

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОСТОРОВО-ЧАСОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВІБРОЕКСТРАГУВАННЯ З МЕТОЮ МАСШТАБУВАННЯ ВІБРОЕКСТРАКЦІЙНОЇ АПАРАТУРИ

Зав'ялов В. Л., канд. техн. наук, професор, Мисюра Т. Г., канд. техн. наук, доцент, Бодров В. С.,
канд. техн. наук, професор, Запорожець Ю. В., канд. техн. наук, доцент,
Попова Н. В., канд. техн. наук, доцент, Лобок О. П., канд. фіз-мат. наук, доцент,
Костюк В. С., канд. техн. наук, доцент
Національний університет харчових технологій, м. Київ

Наведено результати досліджень просторово-часових характеристик процесу твердофазового віброекстрагування. Отримано прогнозуючу модель розвитку пульсуючого турбулентного затопленого струменя для процесів безперервного та періодичного віброекстрагування в системі тверде тіло-рідина, яка надає можливість масштабування при певному кратному збільшенні або зменшенні віброекстракторів.

The research findings of spatial and temporal characteristics of solid phase vibroextraction process are summarized. The predictive model of pulse submerged turbulent jet for the process of continuous and periodic vibroextraction in the solid-liquid system is obtained, which provides scalability under certain multiple extend or retract of vibroextractors.

Ключові слова: віброекстрагування, просторово-часові характеристики, пульсуючий турбулентний затоплений струмінь.

Особливістю сучасних віброекстракційних апаратів є перспектива застосування низькочастотних механічних коливань для інтенсифікації вилучення цільових компонентів із складної за морфологічною структурою твердої фази одночасно на макро- і мікрорівні, включаючи, в окремих випадках, протитечійне розділення фаз вздовж екстрактора з мінімальним поздовжнім перемішуванням [1, 2]. Таке багатопільове застосування коливань можливе лише при глибинному вивченні фізичної природи дії коливань на стадії їх генерації і розповсюдження в робочому об'ємі апарата. Отже, джерелом коливань є спектр турбулентних пульсуючих струменів, що створюються віброуючими перегородками вздовж апарата періодично у взаємно протилежних напрямках. При цьому, характеристики пульсуючого спектру залежать від конструкції віброуючих перегородок і режиму їх коливання. Закономірності розповсюдження пульсуючих струменів у поздовжньому (транспортуючому) і поперечному (мікроперемішуючому) напрямку можуть бути визначені фундаментальними просторово-часовими залежностями, що дозволяють розрахувати інтенсивність дії коливань на різних відстанях від їх джерела. Оперуючи конструкцією віброгенеруючих органів екстрактора, з частотою і амплітудою їх коливань, при відомих закономірностях розповсюдження створених ними пульсуючих потоків, віброекстрактори можуть бути налаштовані на різноманітні твердофазні системи і здатні врахувати складну специфіку впливу твердої фази при різних навантаженнях і режимах екстрагування. Таким чином, раціональне розподілення зовнішньої енергії, необхідної для інтенсифікації технологічних процесів між мікро-і макрорівнями перемішування, вимагає поглиблення фундаментальних уявлень про закономірності руху гідродинамічних потоків, що генеруються джерелом енергії.

Разом з тим, специфічність умов масштабного перенесення вимагає необхідності використання системного підходу та виявлення закономірностей зміни просторово-часових співвідношень у безрозмірних координатах, що надало б можливість розраховувати результуюче перенесення в єдиній системі функціонально зв'язаних координат.

У таких координатах функціональний час представлятиме собою проміжок часу, протягом якого властивість робочої системи (визначальний геометричний параметр, рН, концентрація тощо) зміниться в розмірі основи натуральних логарифмів, а просторова складова — відстань, на якій функціональний час буде змінений у тому ж ступені.

Сутність же загального системного підходу полягатиме в тому, що вся інформація, що отримана в лабораторних та виробничих умовах, узагальнюватиметься у вигляді окремих математичних моделей, кожна з яких буде описувати певне конкретне явище процесу — гідродинаміку, масоперенесення (внутрішнє та зовнішнє), або повної математичної моделі у вигляді системи диференціальних рівнянь. При цьому, безпосереднє перенесення результатів аналізу дослідних даних, отриманих для даної системи екс-

тракційного процесу, з одного апарата на інший може бути здійсненим у спосіб, алгоритм якого показано на рис. 1.

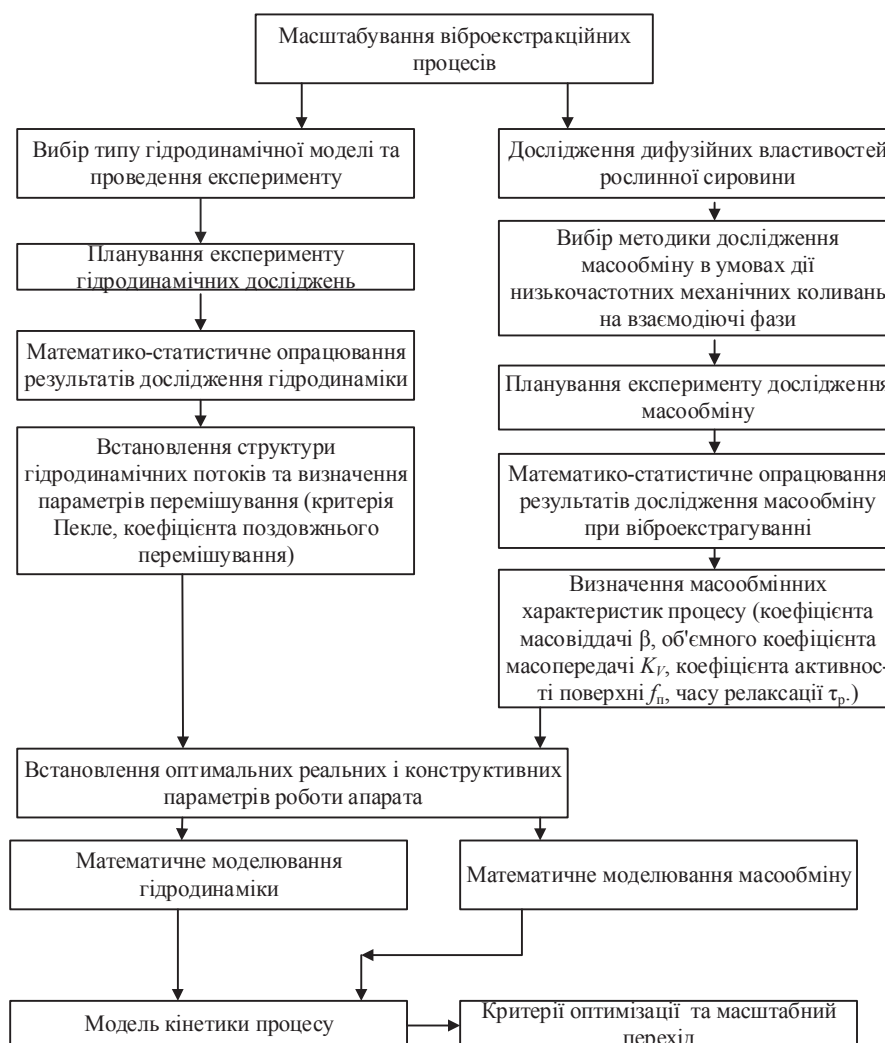


Рис. 1 – Схема алгоритму масштабного переходу при віброекстрагуванні турбулентних пульсуючих струменів, що створюються секціонуючими апарат поперечними віброуючими перегородками або іншими пристроями спеціальної конструкції

В цьому контексті слід зазначити, що активний вплив на режим процесу вилучення цільових компонентів із рослинної сировини, як одного з основних на виробництві, здійснюють техніко-економічні показники самого виробництва, але у першу чергу — кінетичні характеристики гідродинаміки та масоперенесення, як визначальні при реалізації процесів в багатотонажних апаратах. Тому, перенесення названих характеристик, отриманих в дослідках на фізичних моделях, на промислові апарати, пов'язане зі зміною гідродинамічних умов масообміну, суттєво ускладнює відтворюваність процесу екстрагування при його масштабуванні.

Отже, переваги віброекстракторів періодичної та безперервної дії, що здатні ефективно екстрагувати цільові компоненти при значному здрібнюванні рослинної сировини, включаючи переробку її відходів, пов'язані з особливостями гідродинаміки турбулентних пульсуючих струменів, що створюються секціонуючими апарат поперечними віброуючими перегородками, або іншими пристроями спеціальної конструкції.

Разом з тим, цілеспрямоване конструювання та оптимізація режимних параметрів роботи віброекстракторів неможливі без поглиблення фундаментальних уявлень про гідродинаміку турбулентних пульсуючих струменів, що генеруються віброуючими пристроями. Найбільш простим і вивченим випадком струминного руху є витікання рідини з рівномірним початковим полем швидкості ($w_0 = \text{const}$) у середовище, що рухається з постійною швидкістю ($w_L = \text{const}$), або затопленого у нерухомому середовищі

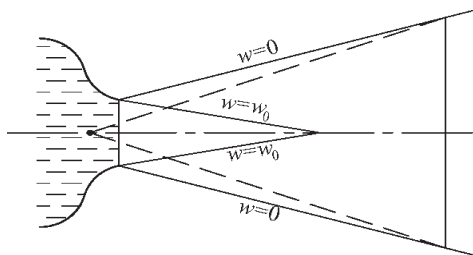


Рис. 2 – Схема затопленого осисиметричного плоского струменя

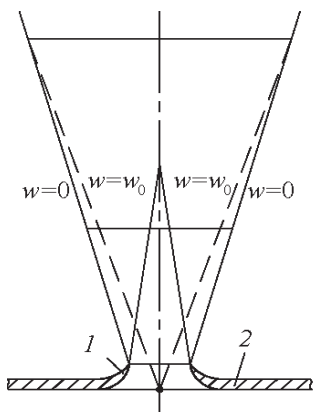


Рис. 3 – Схема затопленого пульсуючого струменя у напівперіоді коливань при віброекстрагуванні (без патрубка): 1 — сопло; 2 — тарілка

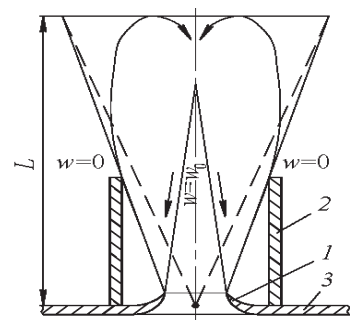


Рис. 4 – Схема затопленого пульсуючого струменя напівперіоду коливань при віброекстрагуванні: 1 — сопло; 2 — патрубок; 3 — вібрвальна тарілка.

[3, 4]. Розвиток струменя супроводжується захопленням оточуючих струмів частинок середовища, поступовим гальмуванням струменя та збільшенням його поперечного перерізу. При рівномірному полі швидкостей у початковому перерізі, границі пограничного шару мають конічні поверхні, що перетинаються у кромки сопла. Зовнішня сторона цієї кромки дотикається до оточуючого середовища. Використовуючи спрощену схему затопленого струменя (рис. 2), приймають довжину перехідної ділянки та швидкість на границі пограничного шару рівними нулю [3].

Причому, поперечна складова швидкості має незначні зміни, а сам швидкісний профіль струменя має неперервні деформації. Чим подальше від крайки сопла вибрано перетин, тим «нижче» та «ширше» профіль струменя. Ґрунтуючись на візуальних спостереженнях за пульсуючим поодиноким струменем (трасованим бульбашками повітря), генерованим вібротранспортувальним пристроєм із відкритого сопла (рис. 3), або обмеженого перепоною (патрубком) з боку його більшого гідравлічного опору (рис. 4) [2], можна припустити, що рух такого струменя також відповідатиме, в певних межах його розвитку згідно з масштабом турбулентності, закону руху затопленого осисиметричного струменя. Ці обставини будуть уточнені за експериментальними даними співставленням полів поздовжніх складових відносних швидкостей в основній ділянці затопленого та пульсуючого струменя — побудовою універсального гідродинамічного профілю.

Разом з тим, слід зазначити, що внаслідок складності гідродинаміки пульсуючих турбулентних струменів глибоке проникнення у механізм цієї турбулентності представляє собою вкрай складну та нерозв'язану до цього часу задачу. Тому виконаємо спробу теоретичного дослідження особливостей розвитку пульсуючого турбулентного струменя, використовуючи єдину систему понять теорії турбулентних струменів. Отже, однією із задач ставимо отримання правила, що надасть можливість визначати для будь-якого перерізу в апараті (відстані від джерела пульсацій) залежність дальності розповсюдження пульсуючого струменя від параметрів коливань вібротранспортувального пристрою.

Сучасні теорії турбулентних струменів [3, 4] розглядають лише стаціонарну задачу. Особливістю турбулентних пульсуючих струменів є їхній нестаціонарний характер. Пульсуючий турбулентний струмінь, що створюється соплом вібруючої перегородки, складається з наступних один за одним у просторі й у часі поодиноких нестаціонарних струменів, що генеруються протягом напівперіоду коливань перегородки. Інтервали часу між послідовними поодинокими струменями, що рухаються в одному напрямку, становлять також половину періоду коливань, оскільки протягом цих інтервалів генеруються аналогічні струмені протилежного напрямку.

Поодинокий нестаціонарний струмінь являє собою деякий об'єм середовища, викинутий через сопло протягом напівперіоду коливань зі змінною швидкістю, середнє інтегральне за період коливання значення якої дорівнює:

$$w_0 = 2Af(1 - \varepsilon) / \varepsilon, \quad (1)$$

де A і f — відповідно амплітуда та частота коливань вібруючої перегородки, а ε — її загальний живий перетин, що дорівнює відношенню площі отворів (сопел) і зазору між вібропристроєм та корпусом апарата до площі поперечного перерізу апарата.

Протягом наступного напівперіоду коливань такий самий об'єм повинен повернутися через отвори вібруючої перегородки в складі нестаціонарних струменів протилежного напрямку. При віддаленні від вібрувальної перегородки швидкість струменя зменшується. Згідно методики проведення досліджень на заданому віддаленні L від полюса середня

інтегральна за період коливання й середня по перерізу швидкість пульсуючого струменя w_L визначалась за допомогою трубки Піто-Прандтля

$$w_L = 2/\pi k \sqrt{2gh} \tag{2}$$

де $k = w/\bar{w}_{\max}$ — відношення середньої по перерізу струменя швидкості до її максимального значення в центрі струменя, що змінюється в турбулентному потоці в межах 0,75—0,87 залежно від пульсаційного числа Рейнольдса;

h — показання диференціального манометра, з'єданого із трубкою Піто-Прандтля;

g — прискорення земного тяжіння.

Відстань L визначали за аналогією зі стаціонарними турбулентними струменями:

$$L = L_c + 4,5r_c \tag{3}$$

де L_c — відстань від точки вимірювання до зрізу сопла при середньому положенні вібруючої перегородки;

r_c — радіус сопла.

Досліджувались конструкції вібруючих перегородок з переточними елементами у вигляді сопел з діаметром $d_c = 15$ мм, що входять у патрубків, закріплені на перегородці, діаметром 38 мм і висотою 45 мм. Порівняльні дослідження проведені при переточних пристроях у вигляді сопел діаметром $d_c = 20$ мм без патрубків.

Конструктивні та режимні параметри змінювали в наступних межах: $\varepsilon = 0,055—0,142$; $A = 0,01—0,015$ м; $f = 2—4$ Гц; діаметр апарата 0,3 м. Дослідження проводили у воді при температурі 293 °К.

Припускаючи афінність закономірностей розповсюдження стаціонарного затопленого та пульсуючого струменів, фізично обгрунтованим підтвердженням цього буде встановлення співвідношень визначальних просторово-часових характеристик у відносних величинах у вигляді профілю швидкостей в перетині плоского турбулентного сліду за теорією Прандтля-Шліхтінга [3,4]. Тобто, якщо розподілення відносної швидкості у перетині стаціонарного струменя на відносних відстанях від джерела має універсальний характер, тоді стає можливим сподіватися про відповідне співпадіння аналогічних характеристик для пульсуючого струменя, хоча б на деякій ділянці такої характеристики.

Для перевірки цієї гіпотези визначалась залежність відносної швидкості $\varphi = w_L/w_0$, від відносного віддалення заданої точки вимірювання швидкості від сопла $\eta = L/d_c$ (рис. 5).

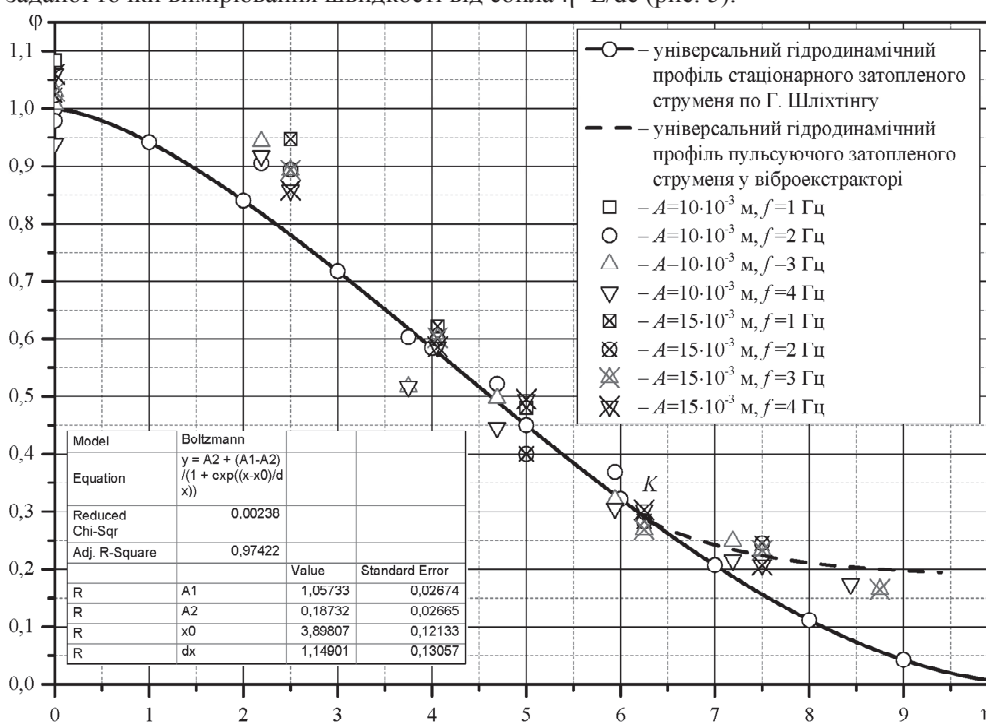


Рис. 5 – Поле поздовжньої складової відносної швидкості в основній ділянці затопленого пульсуючого струменя

Суцільною лінією на графіку показано універсальний гідродинамічний профіль відносної швидкості стаціонарного плоского затопленого струменя, що побудований за рівнянням Г. Шліхтинга [3]

$$\varphi = f(\eta) = (1 - \eta^{3/2})^2, \quad (4)$$

де $\eta = L/L_t$; $L_t = 2,44 L_{0,5}$ — теоретична дальність розповсюдження струменя в робочому середовищі;

$L_{0,5}$ — віддалення від джерела коливальних коливань, коли відносна швидкість дорівнює половині її максимального значення при $w_L/w_0 = 0,5$.

Слід зазначити, що $L_t = f(\beta)$, де $\beta = 1 - w_L/w_0$ — вибрана межа ступеню затухання струменя у дальніх турбулентних слідах (в досліді прийнято $\beta = 0,85$).

Як видно із графічної залежності $\varphi = f(\eta)$, що показана на рис. 5, дослідні дані в новій системі координат, що отримані для пульсуючого струменя, генерованого транспортувальним елементом віброперемішувального пристрою, групуються навколо кривої універсального гідродинамічного профілю турбулентного стаціонарного затопленого струменя. Точка «К» є тією межею, до якої спостерігається майже повне співпадіння досліджуваних з універсальним профілем, а після неї, тобто на значних віддаленнях від джерела генерації пульсуючого струменя, настає між ними відхилення. Отже для універсального гідродинамічного профілю пульсуючого турбулентного струменя при віброекстрагуванні може бути запропонована відповідна аналогічна залежність

$$w_L/w_0 = \left[1 - (\eta_f \ell_f / \ell_0)^{3/2} \right]^2. \quad (5)$$

Являючись результатом усереднення швидкості поодиноких струменів, що досягли відстані L і рухомих у часі один за одним із частотою коливальних віброуючої перегородки f , швидкість w_L може бути представлена у вигляді

$$w_L = 2A_L f, \quad (6)$$

де A_L — амплітуда коливальних пульсуючого струменя на відстані L .

Аналогічно початкова швидкість пульсуючого струменя дорівнює:

$$w_0 = 2A_0 f, \quad (7)$$

де $A_0 = A(1 - \varepsilon)/\varepsilon$ — початкова амплітуда коливальних. Відносна швидкість пульсуючого струменя на відстані L від її полюса при цьому дорівнюватиме

$$\frac{w_L}{w_0} = \frac{A_L f}{A_0 f} = \frac{A_L}{A_0}, \quad (8)$$

тобто вона перетворюється у відношення амплітуд, що дійсно спостерігається при візуалізації гідродинамічної обстановки у віброекстракторі.

З іншого боку, розглядаючи послідовне переміщення окремих поодиноких струменів, що представляють собою в дійсності вихрові кільця, що рухаються в напрямку поширення пульсуючого струменя, швидкість w_L можна записати в такому виді:

$$w_L = \omega_L R, \quad (9)$$

де R і ω_L — радіус поперечного перерізу вихрового кільця та кутова швидкість його обертання навколо вихрової нитки.

Слід зазначити, що специфіка генерації вихрових кілець віброуючим соплом, що рухається протилежно утвореному струменю у зоні розрідження, сприяє остаточному формуванню кільця радіусом R на початковій ділянці струменя.

Враховуючи R незмінним у процесі розвинення струменя, відносну його швидкість можна перетворити до виду

$$\frac{w_L}{w_0} = \frac{\omega_L R}{\omega_0 R} = \frac{\omega_L}{\omega_0}. \quad (10)$$

Результати досліджень при турбулентному режимі руху пульсуючих потоків можуть бути представлені залежністю відносної швидкості w_L/w_0 від функціональної просторової характеристики $\eta_f = \ell/\ell_f$, де $\ell = L/t_c$ — відносна відстань, а ℓ_f — таке її значення, при якому $w_L/w_0 = e^{-1}$, де e — основа натуральних логарифмів.

У цих функціональних просторово-часових координатах увесь масив даних узагальнився при η_f , меншій за критичне значення

$$(\eta_f)_k = 0,1e \ln 10 / (1 - e^{-0,5})^{2/3} = 1,1656538 \quad (11)$$

відомою формулою Г. Шліхтінга [3] для універсального профілю швидкостей у дальніх турбулентних слідах:

$$w_L / w_0 = \left[1 - (\eta_f \ell_f / \ell_0)^{3/2} \right]^2 \quad (12)$$

а при $\eta_f > (\eta_f)_k$ залежністю $(\eta_f)^3 (w_L / w_0)^2 = C_T$ (13)

де $C_T = (\eta_f)_k^3 \left[1 - (\eta_f)_k^{3/2} (1 - e^{-0,5}) \right]^4 = 0,10286$ (14)

являє собою фундаментальну константу; $\ell_0 = L_0 / \text{гс}$ — відносна гранична дальність поширення турбулентного пульсуючого струменя, а L_0 — її абсолютне значення.

Запропоновані залежності узагальнюють експериментальні дані зі середньоквадратичним відхиленням $8,5 \cdot 10^{-3}$ у довірчому інтервалі 98 %. Теоретичне значення $(\ell_f / \ell_0)_T$, дорівнює $(1 - e^{-0,5})^{2/3} = 0,53695838$.

Визначивши на основі залежності w_L / w_0 від ℓ експериментальне значення ℓ_f , можна розрахувати LK і w_L , необхідні при конструюванні віброекстракторів.

Таким чином, встановлено можливість використання фундаментальних закономірностей для розрахунку гідродинаміки турбулентних пульсуючих струменів, що забезпечують ефективну роботу віброекстракторів.

Висновки. За результатами досліджень особливостей гідродинаміки пульсуючих струменів, що генеруються вібрувальними робочими пристроями у віброекстракторі безперервної дії, отримано у функціональних просторово-часових координатах фундаментальний опис закономірностей зміни їхньої швидкості. Запропоновано алгоритм масштабного переходу процесу віброекстрагування для системи тверде тіло-рідина з малою різницею густин фаз.

Одержані нові дані, необхідні для конструювання і розрахунку віброекстракційних апаратів.

Література

1. Пат. 86485 Україна, МПК В 01 D 11/02. Вібраційний екстрактор / Зав'ялов В. Л., Запорожець Ю. В., Бодров В.С. — № а 2007 07563; заявл. 05.07.07; опубл. 27.04.09, Бюл. №8.
2. Вибрационные массообменные аппараты / И. Я. Городецкий, А. А. Васин, В. М. Олевский, П. А. Лупанов; Под ред. В. М. Олевского. — М.: Химия, 1980. — 192 с.
3. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. Перев. с немецкого. — М.: Наука, 1974. — 713 с.
4. Теория турбулентных струй / Г. Н. Абрамович, Т. А. Гиршович, С. Ю. Крашенинников и др. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Наука, 1984. — 720 с.