідженнями.

Досліджено ефективність застосування капсульованих мінеральних добрив. Відомо, що під час внесення гранульованих мінеральних добрив не вся їхня маса засвоюється рослинами. Виробництво добрив, покритих захисними оболонками, дає змогу одержати препарати пролонгованої дії, зменшити їхні втрати до навколишнього середовища.

Особливістю проведених досліджень було те, що вивільнення добрива відбувалось у зволене зернисте середовище, яке імітувало ґрунтове середовище. Основною умовою застосування капсульованих добрив є те, щоб пік вивільнення компонента збігався з піком вегетації рослин. З цією метою математичні моделі представлялись у вигляді безрозмірних параметрів та у графічному вигляді сім'ї кривих, які характеризують умови протікання процесу. Останні визначаються безрозмірним комплексом

$$I = \frac{D_1 \delta}{D_2 l} \quad (D_1, D_2 - \text{коефіцієнти дифузії у зернистому середовищі та}$$

у плівці;  $\delta$  – товщина плівки;  $l$  – відстань від поверхні капсули). Проведені вегетативні досліді за умови застосування капсульованих добрив та їхнього порівняння з контрольним посівом без внесення добрива та під час внесення гранульованих добрив дали змогу встановити, що застосування капсульованих добрив забезпечує оптимальні умови живлення рослин, не спостерігається втрат добрива, значно збільшує приріст біомаси.

У разі мікродозування активних речовин використовується метод їхнього вивільнення з консульованих частинок, що є зернами адсорбенту з попередньо сорбованими на них цільовими компонентами. Цей приклад є характерний тим, що відбувається десорбція речовини з адсорбенту, що сама собою є повільним процесом. Другою особливістю є те, що адсорбент безпосередньо контактує з полімерною плівкою. Такий випадок є характерним для

процесів тепломасообміну з граничними умовами четвертого роду і обов'язковою є умова рівності концентрацій на поверхні розділу фаз. Метою цієї моделі є визначення концентрації активного компонента в рідкій фазі  $c_1$

$$c_1 = \frac{\frac{4}{3} \pi R^3 \left[ m_3 \Gamma (c_{30} - \bar{c}_3) - m_2 (K_R^3 - 1) \frac{c_3(R)}{2} \right]}{\frac{2}{3} \pi R^3 m_2 (K_R^3 - 1) + W}, \quad (5.2)$$

де  $\Gamma$  – тангенс кута нахилу ізотерми сорбції;  $m_2$ ,  $m_3$  – пористості плівки та сорбенту;  $W$  – об'єм рідини;  $c_3$  – концентрації у зерні адсорбенту;  $K_R$  – коефіцієнт.

У разі використання розчинної полімерної оболонки необхідно визначити зміну товщини полімерної оболонки в часі. Так, для розглядуваного нами випадку зміну товщини плівки  $\delta$  можна визначити згідно з одержаною залежністю

$$\delta = \delta_0 + \frac{\alpha_{\max} M_0}{F} (1 - e^{-kt}) - \frac{c_s}{b} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{b\beta}{\rho} t\right) \right], \quad (5.3)$$

де  $M_0$  – початкова маса полімерної оболонки;  $F$  – її площа поверхні;  $\beta$  – коефіцієнт масовіддачі;  $\rho$  – густина полімеру;  $\alpha_{\max}$ ,  $b$ ,  $k$  – коефіцієнти.

Результати досліджень щодо вивільнення активних компонентів для різних ситуацій дають можливість прогнозувати час вивільнення, швидкість вивільнення і товщину полімерної оболонки.

1. *Gumnitsky J., Al-Alusi K.F., Demchuk I.* Solution Kinetics of Encapsulated Particles // Proceedings of the 5<sup>th</sup> Conference on Applied Chemistry, Unit Operation and Processes. – Hungary. – 1989. – V. 1. – P. 228–233.

2. *Гумницький Я.М., Демчук И.А.* Механизм процесса пленкообразования при капсулировании твердых лекарственных форм // XIV Менделеевский съезд по общей и прикладной химии. – М.: Наука. – 1989. – Т. 2. – С. 238.

3. Демчук І.А., Федін Й.М., Гумницький Я.М. та ін. Дослідження якості плівки утворення метилцелюлозних розчинів, призначених для покриття таблеток у псевдозрідженому шарі // Фармацевтичний журнал. – 1990. – № 1. – С. 44–47.

4. Гумницький Я.М., Демчук І.А., Аль-Алуси К., Федін І.М. Массоперенос из твердой фазы через нерастворимую полимерную оболочку // Теоретические основы химической технологии. – М., 1992. – Т. 26. № 4. – С. 510–515.

5. Гумницький Я.М., Демчук І.А., Аль-Алуси К., Федін І.М. Массоперенос из твердой фазы через растворимую полимерную оболочку // Теоретические основы химической технологии. – М., 1994. – Т. 28. № 1. – С. 8–13.

6. Gumnitsky J., Demchuk I. Nagursky O., Popovich O. Mathematical simulation of the Components Release from the Capsulated Particles // International AMSE conference: Applied Modelling & Simulation. – Lviv: AMSE 93 Press. – P. 107–112.

7. Гумницький Я.М., Демчук І.А., Попович О.Р. Математична модель процесу вивільнення лікарських препаратів з капсульованих частинок // Матеріали I Конгресу світової федерації укр. фарм. товариств. – Львів. – 1994. – С. 91–92.

8. Gumnitsky J., Zaslansky V., Demchuk I., Popovich O. Mathematical Model of Extraction of the Target Component from the Capsulated Particles // 12th International Congress of Chemical and Process Engineering (CHISA-96). – Praha. – 1996. – Summaries 3. – P. 82.

9. Демчук І.А., Нагурський О.А., Гумницький Я.М. Массоперенос из твердой шарообразной частицы, покрытой нерастворимой полимерной оболочкой // Теоретические основы химической технологии. – М. – 1997. – Т. 31. – № 3. – С. 1–4.

10. Нагурський О.А., Гумницький Я.М., Горбаль О.М. Масоперенесення з частинок, що містять інертну фазу // Вісник ДУ"ЛП": Хімія, технологія речовин та їх застосування. – 1997. – № 333. – С. 207–210.

11. Попович О.Р., Гумницький Я.М. Кінетичні закономірності капсулювання в псевдозрідженому шарі // Хімічна промисловість України. – 1998. – № 1. – С. 55–58.

12. *Gumnitsky J., Nagursky O., Popovich O.* Mass Transfer Adsorption Substance”s from Polymeric Shells // 14th International Congress of Chemical and Process Engineering (CHISA-2000). – Praha. – 2000. – Summaries 3. – P. 237.

13. *Гумницький Я.М., Попович О.Р., Нагурський О.А., Мартиняк О.В.* Математична модель процесу екстрагування активного компонента з адсорбенту через гідрогелеву оболонку // Технічні вісті. – Львів, 2000. – № 1–2. – С. 121–124.

14. *Гумницький Я.М., Мельничук В.В., Нагурський О.А.* Вплив фізико-хімічних показників середовища на швидкість розчинення мінеральних добрив // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2004. – № 6. – С. 54–58.

15. *Гумницький Я.М., Лjuta О.В., Сабдаш В.В.* Регулювання інтенсивності вивільнення компонентів із капсульованих мінеральних добрив у навколишнє середовище // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2007. – № 6. – С. 65–68.

16. *Sabadash V., Gumnitsky J., Nagursky O. and Ljuta O.* Application of encapsulated fertilizers for the ecological safety of agrosystems // Research and Application of New Technologies in Wastewater Treatment and Municipal Solid Waste Disposal in Ukraine, Sweden and Poland. – Lviv, Ukraine. – 2006. – Report No 14. Joint Polish – Swedish Reports.-Stockholm. – 2009. P. 85–93.

17. *Гумницький Я.М., Majchrzak-Kuceba I., Witowska O., Nagurski O., Popovich O., Demchuk I., Czopko I., Melnychuk V.* Transport aktywnych mikroskładników przez błonę polimerową w procesie ekstrakcji z kapsulek // Mikrozanieczyszczenia w srodowisku czlowieka. – Czestochowa. – 2003. – S. 496–502.

18. *Gumnitsky J., Nagursky O.A., Popovych O.R.* The desorbtion active component with adsorbent from polymeric shell // Process integration and modeling chromatography processes – Rzeszow, 2004. – P. 173–177.

19. *Gumnitsky Y., Lyuta O., Sabadash V.* Regulated Mass Transfer through Polymeric Capsules // Materiały konferencyjne: XIX Ogólnopolska konferencja Inżynierii Chemicznej i Procesowej. – Rzeszow. – 2007. – P. 179–183.

20. А.с.СССР 1681448. Способ нанесения пленочных покрытий на микрочастицы / *Демчук И.А., Гумницкий Я.М.* и др.
21. А.с.СССР 1727775. Способ получения кормовой добавки / *С.М. Паенок, Я.С. Гусак, Я.М. Гумницкий, И.А. Демчук.* – Оpubл. 23.04.92. – Б.из. № 15.
22. А.с.СССР 1793603. Способ нанесения пленочных покрытий на микрогранулы / *И.А. Демчук, Я.М. Гумницкий* и др.
23. А.с. 1835687. Установка для нанесения пленочных покрытий на твердые частицы / *И.А. Демчук, Я.М. Гумницкий* и др.
24. Патент України 10033. Апарат для нанесення покриття на частинки / *І.А. Демчук, П.Є. Андрійчук, Я.М. Гумницький* та інші. Оpubл. бюл. № 3 “Промислова власність”. – 1996.
25. Патент України 10902. Пристрій для нанесення покриття на частинки / *І.А. Демчук, П.Є. Андрійчук, Я.М. Гумницький* та інші. Оpubл. бюл. № 4 “Промислова власність”. – 1996.
26. Патент України 68811А. Полімерна дисперсія для капсулювання добрив / *В.В. Мельничук, Я.М. Гумницький, О.А. Нагурський.* – Оpubл. Бюл. № 8. – 2004.

## **6. Моделювання процесів тепломасообміну у системі тверде тіло – газ**

Тепломасообмін між твердою фазою та газом знаходить широке застосування у промисловості та охороні навколишнього середовища. Частково ці процеси висвітлено у розділі 4 на прикладах адсорбції та хемосорбції. У цьому розділі анотовано суто фізичний процес взаємодії твердого тіла з газовим середовищем на прикладі сушіння (десорбція вологи з твердого матеріалу) та процес хімічної взаємодії газу з твердим тілом, який залежно від параметрів проведення процесу може контролюватись як хімічною кінетикою, так і дифузією.

### **6.1. Математичне моделювання гідродинаміки, тепломасообміну під час фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів**

Фільтраційне сушіння є високоефективним методом і володіє низкою істотних переваг порівняно з традиційними методами. Одночасно наявність стаціонарного шару створює значні труднощі його математичного опису, тому часто використовуються емпіричні залежності і завжди правильною є фізична інтерпретація одержаних результатів. Дослідження гідродинаміки стаціонарного сухого шару дисперсного матеріалу, яке є змішаною задачею і чітко математичної інтерпретації її не існує, проводилось на основі як внутрішньої, так і зовнішньої задач гідродинаміки. Для узагальнення експериментальних даних використовувався метод теорії узагальнених змінних, у якому фізичні та геометричні величини представлялись комплексами та симплексами подібності. Так, втрати напору  $\Delta P$  подаються критерієм Ейлера  $Eu$ , а гідродинаміка оцінюється числом Рейнольдса  $Re$ , у якому за лінійним розміром є еквівалентний діаметр каналів. Число  $Re$  відповідає внутрішній задачі. Зовнішня задача оцінювалась через відношення діаметра зерна твердого матеріалу  $d_c$  до діаметра

апарата  $D_a$ . Розрахункові залежності для багатьох матеріалів різного дисперсного складу з точністю до постійного коефіцієнта узагальнено залежністю

$$Eu = A \frac{H}{d_e} \text{Re}^{-0,45} \left( \frac{d_q}{D_a} \right)^{0,67}, \quad (6.1)$$

де  $H$  – висота шару.

Встановлено механізм фільтраційного сушіння, який складається з п'яти етапів, що відрізняються між собою видом вологи, яка видаляється. До них належать: а) механічне витіснення вологи; б) формування фронту масоперенесення на основі кінетики сушіння у першому періоді; в) паралельне перенесення фронту сушіння та одночасне існування першого і другого періодів; г) одночасне існування шару сухого матеріалу, першого і другого періодів та шару вологого матеріалу; д) досягнення фронтом концентрацій нижньої частини шару; е) існування лише другого періоду.

Визначено мінімальну висоту шару  $h_{\min}$ , на якій відбувається формування фронту зміни вологовмісту матеріалу від початкового значення до критичного

$$h_{\min} = \frac{2v_0 \rho c}{\alpha \sigma}, \quad (6.2)$$

де  $v_0$  – фіктивна швидкість газу;  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі;  $\sigma$  – питома поверхня частинок.

Відповідно час формування фронту зміни концентрацій  $\tau_f$  дорівнюватиме

$$\tau_f = \frac{w_n (1 - \varepsilon) \rho_s}{\beta \sigma (x_{nas} - x_n) \rho}. \quad (6.3)$$

У залежності (6.3):  $w_n$  – початковий вологовміст матеріалу;  $\rho_s$  – його густина;  $x_{nas}$ ;  $x_n$  – вологовміст повітря у стані насичення та початковий;  $\beta$  – коефіцієнт масовіддачі.

Процеси сушіння належать до тепло- і масообмінних, тому для них є важливі коефіцієнти тепловіддачі та масовіддачі, що визначають перший період сушіння. Обидва процеси у найбільшій мірі визначаються гідродинамікою, яка для них буде однаковою. Ми встановили аналогію між теплообміном та масообміном, яка полягає в однакових коефіцієнтах та показниках степенів у безрозмірних комплексах. Ця аналогія дає змогу виразити один кінетичний коефіцієнт через інший

$$\beta = \frac{\alpha}{c\rho} Le^{2/3}, \quad (6.4)$$

де  $Le$  – число Льюїса.

Крім зовнішньодифузійних коефіцієнтів визнався коефіцієнт внутрішньої дифузії  $D_w$ . Виявилось, що зовнішня гідродинаміка опосередковано впливає на його величину через її вплив на коефіцієнт тепловіддачі. Зміна цього коефіцієнта збільшує або зменшує нагрівання частинки, що, своєю чергою, спричиняє зміни тиску насиченої пари всередині і відповідно приводить до зміни  $D_w$ .

Визначено розподіл вологовмісту у шарі зернистого матеріалу у період формування фронту ( $\tau < \tau_f$ ) та швидкість його переміщення  $dl/d\tau$ .

Під час другого періоду сушіння відбувається нагрівання твердих частинок на відміну від першого періоду, де температура є постійною та такою, що дорівнює температурі мокрого термометра. Метод розрахунку температур оснований на перетворенні зображень, одержаних внаслідок розв'язку рівнянь операційним методом. Залежність безрозмірної температури  $\theta$  як функції безрозмірного часу (число Фур'є  $Fo$ ) подається рекурентною формулою

$$\theta = 1 - e^{-Fo} \left[ 1 + \frac{Fo^{2-1}}{(2-1)!} + \dots + \frac{Fo^{n-1}}{(n-1)!} \right]. \quad (6.5)$$

Складною є динаміка сушіння стаціонарного шару зернистого матеріалу у другому періоді сушіння. Динаміка передбачає



визначення полів вологовмісту теплового агента  $x$  та висушеного матеріалу  $w$ . Математично задача сформульована у вигляді диференціальних рівнянь кінетики та матеріального балансу з відповідними крайовими умовами. Так, розподілення вологовмісту матеріалу по безрозмірній висоті  $\omega$  щодо безрозмірного часу  $Fo$  подають функціональною залежністю

$$\Phi[\varphi_0(\omega, Fo)] - \Phi[\varphi_0(0, Fo)] = \omega. \quad (6.6)$$

1. *Атаманюк В.М., Гумницький Я.М.* Математична модель динаміки фільтраційного сушіння гранульованого технічного вуглецю // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій. – 2008. – Вип. 32. – С. 54–60.

2. *Gumnitsky Ya.M., Atamanjuk V., Petrus R.* The dynamics of filtration beying of dispersed materials // 18 International Congress of Chemical and Process Engineering (CHISA-2008) Summaries 2. – Praha, 2008. – P. 531

3. *Атаманюк В.М., Гумницький Я.М.* Тепломасообмін підчас сушіння кам'яного вугілля // Збірник праць 5 Міжнародної науково-практичної конференції “Проблеми економії енергії.” – Львів, 2008. – С. 266–268.

4. *Atamanjuk V., Gumnitskyj Ja.* Mass exchange dynamics during second filtration period // Chemistry&Chemical Technology. – 2009. – Vol. 3. – № 2. – P. 129–137.

5. *Атаманюк В.М., Гумницький Я.М.* Внутрішньодифузійне масоперенесення підчас сушіння кам'яного вугілля // Промышленная теплотехника. – К., 2009. – Т. 31. – № 2. – С. 28–32.

6. *Атаманюк В.М., Гумницький Я.М.* Гідродинаміка стаціонарного шару технічного вуглецю // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – Харків 5/5 (41). – 2009. – С. 29–34.

7. *Атаманюк В.М., Гумницький Я.М.* Динаміка фільтраційного сушіння дисперсного кам'яного вугілля // Енергетика та електрифікація. – К.: –2009. – № 1. – С. 28–32.

8. *Атаманюк В.М., Гумницький Я.М.* Математична модель теплообміну підчас другого періоду фільтраційного сушіння

дисперсних матеріалів // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – Харків 1/4 (37)-2009. – С. 20–24.

9. *Gumnitsky Ya., Atamanuk V., Petrus R., the hydrodynamics of fixed bed of dispersional material // Materials of the 19<sup>th</sup> International congress of chemical and process engineering CHISA. Summaries 3: hydrodynamic proceses and process engineering. – Praha. – 2010. – P. 1049.*

## **6.2. Механізм та кінетика хімічної взаємодії у системі тверде тіло–газ**

Процес хімічної взаємодії у системі тверде тіло – газ досліджувався на прикладі високотемпературного окиснення твердих сплавів з метою одержання заданих поверхонь. Висока твердість сплавів під час механічних методів оброблення вимагає використання алмазного інструменту. Водночас механічні методи не покращують їхні експлуатаційні характеристики, особливо поверхонь, які контактують з іншими поверхнями (напр., зубки бурових доліт, що закріплюються у гніздах шарошки, повинні володіти не лише високою міцністю, але і забезпечувати рівномірний поверхневий натяг по всій поверхні контакту).

Досліджувався механізм та кінетика високотемпературного окиснення вольфрамових тврдосплавних виробів, що складаються з двох фаз – карбіду вольфраму WC та цементувальної Co-фази, тому їх окиснення протікає окремо згідно з основними реакціями:



Дифузія окисника відбувається через поверхневий шар оксидів. Залежно від температури експериментально встановлено, що в інтервалі температур 973...1123 К процес окиснення протікає у кінетичній області, в інтервалі 1123...1323 К – у змішаній дифузійно-кінетичній, а за температур вищих 1323 К – у дифузійній. Розроблено математичні моделі окиснення з метою визначення глибини окиснення  $\Delta$  залежно від часу окиснення  $\tau$  та відстані від поверхні  $x$

$$\Delta = \frac{nk}{2\rho_s} c_0 \left( \tau - \frac{1}{\operatorname{erf} \frac{\beta}{2\sqrt{D}}} \frac{2x\sqrt{\tau}}{\sqrt{\pi D}} \right), \quad (6.9)$$

де  $\rho_s$  – густина твердого сплаву;  $k$  – константа швидкості окиснення;  $c_0$  – концентрація кисню;  $D$  – коефіцієнт дифузії;  $\beta, n$  – коефіцієнти.

Розроблено математичну модель теплоперенесення під час окиснення твердих сплавів. У результаті екзотермічної хімічної реакції на поверхні взаємодії виділяється тепло, яке теплопровідністю нагріває сплав, а друга частина конвекцією та випромінюванням відводиться до навколишнього середовища. Одержані рішення дають можливість точного визначення констант швидкості хімічної реакції та коефіцієнта дифузії. Розподіл концентрацій реагенту визначається не лише дифузиею, але і термодифузиею.

Сумарний потік  $j$  визначається згідно з принципом Онзагера

$$j = -D \frac{dc}{dn} - D_T \frac{dT}{dn}, \quad (6.10)$$

де  $D_T$  – коефіцієнт термодифузії.

Розроблено технологічний процес групової розмірної обробки фасонних поверхонь в умовах їх масового виробництва.

1. Гумницький Я.М., Пелех М.П., Гивлюд Н.Н. Особенности высокотемпературного окисления сплава ВК8ВК // Физико-химическая механика материалов. – 1988. – № 5. – С. 23–28.

2. Пелех М.П., Гумницький Я.М. Термоокисление твердых сплавов в условиях регулируемой доставки окислителя к поверхности взаимодействия // Инж.-физический журнал. – 1988. – Т. 54. – № 1. – С. 152–153.

3. Гумницький Я.М., Пелех М.П., Гивлюд Н.Н. Модифицирование поверхности твердосплавных изделий высокотемпературным окислением // Химия поверхности-дисперсных твердых тел. Тезисы докладов. – Львов, 1989. – С. 24–25.

4. Гумницький Я.М., Пелех М.П. Расчет высокотемпературной размерной обработки твердых сплавов в условиях регулируемой доставки окислителя // Респ. сборник: Автоматизация производственных процессов. – 1989. – Вып. 28. – С. 43–46.

5. Гумницький Я.М., Пелех М.П. Процес термічного окислення твердосплавних зубків, який відбувається у змішаній області // Респ.збірник: Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. – Львів, 1992. – № 30. – С. 48–50.

6. Gumnitsky Ya., Matsushita J., Pelekh T. High temperature oxidation of hard alloys // 15 th Intevnational Congress of Chemical and Process Engineering – CHINA–2002. – 2002. – Summaries 5. – P. 336.

7. Гумницький Я.М., Пелех Т.М., Горбаль О.М. Вплив високотемпературного окислення на поверхню твердосплавних виробів // Вісник “Хімія, технологія речовин та їх використання”.- Львів, 1997. – № 333. – С. 207–210.

8. Гумницький Я.М., Пелех Т.М., Пелех М.П. Високотемпературне окислення твердосплавних виробів при регульованій подачі окиснювача до поверхні взаємодії // Вісник “Автоматизація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні”. – Львів, 1995. – Вип. 32. – С. 69–70.

9. Gumnitsky Ya., Pelekh T. Mass Transfer in Thermaloxidation of hard alloys // XY ogolnopolska konferencja naukowa inzenierii chemiczniej i procesowej. Materialy konferencyjne. – 1995. – P. 112–117.

10. Гумницький Я.М., Пелех Т.М., Пелех М.П. Підвищення міцності при згині сплаву ВК8ВК високотемпературним окисненням // Вісник “Автоматизація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні”. – Львів, 1995. – № 303. – С. 97–100.

11. Gumnitsky Ya., Pelekh T., Talian N. Heat-and Mass Transfer during High Temperature Oxidation of Hard Alloys // 5<sup>th</sup> European Conference on Advanced Materials, Processes and Applications, V. ”Metals and Composites”. – Maastricht, Neterlands. – 1997. – P. 178–182.

12. Gumnitsky Ya., Pelekh T., Talian N. The Influence of Thermal Diffusion on Strength Characteristics of Hard Alloys during High Temperature Oxidation // 13 th Intevnational Congress of Chemical and Process Engineering – CHISA–98. – 1998. – Summaries 2. – P. 151.

## 7. Теплові процеси в системі тверде тіло–рідина, тверде тіло–газ

Хімічна взаємодія супроводжується виділенням або поглинанням теплоти. У розглянутих процесах взаємодії між твердим тілом та рідким реагентом джерело тепла знаходиться на поверхні взаємодії, а його потужність залежить від теплового ефекту реакції, концентрації реагенту, коефіцієнта масовіддачі. Виділене тепло відводиться теплопровідністю у тверде тіло та конвективним теплообміном до рідкого реагенту. Так у зоні реакції підтримується найвища температура, внаслідок чого змінюються фізичні властивості розчину, що впливає на коефіцієнт масовіддачі.

Тверде тіло з початковою температурою  $T_0$  поміщається у рідке середовище з початковою температурою, що дорівнює температурі твердого тіла  $T_1(x, y, z, 0) = T_0$ . Теплообмін між поверхнею твердого тіла та рідиною здійснюється за законом Ньютона. Розв'язання описаних задач проводилось операційним методом, оснований на перетворенні Лапласа.

Вихідним для всіх задач є диференціальне рівняння теплопровідності.

**Теплообмін під час взаємодії твердого тіла з великим об'ємом реагенту.** Умова великого об'єму реагенту означає постійність його концентрації та температури протягом всього часу взаємодії:  $c_R = c_0 = \text{const}$ ;  $T_1 = T_0 = \text{const}$ . Складну залежність коефіцієнта масовіддачі  $k_R$  від температури поверхні взаємодії  $T_n$  апроксимовано лінійною функцією

$$k_R = k_0(1 + \nu T_n), \quad (7.1)$$

де  $k_0$  – коефіцієнт масовіддачі за температури  $T_0$ ;  $\nu$  – коефіцієнт.

Кількість теплоти  $Q$ , що виділяється під час хімічної взаємодії одиницею поверхні за одиницю часу, дорівнює

$$Q = k_0(1 + \nu T_n) c_0 Q_R, \quad (7.2)$$

де  $Q_R$  – тепловий ефект реакції.

Виділене тепло розподіляється на два потоки: частина тепла йде на нагрівання твердого тіла теплопровідністю, а друга конвективно нагріває рідину. Розв'язання цієї задачі дає можливість визначити температуру  $T$  у твердому тілі (всі рішення даються без доведення):

$$\frac{T - T_0}{T^*(1 + \nu T_0)} = \frac{1}{Bi - T^* \nu} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2(1 - Bi + T^* \nu)}{[\mu_n^2 + (1 - Bi + T^* \nu)(T^* \nu - Bi)] \cos \mu_n} \frac{\sin \mu_n \varphi}{\mu_n \varphi} e^{-\mu_n Fo}, \quad (7.3)$$

де  $Bi$  – число Біо;  $Fo$  – число Фур'є;  $\mu_n$  – корені характеристичного рівняння;  $T^*$  – параметр, що має розмірність температури;  $\varphi$  – безрозмірний радіус.

Очевидно, що найважливішою температурою є температура на поверхні твердого тіла, яка визначатиме швидкість хімічної реакції. Ця температура визначається з рівняння (7.3) за умови  $\varphi = 1$ .

**Тепломасообмін під час хімічної взаємодії твердого тіла з реагентом, що має постійну концентрацію.** Сферичне тіло з початковою температурою  $T_0$  поміщається у розчин реагенту з тією ж початковою температурою ( $T_I = T_0$ ). Внаслідок хімічної взаємодії на поверхні твердого тіла підвищується температура кулі  $T$  і температура розчину  $T_I$ . Необхідно знайти температуру всередині кулі у будь-який момент часу, температуру рідини, як функцію часу, і температуру на поверхні взаємодії. Коефіцієнт масовіддачі та інші фізичні константи вважають постійними. Диференціальне рівняння теплопровідності з крайовими умовами доповнюється рівнянням теплового балансу

$$k_R c_R Q_R 4\pi R^2 \tau = M_L c_L (T_I - T_0) + M_T c_T (\bar{T} - T_0), \quad (7.4)$$

де  $c_L, c_T$  – теплоємності реагенту і твердого тіла;  $M_L, M_T$  – маси реагенту і твердого тіла;  $\bar{T}$  – середня температура твердого тіла.

Остаточний результат для визначення температури у твердому тілі має вигляд:

$$\frac{T - T_0}{T^*} = \frac{1}{\beta + 1} \left\{ 3Fo - \frac{\varphi^2}{2} - \frac{1}{\beta + 1} \left[ \frac{\beta}{2} \left( 1 - \frac{2\beta}{Bi} \right) + \frac{3}{10} \right] \right\} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{\mu_n^2 \cos \mu_n} \frac{\sin \mu_n \varphi}{\mu_n \varphi} e^{-\mu_n^2 Fo}, \quad (7.5)$$

де  $A_n$  – коефіцієнт.

Температура на поверхні тіла визначається залежністю (7.5) за умови  $\varphi = 1$ , а температура рідини  $T_l$  у разі її перемішування дорівнюватиме

$$\frac{T_1 - T_0}{T^*} = \frac{1}{\beta + 1} \left\{ 3Fo - \frac{1}{2} - \frac{1}{\beta + 1} \left[ \frac{\beta}{2} \left( 1 - \frac{2}{Bi} \right) + \frac{3}{10} \right] \right\} - \sum_{n=1}^{\infty} A_n e^{-\mu_n^2 Fo}. \quad (7.6)$$

**Тепломасообмін під час “хімічного кипіння” за умови зміни концентрації реагенту та кінетичного коефіцієнта.** Сумісне розв’язання рівнянь матеріального балансу та кінетичного для цих умов дає експоненціальний розподіл концентрацій реагенту. Якщо коефіцієнт масовіддачі  $k_R$  можна апроксимувати прямолінійною залежністю від концентрації реагенту  $c_R$ , то його значення буде визначатись

$$k_R = \omega c_0 e^{-bt}, \quad (7.7)$$

де  $\omega$ ,  $b$  – коефіцієнти.

Одержано аналітичні рішення для визначення змінної температури твердого тіла, температури на поверхні твердої частинки, середньої температури твердого тіла і температури рідкого реагенту (враховуючи їх громіздкість, ці рішення не подаються).

Експериментально встановлено взаємозв’язок між двома кінетичними коефіцієнтами: тепловіддачі  $\alpha$  та масовіддачі  $k_R$  для процесів хімічного кипіння

$$\alpha = 750 + 1,7 \cdot 10^7 k_R. \quad (7.8)$$

**Теплообмін зі стаціонарним шаром зернистого матеріалу.** Особливим випадком є нестаціонарні процеси теплообміну під час взаємодії теплового агента з стаціонарним шаром зернистого матеріалу. Прикладом може слугувати сушіння дисперсного матеріалу в нерухомому шарі за умови фільтрації крізь нього теплового агента. Тут може бути виділено два випадки. У першому випадку під час сушіння в першому періоді температура на поверхні твердих частинок є однаковою та рівною температурі мокрого термометра. Сумісне розв’язання рівнянь кінетики

теплообміну та масообміну і балансових рівнянь дало змогу встановити зміну температури  $t$  по висоті шару  $z$

$$\frac{t_n - t}{t_n - t_{mm}} = \frac{1 - \exp\left(-\frac{\beta\sigma}{\nu} z\right)}{1 - \exp\left(-\frac{\beta\sigma}{\nu} h_{\min}\right)}, \quad (7.9)$$

де  $t_{mm}$  – температура мокрого термометра;  $t_n$  – початкова температура. Позначення інших величин подано у розділі 6.

У разі сушіння, яке визначається внутрішнім вологоперенесенням, тепловий агент віддає своє тепло зернистому матеріалу. Необхідно знати зміну температури матеріалу в часі, так як це змінює фізичні параметри системи. Складено математичну модель процесу теплообміну та її зображення у перетвореннях Лапласа. Враховуючи те, що зображення не має оригіналу, наводяться рішення для певних крайніх прикладів. Ці випадки стосуються безрозмірного часу, представленого числом Фур'є  $Fo \ll 1$  та  $Fo \gg 1$ , та довжини шару в безрозмірній формі  $\omega \ll 1$  та  $\omega \gg 1$ .

1. Аксельруд Г.А., Дубынин А.И., Гумницкий Я.М. Тепло- и массообмен в химически реагирующих системах, сопровождающийся газовойделением // В кн.: Тепломассообмен. Материалы 5 Всесоюзной конференции по тепломассообмену. – Минск. – 1976. – Т. 2. – С. 194–199.

2. Аксельруд Г.А., Гумницкий Я.М., Дубынин А.И. Тепломассообмен между шарообразным твердым телом и бесконечным объемом жидкости // Вестник ЛПИ: Химия и хим. технология. – Львов. – 1977. – № 111. – С. 105–106.

3. Гумницкий Я.М., Аксельруд Г.А. Теплообмен при химическом взаимодействии твердого тела с жидкостью // В кн. Повышение эффективности, совершенствование процессов и аппаратов хим. производств. Тез. докл. V респ. конф. – Днепропетровск. – 1980. – С. 6–8.



4. Маллик С., Гумницький Я.М. Теплоотдача при химическом кипении в условиях свободной конвекции // Инж.-физический журнал. – 1986. – Т. 59. – № 4. – С. 645–650.

5. Гумницький Я.М., Маллик С. Нестационарные аспекты процесса теплообмена при химическом кипении // Деп. В УкрНИИТИ. – 1987. – № 1579-Ук87. – 10 с.

6. Нагурський О.А., Гумницький Я.М. Математична модель теплообміну процесу капсулювання дисперсного матеріалу в стані псевдо зрідження // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2010. – № 6. – С. 74–77.

7. Атаманюк В.М., Гумницький Я.М. Математична модель динаміки фільтраційного сушіння гранульованого технічного вуглецю // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій. – 2008. – Вип. 32. – С. 54–60.

8. Атаманюк В.М., Гумницький Я.М. Математична модель теплообміну під час другого періоду фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – Харків, 2009. – № 1/4 (37). – С. 20–24.

## 8. Екологія та охорона навколишнього середовища

*Міграція забруднень у ґрунті.* Однією з важливих екологічних проблем є дослідження процесів міграції забруднень у природному середовищі. Експериментально та теоретично вивчався процес забруднення ґрунтового середовища мінеральними добривами. Відомо, що лише частина мінеральних добрив засвоюється рослинами, а решта 30–60 % вимивається атмосферними опадами у наземні та підземні водойми, виділяється до повітря у газоподібному вигляді, дифундує за рахунок молекулярної дифузії вглиб ґрунту. Особливо небезпечним є забруднення ґрунту азотними добривами. Під час розроблення математичних моделей основну увагу зосередили на таких можливих випадках процесу міграції:

1) випадки постійної та змінної концентрації мінерального добрива у поверхневому шарі ґрунту за відсутності атмосферних опадів та вегетації рослин;

2) теоретичний аналіз міграції за наявності вегетації рослин, коли відбувається засвоєння добрив кореневою системою.

Перераховані випадки у комплексі складають неперервний потік компонентів вглиб ґрунту, що сприяє забрудненню довкілля протягом всього року. Складено математичні моделі для різних ситуацій, що дають змогу розрахувати профілі концентрацій мінеральних добрив, користуючись експериментально визначеним коефіцієнтом дифузії. Напр., міграція добрива у період вегетації описується такою залежністю, поданою у безрозмірній формі:

$$\frac{c(z, Fo)}{c_0} = \left( 1 - \operatorname{erf} \frac{1}{2\sqrt{Fo}} \right) - E \cdot Fo \left( 1 + 4 \left( 1 - \operatorname{erf} \frac{1}{2\sqrt{Fo}} \right) \right), \quad (8.1)$$

де  $c(z, Fo)$ ,  $c_0$  – концентрація добрива на глибині  $z$  та початкова на поверхні ґрунту;  $Fo$  – число Фур'є;  $E$  – безрозмірний комплекс, який є мірою відношення кількості компонента, що засвоюється кореневою системою рослин, до молекулярного дифузійного потоку. Хімічна та процесна інженерія оперує значною кількістю безрозмірних комплексів – критеріїв подібності та симплексів.

Вперше у світовій практиці введено комплекс, що пов'язує молекулярну дифузію з біологічним процесом.

Не лише молекулярно-дифузійний процес є причиною забруднення ґрунту. Внесені мінеральні добрива підлягають інтенсивному розчиненню під час атмосферних опадів. Ми проводили експериментальні дослідження з імітацією випадання атмосферних опадів через поливи відповідно до норм випадання опадів у Львівській області. У цьому разі основним фактором є швидкість фільтрування води через шар ґрунту. Фільтрувальні води значно прискорюють вимивання добрив та їхнього перенесення у нижче розміщені шари ґрунту. Методом запобігання забруднення ґрунтового середовища може бути використання капсульованих добрив за рахунок зменшення швидкості їхнього розчинення. Запатентовано метод регулювання швидкості вивільнення добрив з полімерної оболонки через внесення до полімерної композиції легкорозчинних кристалічних речовин. Визначено товщину полімерної оболонки, яка уможливить забезпечення необхідної швидкості вивільнення.

1. Гумницький Я.М., Люта О.В., Сабадаш В.В. Регулювання масопровідності полімерної оболонки капсульованих добрив // Наукові праці. – Одеса. – 2006. – № 28. – Т. 2. – С. 210.

2. Гумницький Я.М., Мельничук В.В., Нагурський О.А. Вплив фізико-хімічних показників середовища на швидкість розчинення мінеральних добрив // Экотехнологии и ресурсосбережение. – № 6. – 2004. – С. 54–58.

3. Гумницький Я.М., Сабадаш В.В., Люта О.Н., Гебій О.В. Дослідження міграції мінеральних добрив у ґрунтовому середовищі // Вісник НУ Львівська політехніка “Хімія, технологія речовин та їх застосування”. – 2007. – № 590. – С. 246–250

4. Гумницький Я.М., Люта О.В., Сабадаш В.В. Регулювання інтенсивності вивільнення компонентів із капсульованих мінеральних добрив у навколишнє середовище // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2007. – № 6. – С. 65–68.

5. Гумницький Я.М., Люта О.В., Сабадаш В.В. Міграція забруднень у ґрунтовому середовищі // Серія “Стан навколишнього

середовища”. Забруднення, екологічні аспекти. – 2007. – № 12. – С. 35–36.

6. Гумницький Я.М., Люта О.В. Математичні моделі міграції компонентів добрив у ґрунтовому середовищі / Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій – 2008. – Вип. 32. – С. 6–9.

7. Гумницький Я.М., Сабадаш В.В., Тижбір Г.А. Міграція важких металів у ґрунтовому середовищі // Вісник НУ Львівська політехніка Хімія, технологія речовин та їх застосування. – 2008. – № 609. – С. 210–212

8. Люта О.В., Гумницький Я.М. Вплив метеорологічних умов на міграцію компонентів мінеральних добрив у ґрунтовому середовищі // Вісник НУ Львівська політехніка “Хімія, технологія речовин та їх застосування”. – 2008. – № 609. – С. 250–253.

9. Гумницький Я.М., Люта О.В., Сабадаш В.В. Вимивання компонентів мінеральних добрив із приґрунтового природного середовища // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2009. – № 3. – С. 61–63.

10. Гумницький Я.М., Сабадаш В.В., Венгер Л.О. Дослідження міграції мінеральних речовин у ґрунтовому середовищі за постійної концентрації // Вісник НУ “Львівська політехніка” Хімія, технологія речовин та їх застосування. – 2009. – № 644. – С. 192–195.

11. Люта О.В., Гумницький Я.М. Міграція мінеральних добрив вглиб ґрунту під час випадання атмосферних опадів // Вісник Національного університету “Львівська політехніка” Хімія, технологія речовин та їх застосування. – 2010. – № 667. – С. 241–245.

12. Сабадаш В.В., Гумницький Я.М., Венгер Л.О. Експериментальне визначення кінетичних коефіцієнтів міграції мінеральних речовин за профілем ґрунту // Вісник Національного університету “Львівська політехніка” Хімія, технологія речовин та їх застосування. – 2010. – № 667. – С. 299–303.

13. Гумницький Я.М., Люта О.В. Математичні моделі дифузійно-контрольованої міграції забрудників у ґрунтовому середовищі // Тези доповідей II Міжнародної науково-практичної

конференції “Комп’ютерне моделювання в хімії та технологіях і сталий розвиток”. – Київ. – 2010. – С. 119–120.

14. *Gumnitsky Y., Lyuta O., Sabadash V.* Regulated mass transfer through polymeric capsules // *Materiały konferencyjne XIX Ogólnopolska konferencja Inżynierii Chemicznej i Procesowej*, 2007. – P. 179–183;

15. *Гумницький Я.М., Мельничук В.В., Нагурський О.А.* Полімерна дисперсія для капсулювання добрив // Патент України № 68811 А, Україна МПК 7C05G3/00 Опубл. 2004. – бюл. № 8

16. Патент України на корисну модель № 32170 “Полімерна дисперсія для капсулювання добрив.”, *Сабадаш В.В., Гумницький Я.М., Люта О.В.* Бюл.№ 9 від 12.05.2008 р.

17. Патент України на корисну модель № 39866 “Полімерна дисперсія для капсулювання добрив.”, *Мальований М.С., Гумницький Я.М., Нагурський О.А., Сабадаш В.В., Гавриляк М. Я.* Полімерна дисперсія для капсулювання добрив.

**Очищення газів від  $SO_2$ .** Діоксид сірки належить до найтоксичніших речовин, які у великій кількості потрапляють до атмосфери. Найбільше  $SO_2$  виділяється під час спалювання кам’яного вугілля, тому що у складі вугілля знаходяться сполуки сірки.  $SO_2$  є причиною виникнення кислих дощів, парникового ефекту, смогу. Зниження емісії  $SO_2$  є надзвичайно важливим завданням. Нами проведені дослідження щодо хемосорбційного поглинання  $SO_2$  в апаратах з активною гідродинамікою у трифазній системі. Частково цей процес із суто процесного погляду висвітлено у розділі “Сорбційні процеси”.

1. *Gumnitsky J., Derejko K., Maliovanij M.*,  $SO_2$  chemisorption in three-phase system // *Environmental protection into the Future*. – 2007. – Czestochowwa: Wyd. Politechnika Czestochowska. – P. 173–177.

2. *Гумницький Я.М., Дерейко Х. О., Новак В.* Хемосорбція діоксиду сірки в апаратах з активною гідродинамікою // *Сборник научных трудов международной научно-техн. конф. “Современные проблемы химической технологии неорганических веществ”*. – Одеса. – 2001. – Т. 1. – С. 62–64.

**Зменшення емісії  $NO_x$ .** Основну увагу зосереджували на утворенню оксидів азоту під час високотемпературного спалю-

вання палива. Найбільша кількість оксидів припадає на так звані термічні  $NO_x$ . Моделювання процесу окиснення азоту в об'ємі котла за певних параметрів є можливим передбачити концентрацію оксидів азоту і відповідно створювати умови для зменшення їхніх викидів. Математична модель передбачає нестационарні умови щодо концентрації кисню, яка зменшується за рахунок спалювання палива. Одержано графічні залежності концентрації  $NO_x$  від висоти парового котла. Досліджено вплив режимних параметрів процесу спалювання вугілля за триступеневою схемою на вихід оксидів азоту у реальному котлі.

1. *Kwiatkowska B., Gumnitsky J.A.* Process Analysis of NO Formation in Power Boilers with Dust Combustion // Вісник ДУ “ЛП” Проблеми економії енергії. – Львів. – 1998. – С. 247–251.

2. *Івасик Я.Ф., Гумницький Я.М., Мисак Й.С.* Вплив вихідних режимних параметрів парового котла на вихід оксидів азоту при спалюванні органічного палива за триступеневою схемою // Вісник ДУ “ЛП” Проблеми економії енергії. – Львів, 1999. – № 2. – С. 298–302.

3. *Мисак Й.С., Івасик Я.Ф., Гумницький Я.М.* Вплив режимних параметрів парового котла на вихід оксидів азоту при спалюванні вугілля за триступеневою схемою // Енергетика і електрифікація. – 2000. – № 2. – С. 13–16.

4. *Мисак Й.С., Івасик Я.Ф., Гумницький Я.М.* Викиди азоту з димовими газами в процесі спалювання палива в котлі ТП-92 за триступеневою схемою // Енергетика і електрифікація. – 2001. – № 3. – С. 12–15.

**Очищення газів від  $CO_2$ .** Проблема очищення газів теплових електростанцій від  $CO_2$  набула актуального значення в останньому десятиріччі. Діоксид вуглецю належить до газів, що спричиняють парниковий ефект, який впливає на підвищення температури нашої планети. Явище парникового ефекту належить до глобальних забруднень атмосфери. Тепер емісія цього газу до атмосфери становить 7 млрд. тон щорічно й існує тенденція до її зростання. Прогнозується у 2050 році викидати до атмосфери 14 млрд. тон. Це викликає занепокоєння не лише екологічної спільноти, але і політиків та урядів багатьох розвинутих країн світу. Зусилля

науковців спрямовані на зменшення викидів CO<sub>2</sub> до атмосфери. Одним із методів зменшення є поглинання CO<sub>2</sub> твердими сорбентами. Ця робота виконувалась спільно з науковцями Ченстоховської політехніки.

1. *Nowak W., Gumnitsky J., Majchrzak I.* Removal of Carbon Dioxide from Flue Gas using Natural Clinoptilolite // Тези доповідей X міжнарод. конференції “Вдосконалення процесів та апаратів хімічних та харчових виробництв” (ICSE – 99). – Львів, 1999. – С. 77–78.

2. *Nowak W., Gumnitsky J., Majchrzak I.* Zeolites from Fly Ash as Carbon Dioxide Adsorbents from Flue Gas // 14<sup>th</sup> International Congress of Chemical and Process Engineering . CHISA 2000. – Praha, 2000. – P. 229.

3. *Майхжак-Куцемба І., Новак В., Гумницький Я.* Адсорбційний метод обмеження емісії CO<sub>2</sub> до атмосфери при спалюванні вугілля // Зб. матеріалів міжнарод. наук.-практ. конф. “Проблеми економії енергії”. – Львів, 2001. – С. 241–242.

4. *Новак В., Майхжак-Куцемба І., Гумницький Я.* Адсорбція CO<sub>2</sub> на цеолітах, синтезованих із легкої золи спалювання вугілля // XV укр. конференція з неорг. хімії за міжнародною участю. Тези доповідей. – К., 2001. – С. 305.

5. *Гумницький Я.М., Новак В., Майхжак-Куцемба І., Мальований М.С.* Снижение эмиссии CO<sub>2</sub> в газах энергетических установок адсорбцией на цеолитах // II Укр.Міжнар. конф. “Енергія з біомаси”. – К., 2004. – С. 258–259.

6. *Новак В., Майхжак-Куцемба І., Гумницький Я.М.* Адсорбція діоксиду вуглецю природним цеолітом // Вісн. Нац. ун-ту “Львів. політехніка” Хімія, технологія речовин та їх застосування. – 2004. – № 497. – С. 113–115.

7. *Гумницький Я.М., Бать Р.* Енерготехнологічні процеси використання біомаси з метою зменшення емісії парникових газів // Зб. наук. праць XI наук. конф. “Львівські хімічні читання 2005”, Львів, 2005 – С. 16.

ДОВІДКОВЕ ВИДАННЯ

**Ярослав Михайлович  
ГУМНИЦЬКИЙ**

*Бібліографічний покажчик*

Редактор *Олеся Пастушак*  
Технічний редактор *Лілія Саламін*  
Комп'ютерне верстання *Людмили Білашевич*  
Художник-дизайнер *Уляна Келеман*  
Опрацювання ілюстрацій *Зоряни Маланюк*

Здано у видавництво 12.07.2011. Підписано до друку 20.08.2011.  
Формат 60×84(1/16). Папір офсетний. Друк на різнографі.  
Умовн. друк. арк. 7,2. Обл.-вид. арк. 6,2.  
Наклад 100 прим. Зам. 110714.

Видавець і виготівник: Видавництво Львівської політехніки  
*Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 751 від 27.12.2001 р.*  
вул. Ф. Колесси, 2, Львів, 79000  
тел. +380 32 2582146, факс +380 32 2582136  
vlp.com.ua, ел. пошта: vmr@vlp.com.ua