

МОДЕЛЮВАННЯ КВАЗИТОЧКОВОГО ТУРБУЛЕНТНОГО ВИХОРУ В ЗАКРУЧЕНИХ ТЕЧІЯХ РІДИНИ В ЗБАГАЧУВАЛЬНОМУ УСТАТКУВАННІ

¹Блюсс Б.О. , ²Лук'янов П.В. , ¹Дзюба С.В.

¹ Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, ² Національний авіаційний університет МОН України

МОДЕЛИРОВАНИЕ КВАЗИТОЧЕЧНОГО ТУРБУЛЕНТНОГО ВИХРЯ В ЗАКРУЧЕННЫХ ТЕЧЕНИЯХ ЖИКОСТИ В ОБОГАТИТЕЛЬНОМ ОБОРУДОВАНИИ

¹Блюсс Б.А. , ²Лукьянов П.В. , ¹Дзюба С.В.

¹ Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины, ² Национальный авиационный университет МОН Украины

SIMULATION OF QUASI-POINT TURBULENT VORTEX IN THE SWIRLING FLOWS OF FLUIDS IN THE PREPARATION EQUIPMENT

¹Blyuss B.O., ²Lukianov P.V., ¹Dziuba S.V.

¹ Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov of National Academy of Sciences of Ukraine, ² National Aviation University MSE of Ukraine

Анотація. У статті наведено, що аналіз параметрів ефективності режимів роботи гідротехнічних систем технологій збагачення мінеральної сировини визначає комплекс функціональних, екологічних і економічних факторів, які об'єктивно впливають на рентабельність виробництва, що реалізується за рахунок створення належних умов для модернізації технологій, впровадження нових засобів і устаткування, а також зниження енергозатрат процесів транспортування. При цьому обґрунтовано, що для збереження і відтворення запасів мінеральної сировини існують наступні основні умови: раціональне використання надр (особливо щодо ресурсів, які не відновлюються); застосування дієвих заходів до відновлення природних ресурсів (відновлювати і підвищувати природну родючість земель, релізувати лісопосадки, відтворювати запаси водою); максимально використовувати вторинну сировину та інші відходи виробництва; необхідність поліпшення і підтримки екологічності переробного виробництва і природокористування. Використовуючи поняття граничної течії Тейлора-Куетта та її властивості, запропоновано математичну модель квазіточкового турбулентного вихору. Оскільки параболічний закон повздожньої швидкості для ламінарної течії відповідає квазіточковому ламінарному вихору, то для турбулентної течії природно використовувати також квазіточковий вихровий розподіл. Саме цей розподіл якісно відповідає профілю повздожньої швидкості, що експериментально підтверджується, і, як наслідок, вказує на інтегральний ефект зменшення турбулентної в'язкості на підставі рівнянь Рейнольдса та градієнтної моделі турбулентності Буссінеска. Основними вимогами до раціонального використання запасів мінеральної сировини в Україні є найбільш повне вилучення з надр і раціональне використання корисних копалин, а також компонентів, які містяться в них; недопущення шкідливого впливу гірничих робіт, що пов'язані з використанням надр, на збереження запасів мінеральної сировини; охорону корисних копалин від затоплення, пожеж та інших факторів, що знижують їх якість і цінність; та збереження і поліпшення стану навколишнього середовища в районах поблизу розташування діючих родовищ.

Ключові слова: мінеральна сировина, інтегральне зменшення турбулентної в'язкості, квазіточковий турбулентний вихор, оптимальний рух, стаціонарний в'язкий обертальний рух, гідротехнічні системи

Одним із основних завдань при прийнятті управлінських рішень на підприємствах гірничо-металургійної галузі для забезпечення ефективного функціонування процесів видобутку і збагачення мінеральної сировини є вирішення проблем зі складування відходів технологій переробки корисних копалин, а також із забезпеченням необхідного об'єму зворотної рідини на всіх етапах технологічних циклів. Аналіз параметрів ефективності режимів роботи гідротехнічних систем технологій збагачення мінеральної сировини визначає

комплекс функціональних, екологічних і економічних факторів, які об'єктивно впливають на рентабельність виробництва, що реалізується за рахунок створення належних умов для модернізації технологій, впровадження нових засобів і устаткування, а також зниження енергозатрат процесів транспортування [1,2].

Для економіки України, яка істотно залежить від стабільності роботи гірничо-металургійного комплексу країни, а також раціонального використання сировинної бази, актуальності набуває узагальнення теоретичних знань і обґрунтування системи заходів з управління гірничими підприємствами в цілому. В даний час необхідність і можливість застосування системного підходу до вивчення і вирішення складного завдання є важливим фактором успішної реалізації фінансово-економічної діяльності підприємств гірничої галузі.

Ринки ресурсів є одним з основних структурних елементів ринкової економіки. Від ефективності функціонування ринків ресурсів залежить оптимальність їх використання, а значить, стійкість і рівновага економіки, результативність роботи переробних підприємств і гірничо-металургійного комплексу в цілому.

Великий вплив на проблему залучення природних ресурсів в процес виробництва товарів і послуг надає науково-технічний прогрес. Цей вплив має певну суперечливість та відбувається в двох протилежних напрямках. Науково-технічний прогрес сприяє раціоналізації використання природних ресурсів: виявляються мінеральні сировини, які більш дешеві і що легко транспортуються (наприклад, природний газ), а також впроваджуються способи більш повного вилучення та переробки руд і вугілля, при цьому повніше використовується попутна сировина, застосовуються безвідходні технології. У промисловому виробництві успішно здійснюється перехід до енергозберігаючих і ресурсозберігаючих технологій, які скорочують питому витрату сировини і палива. У той же час розвиток науки і техніки веде до розширення старих і створення нових видів виробництв, які потребують використання природних ресурсів. Важлива сторона проблеми використання природних ресурсів пов'язана з їх географічним розміщенням. Основна частина родовищ мінеральної сировини зосереджена не в розвинених країнах, а в регіонах з відносно слабким рівнем економічного розвитку. Такий стан робить неминучим переміщення у величезних масштабах природних ресурсів з районів їхнього видобутку в райони переробки і їх споживання.

Для збереження і відтворення запасів мінеральної сировини існують наступні основні умови:

а) раціональне використання надр (особливо щодо ресурсів, які не відновлюються);

б) застосування дієвих заходів до відновлення природних ресурсів (відновлювати і підвищувати природну родючість землі, здійснювати лісопосадки, відтворювати запаси водойм);

в) максимально використовувати вторинну сировину і відходи виробництва;

г) необхідність поліпшення і підтримки екологічності переробного виробництва і природокористування.

Розробка родовищ корисних копалин передбачає можливість максимального використання всіх хімічних елементів, при цьому існують певні вимоги до процесів переробки навіть бідних руд, а також критерії оцінки запасів мінеральної сировини, яка видобувається. Використання трубопровідного транспорту на етапах транспортування вихідної сировини до місць переробки є найбільш енергоефективним і екологічно безпечним.

Сучасний розвиток транспортування рідинно-газових сумішей в Україні є вагомою складовою в реальному секторі розвитку промислової індустрії. Вартість транспортування зростає, тим самим виникає необхідність пошуку нових засобів і шляхів збільшення швидкості потоку рідини у трубопроводах. Один із основних способів підвищення енергоефективності транспортування рідинно-газових сумішей в трубопроводах полягає в створенні умов до закручування потоку з метою прискорення течії рідини. Для реалізації закрутки потоку у круглій трубі використовується зокрема спіраль із сталевий проволони. Спроби чисельного розрахунку такої течії за допомогою сучасних систем автоматичного проектування та імітації (SolidWorks, Ansys) виявляються складними. Для труби діаметром 25 мм і довжиною 5 м втрати напору складають десятки відсотків, доходючи навіть до 50 %. При цьому, проведені експерименти [3] свідчать, що насправді існують окремі області параметрів потоку, де не тільки не спостерігаються зазначені значні втрати напору, але і має місце дійсно ефект впливу закрутки течії на її повздовжнє прискорення. Аналіз результатів науково-практичних робіт провідних вчених з проблем вивчення транспортування рідинно-газових сумішей показує оптимальність процесів течії рідини для природних явищ [4]. Оскільки течія у трубі зі спіраллю, перш за все, відрізняється наявністю граничного шару, то на прикладі більш простого математичного моделювання процесів транспортування підтверджується оптимальність течії за наявності перешкод.

Оптимальний характер стаціонарної ламінарної течії рідини у плоскому каналі із легко проникною шорсткістю (ЛПШ). Формулювання задачі складається у наступному: застосовуючи математичний апарат варіаційного числення, знайти такі функції розподілу швидкості течії рідини в області із легко проникною шорсткістю, які б доставляли екстремум витрати рідини.

Математична модель течії рідини у плоскому с ЛПШ описується наступними рівняннями [5]

$$\frac{d\tau}{dz} - \rho_1 f(U) = p' (= \Delta p) \quad (1)$$

або

$$\rho v \frac{d^2 U}{dz^2} - \rho_1 f(U) = p' \quad (2)$$

де U - поздовжня швидкість, p' -- перепад тиску на одиницю довжини. ρ_1 -- інша ніж густина рідини величина. Вона вводиться формально аби не ускладнювати модель, тобто не розглядати детально обтікання рідиною кожної окремої перешкоди і т.і. Решта позначень - стандартні.

В монографії [5] вказано, що рівняння (1) та (2) мають аналітичний розв'язок за умови, що $f(U)$ є лінійною функцією U . Оскільки розглядається стаціонарний рух, то згідно із вищезазначеним, у даній задачі повинен існувати оптимальний розв'язок, який і реалізується у дійсності. У математиці це означає, що дійсний рух рідини повинен доставляти екстремум певному функціоналу. Легко здогадатись, що цим функціоналом є кількість рідини, що протікає за одиницю часу крізь переріз, тобто її витрата. Перепишемо рівняння (2) у вигляді

$$f(U) = \left(\rho v \frac{d^2 U}{dz^2} - p' \right) \rho_1^{-1}. \quad (3)$$

Звідки випливає

$$U = f^{-1}(f(U)) = g \left(\frac{d^2 U}{dz^2} \right). \quad (4)$$

Для знаходження функції U застосуємо вираз для коефіцієнту опору λ

$$\lambda = p' / p_1 U_{mean}^2. \quad (5)$$

Мінімум λ на дійсному русі означає максимум функціоналу

$$U_{mean} = \frac{1}{H} \int_0^H U(z) dz = \frac{1}{H} \int_0^H g \left(\frac{d^2 U}{dz^2} \right) dz.$$

Відповідне рівняння Ейлера (варіаційне числення) має наступний вигляд

$$F_y + \sum_{i=1}^n (-1)^i \frac{d^i}{dz^i} \left(F_{y^{(i)}} \right) = 0.$$

У позначенні даної задачі $F = g$, $y = U$, z - незалежна змінна. Тому маємо

$$(-1)^2 \frac{d^2}{dz^2} \left(g_{U^{(2)}} \right) = 0, \text{ або } g_{U^{(2)}} = \frac{dg}{dU^{(2)}} = Az + B, \text{ або } \frac{dU^{(2)}}{dg} = \frac{1}{Az + B}. \quad (6)$$

Враховуючи інваріантність першого диференціалу, отримуємо рівняння:

$$\frac{d^3U}{dz^3} = \frac{1}{Az+B} \frac{dU}{dz} . \quad (7)$$

Рівняння (7) має наступний аналітичний розв'язок:

$$U(z) = C_1 + C_2(Az+B) \text{BesI} \left(2, 2\sqrt{(Az+B)/A^2} \right) + C_3(Az+B) \text{BesY} \left(2, 2\sqrt{(Az+B)/A^2} \right) . \quad (8)$$

Це більш загальний розв'язок ніж той, що існує у літературі [5]. Якщо покласти $A=0$ в (7), то це розв'язання співпадає із вже відомим, оскільки перетвориться на

$$U(z) = C_1 + C_2 \exp(z/\sqrt{B}) + C_3 \exp(-z/\sqrt{B}) . \quad (9)$$

Вираз (9) без особливих зусиль зводиться до вигляду

$$U = 2 \left(\tau_0 \text{sh}\sqrt{D}z - \text{ch}\sqrt{D}z / \sqrt{D} + 1/\sqrt{D} \right) / \sqrt{D} , \quad (10)$$

де τ_0 - напруження зсуву на дні ($z=0$), а $D = \frac{knh^2}{\nu}$ - константа, що пов'язана із введенням додаткової сили опору $f = -knU$ всередині легко проникної шорсткості [5].

Оскільки вважається, що (10) узгоджується із експериментом, припустимо, що в (5) $A \approx 0$. Отже, показано, що дійсний рух рідини у області ЛПШ є оптимальним.

Обґрунтування інтегрального ефекту зменшення турбулентної в'язкості на підставі математичної моделі турбулентного квазіточкового вихору. Відомо, що при ламінарному русі в'язкість є мінімальною і, отже, втрати - теж. Утім, згадаємо, що саме природнім для рідин та газів є хаотичний Броунівський рух. Отже, із цієї точки зору, турбулентний рух рідини є більш природнім ніж ламінарний. Використання теорії варіаційного числення для задач із складною геометрією є вкрай ускладненим. При цьому, використовують існуючу теорію оберненого каскаду енергії спіральної турбулентності шляхом розробки нових програмних модулів і т.і. [6]. В даній статті пропонується використання більш простого підходу, ідея його проаналізована в роботі [7]. Вона полягає у порівнянні градієнтів профілів повздовжньої швидкості. Для цього нам потрібна нова модель - турбулентного квазіточкового вихору. Отже, розподіл швидкості у вихорівій течії теж повинен бути оптимальним. Якщо це когерентні структури, то оптимальність у даному випадку зводиться до мінімальної дії в'язкості на течію. У класі в'язких стаціонарних течій вже відомі дві моделі вихорів. Це відповідно точковий та квазіточковий вихори [8]

$$V_\theta = \Gamma / 2\pi r , \quad V_\theta^{qp} = \Gamma \left(1 - \left(r/R_V \right)^2 \right) / 2\pi r . \quad (11)$$

Обидва є точними розв'язками наступного рівняння Нав'є—Стокса у циліндричній системі координат:

$$\frac{d^2 V_\theta}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dV_\theta}{dr} - \frac{V_\theta}{r^2} = 0. \quad (12)$$

Дані розв'язки перетворюють на нуль саме ліву частину (12). Твердження про в'язкість (11) легко перевіряється шляхом знаходження виразу дотичних напружень. Для обох, - точкового та квазіточкового вихорів, - ці напруження не є рівними нулю. Отже ці течії є в'язкими.

Реальні турбулентні вихорі добре апроксимуються моделлю точкового вихору. Такими є, наприклад, вихори, що утворюються при обтіканні підводних крил. Зрозуміло, що при величинах швидкості крил порядку десятка метрів за секунду і радіусу вихору кілька метрів число Рейнольдса сягає десятків мільйонів і більше. Існуючи дослідження [9,10], де використовується саме модель точкового вихору для опису еволюції вихорів із горизонтальною віссю, означає саме певну близькість їх у сенсі розподілу швидкості до реальних. З одного боку маємо докази того, що у розвинутих турбулентних течіях коефіцієнт турбулентної в'язкості є приблизно сталою величиною [11,12], а з іншого боку - умова компенсованості поля течії [8], яка є універсальною і не залежить від характеру руху (ламінарного чи турбулентного). Із цього випливає, що має сенс знайти такий розв'язок, який описує компактний турбулентний вихор при дуже великих (мільйони) числах Рейнольдса (так звана гранична турбулентна течія) близький до точкового вихору.

На відміну від ламінарного (12), турбулентний рух описується рівнянням

$$0 = \mu_T \left(\frac{d^2 V_\theta}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{dV_\theta}{dr} \right), \quad (13)$$

із загальним розв'язком [13]

$$V_\theta = C_1 r^{-1} + C_2. \quad (14)$$

У виразах (13)—(14) V_θ - усереднена швидкість турбулентного руху.

Використовуючи процедуру, що викладена при знаходженні моделі квазіточкового (ламінарного) вихору [8], знаходимо її аналог для турбулентного руху:

$$V_\theta^{tq} = \Gamma \left(1/r - 1/R_V \right) / 2\pi, \quad (15)$$

де Γ - циркуляція, R_V - радіус вихору (або труби).

На рис. 1 представлені розподіли азимутальної швидкості відповідно точкового, квазіточкового ламінарного та турбулентного вихорів.

Оптимальна турбулентна течія рідини у круглій трубі. Відомо, що реальна

ламінарна течія у трубі описується параболічним розподілом повздовжньої швидкості. Якщо ж закручений потік має гвинтову симетрію, тоді цьому розподілу відповідає модель квазіточкового вихору [14]. Як вказує рис. 1, квазіточкові ламинарний та турбулентний вихори кількісно, на фоні точкового вихору, близькі один до одного за розподілом. Отже, це призводить до використання квазіточкового турбулентного вихору для апроксимації закрученої турбулентної течії із гвинтовою симетрією.

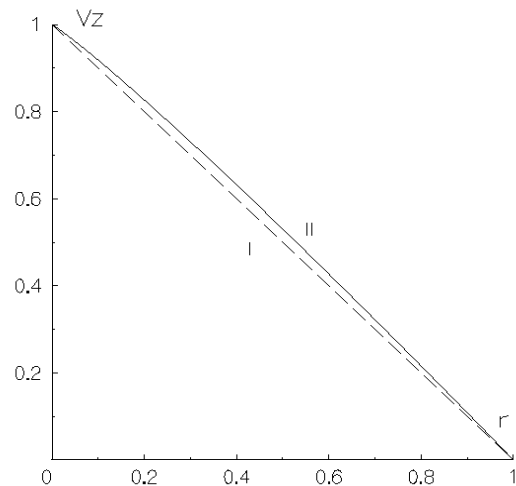
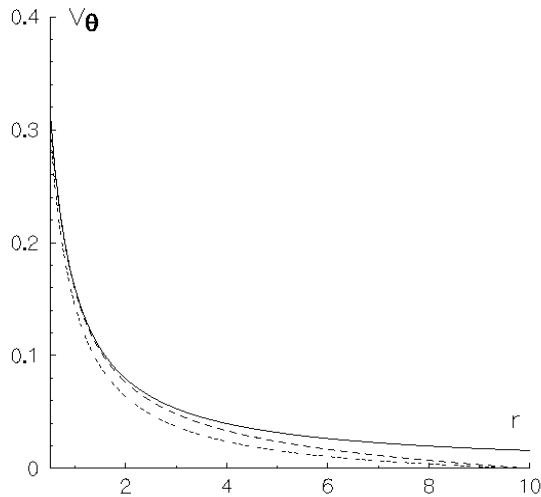


Рисунок 1 - Розподіли азимутальної швидкості. Зверху униз: точковий вихор, квазіточковий ламинарний вихор, квазіточковий турбулентний вихор

Рисунок 2 - Розподіли повздовжньої швидкості, що відповідають квазіточковому турбулентному вихору I – (15), II – (17).

Оскільки гвинтова симетрія із кроком l визначається співвідношенням [14]

$$V_z = V_z^0 - \frac{r}{l} V_\theta, \tag{16}$$

розподіл повздовжньої швидкості має, згідно із (17) та (18), наступний вигляд:

$$V_z^{QP} = |\Gamma / 2\pi l| (1 - r/R_V). \tag{17}$$

У виразі (17) враховано умову максимальності повздовжньої швидкості на вісі. Це підтверджує експеримент, вказуючи (повітряні бульбашки) на зону мінімального тиску на вісі труби. Вираз (17) - лінійна функція від радіальної координати (див. рис. 2). Так, якщо ми врахуємо не тільки турбулентну, але і молекулярну в'язкість, то це у результаті призведе до наступного безрозмірного рівняння

$$\frac{d^2 V_\theta}{dr^2} = -\frac{2 + \varepsilon}{1 + \varepsilon} \frac{dV_\theta}{r dr} + \frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon} \frac{V_\theta}{r^2}. \tag{18}$$

У виразі (18) ε - мала величина, яка у даному випадку рівна відношенню значень молекулярної та турбулентної в'язкості. Розв'язком (18) є

$$V_{\theta} = C_1/r + C_2 r^{\varepsilon/(1+\varepsilon)}.$$

Тоді, для течії із гвинтовою симетрією повздовжня швидкість є

$$V_z^{QP} = \left| \Gamma / 2\pi l \right| \left(1 - \left(r/R_V \right)^{\frac{1+2\varepsilon}{1+\varepsilon}} \right). \quad (19)$$

Наявність малого параметру ε робить профіль повздовжньої швидкості вже заокругленим на вісі обертання (див. рис. 2). Дійсно,

$$\frac{dV_z}{dr} = - \left| \frac{\Gamma}{2\pi l} \right| \frac{2+\varepsilon}{1+\varepsilon} \left(\frac{1}{R_V} \right)^{\frac{2+\varepsilon}{1+\varepsilon}} r^{\frac{\varepsilon}{1+\varepsilon}} = 0 \text{ при } r = 0.$$

При цьому поблизу стінки врахування ε не є суттєвим, і кут нахилу той самий. Оскільки гранична течія Тейлора-Куетта реалізується для чисел Рейнольдса порядку 10^6 [11], то для течій із значно меншими числами Рейнольдса вплив стінок і наявність ламінарного пограншару можуть бути наявними.

Течії із гвинтовою симетрією розглядаються у рамках моделі ідеальної рідини. Утім описують явища, що мають турбулентну природу. Турбулентність є фоною тому кількісно не враховується. У даному моделюванні розподіл азимутальної швидкості є розв'язком рівнянь Рейнольдса. Лабораторні спостереження вказують на те, що існує також і турбулентна течія із гвинтовою симетрією.

Оскільки вважається, що усі характеристики руху залежать лише від радіальної координати, то при кожному фіксованому значенні r цієї координати маємо стале значення турбулентної в'язкості.

Рівняння Рейнольдса для повздовжньої швидкості підтверджують, що якщо течія здійснюється градієнтом тиску на одиницю довжини Δp та використовується градієнтна модель турбулентності Буссінеска (як для (15)), тоді маємо наступне рівняння для усередненої повздовжньої швидкості:

$$\frac{d}{dr} \left(r \mu_T \frac{dV_z}{dr} \right) = r \Delta p, \quad (20)$$

звідки отримується, згідно (17),

$$\mu_T = \left(\frac{\Delta p}{2} r + C r^{-1} \right) / \left(\frac{dV_z}{dr} \right). \quad (21)$$

Враховуючи граничні умови та знаки повздовжнього градієнту тиску ($\Delta p < 0$) та радіального градієнта повздовжньої швидкості (17), маємо:

$$\mu_T = \frac{\Delta p}{2} r / \left(\frac{dV_z}{dr} \right) = \frac{\Delta p}{2} r \left(- \left| \frac{\Gamma}{2\pi l} \right| \frac{1}{R_v} \right) > 0. \quad (22)$$

Якщо порівняти витягнутий профіль повздовжньої швидкості (17) або (19) із відповідним профілем звичайної турбулентної течії в трубі, то можливо зробити наступний висновок: поблизу стінок градієнт швидкості є значно більшим у течії без закрутки, а всередині – навпаки. Оскільки турбулентна в'язкість обернено пропорційна радіальному градієнту повздовжньої швидкості вираз (22), то це просто означає, що закрутка течії призводить до збільшення значень турбулентної в'язкості у області стінки та навпаки – зменшенню їх у решті області течії.

Таким чином, на прикладі, який розглянуто вище, показано, що природні стаціонарні течії руху рідини є оптимальними. Модель квазіточкового турбулентного вихору, що наведено в даній роботі, дозволяє знайти розподіл повздовжньої швидкості. І, цей розподіл при підстановці у рівняння турбулентного руху, вказує на значне зменшення турбулентної в'язкості у майже всій області, крім пристінної, відносно повздовжньої швидкості. На основі результатів дослідження в даному моделюванні отримано обґрунтування збільшення витрати рідини у закрученому потоці.

При цьому, основними вимогами до раціонального використання запасів мінеральної сировини в Україні є найбільш повне вилучення з надр і раціональне використання основних корисних копалин і тих, що спільно з ними залягають, а також компонентів, які містяться в них; недопущення шкідливого впливу гірничих робіт, які пов'язані з використанням надр, на збереження запасів мінеральної сировини; охорона корисних копалин від затоплення, пожеж та інших факторів, що знижують їх якість і цінність; та збереження і поліпшення стану навколишнього середовища в районах поблизу розташування діючих родовищ.

Отже, для прийняття рішень керівниками гірничо-металургійної комбінатів та інвесторів в розвиток гірничої галузі, що дозволяють обґрунтувати сталий розвиток даних підприємств, а також, галузі в цілому, необхідно використовувати сучасний математичний апарат моделювання, який має широкий спектр можливостей. Діяльність суб'єктів інвестиційного процесу в Україні вимагає використання складних багатофункціональних систем управління процесом інвестування в діючі підприємства, але висока вартість отримання раціональних інтегрованих рішень є одним із основних стримуючих чинників для їх використання українськими інвесторами.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Булат А.Ф., Витушко О.В., Семененко Е.В. Модели элементов гидротехнических систем горных предприятий. Днепропетровск: Герда, 2010. 216 с.
2. Блюсс Б.О., Дзюба С.В., Семененко Е.В. Обґрунтування параметрів ефективності гідротехнічних систем в технологіях переробки мінеральної сировини // Металургійна та гірничорудна промисловість. 2018. Вип. 4. С. 58-65
3. Лукьянов П.В., Мешков И.В. Структура и расход закрученного потока жидкости в криволинейной трубе. Промислова гідраліка і пневматика. 2018.-№2(60). С. 15—22.
4. Бердичевский В.Л. Вариационные принципы механики сплошной среды. М. : Наука, 1983, 448 с.

5. Flow and Transport Processes with Complex Obstructions: Applications to Cities, Vegetation Canopies, and Industry (Ye. A. Gayev and J.C.R. Hunt editors). // NATO Science Series, Springer Publ. 2006. Vol. 236, 350 p.
6. Колисниченко А.В. К теории инверсного каскада энергии в спиральной турбулентности астрофизического немагнитного диска. Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2014, №70. 36 с. URL <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2014--70>
7. Высоцкий Л.И. Существуют ли зоны с отрицательной вихревой вязкостью в продольно-однородных турбулентных потоках. // Magazine of Civil Engineering 2013. № 2. p.48—53. <https://doi: 10.5862/MCE.37.7>
8. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. Москва. Наука, 1987, 840 с.
9. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. Москва. Наука, 1974, 712 с.
10. Лук'янов П.В. Модель квазіточкового вихору // Наукові вісті НТТУ КПІ. 2011. №4(78), С. 139—142.
11. Huisman S.G. , van Gils D.P.M. , Grossmann S., Sun C., and Lohse D. Ultimate Turbulent Taylor Couetter Flow // Phys. Review letters. 2012. 108(2) P. 024501.
12. Townsend A.A. The structure of turbulent shear flow. Cambridge: Cambridge University Press , 1956. 315 p.
13. Лук'янов П.В. Генерация компактного турбулентного вихору // Наукові вісті НТТУ КПІ. 2013. №4(90), С. 127-131.
14. Лук'янов П.В. Модели компактных компенсированных вихревых течений с винтовой симметрией // Прикладна гідромеханіка, 2013. т. 87. №3. с. 37—42.

REFERENSES

1. Bulat A.F., Vitushko O.V., and Semenenko Ye.V. (2010), *Modeli elementov gidrotehnicheskikh sistem gorniyh predpriyatiy* [Models of elements of the hydrotechnical systems of mine enterprises], Gerda, Dnepropetrovsk, UA.
2. Blyuss B.O., Dziuba S.V. and Semenenko Ye.V. (2018), «Ground parameters of efficiency of the hydrotechnical systems in technologies of processing of mineral raw material», *Metalurgiyina ta gornorudna promyislovist*, no. 4, pp. 58-65
3. Lukianov P.V. and Meshkov I.V. (2018), «Helical flux structure and rate of fluid in curvilinear pipe with constant cross-section», *Promysova gidravlika i pnevmatyka*, no. 2(60), pp 15—22.
4. Berdichevsky V.L. (1983), *Variatsionnye printsipy mekhaniki sploshnoy sredy* [Variational principles for mechanics of continuous medium], Nauka, Moscow< SU.
5. Flow and Transport Processes with Complex Obstructions: Applications to Cities, Vegetation Canopies, and Industry (Ye. A. Gayev and J.C.R. Hunt editors) (2006), NATO Science Series, Springer Publ., Vol. 236.
6. Kolisnichenko, A.V. (2014), «On inverse energy cascade in spiral turbulence of astrophysical non-magnetic disk», *Preprints of Keldysh IPM*, Vol. 70, 36 p. URL <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2014--70>.
7. Vysotsky L. I. (2013), «On existence of zones with negative turbulent viscosity in longitudinally homogeneous flows», *Magazine of Civil Engineering*, no. 2, pp. 48—53. <https://doi: 10.5862/MCE.37.7>
8. Loytsyansky L.G. (1987), *Mekhanika zhidkosti i gaza* [Mechanics of liquid and gas], Nauka, Moscow, SU.
9. Schlichting G. (1974), *Teoriya pogranychnoy sloya* [Boundary layer theory], Science, Moscow, SU.
10. Lukianov P.V. (2011), «Model of Quasi—Point Vortex», *Research Bulletin of National Technical University of Ukraine KPI*, no. 4(78), P. 139—142.
11. Huisman S.G. , van Gils D.P.M. , Grossmann S., Sun C., and Lohse D. (2012), «Ultimate Turbulent Taylor Couetter Flow», *Phys. Review letters*, no.108(2), P. 024501.
12. Townsend A.A. (1956), *The structure of turbulent shear flow*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
13. Lukianov P.V. (2011), «Compact turbulent Vortex Generation Approximate Model for Relatively Large Time Moments». *Research Bulletin of National Technical University of Ukraine KPI*, no. 4(90), pp. 127—131.
14. Lukianov P.V. (2013), «Models of compact compensated vortex flows with helical symmetry», *Applied hydromechanics*, Vol. 87, no.3, p p. 37—42.

Про авторів

Блюсс Борис Олександрович, доктор технічних наук, професор, завідувач відділу геодинамічних систем та вібраційних технологій, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України (ІГТМ НАН України), Дніпро, Україна, bblyuss@gmail.com

Лук'янов Павло Володимирович, кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, доцент кафедри гідрогазових систем, Національний авіаційний університет Міністерства освіти і науки України, Київ, Україна, pvl1967eddy@gmail.com

Дзюба Сергій Володимирович, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу геодинамічних систем та вібраційних технологій, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України (ІГТМ НАН України), Дніпро, Україна, sergejdzuba@gmail.com

About the authors

Blyuss Boryis Oleksandrovych, Doctor of Technical Sciences (D. Sc.) Professor, Head of Department of Geodynamic System and Vibration Tehnologies, M.S. Poljakov Institute of Geotechnical Mechanics National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NAS of Ukraine), Dnipro, Ukraine, bblyuss@gmail.com

Lukianov Pavel Volodymyrovych, Candidate of Physics and Mathematics Sciences (Ph.D.), Senior Researcher, Accosiate Professor in Hydro Gas Systems Department, of National Aviation University MES of Ukraine, Kyiv, Ukraine, pvl1967eddy@gmail.com

Dziuba Serhii Volodymyrovych, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Senior Researcher in Department of Geodynamic System and Vibration Tehnologies, M.S. Poljakov Institute of Geotechnical Mechanics National Academy of Sciences of Ukraine

Аннотация. В статье приведены результаты анализа параметров эффективности режимов работы гидротехнических систем технологий обогащения минерального сырья, которые определяют комплекс функциональных, экологических и экономических факторов, которые объективно влияют на рентабельность производства, реализуется за счет создания условий для модернизации технологий, внедрение новых средств и оборудования, а также снижение энергозатрат процессов транспортировки. При этом обосновано, что для сохранения и воспроизводства запасов минерального сырья существуют следующие основные условия: рациональное использование недр (особенно в отношении ресурсов, которые не возобновляются) применение действенных мер к восстановлению природных ресурсов (восстанавливать и повышать естественное плодородие земли, реализовывать лесопосадки, воспроизводить запасы водоемов) максимально использовать вторичное сырье и прочие отходы производства; необходимость улучшения и поддержания экологически безопасного перерабатывающего производства и природопользования. Используя понятие предельной течения Тейлора-Куэтта и ее свойства, предложена математическая модель квазиточечного турбулентного вихря. Поскольку параболический закон продольной скорости для ламинарного течения соответствует квазиточечному ламинарному вихрю, то для турбулентного течения естественно использовать также квазиточечное вихревое распределение. Именно это распределение качественно соответствует профилю продольной скорости, экспериментально наблюдается, и, как следствие, указывает на интегральный эффект уменьшения турбулентной вязкости на основании уравнений Рейнольдса и градиентной модели турбулентности Буссинеска. Основными требованиями к рациональному использованию запасов минерального сырья в Украине является наиболее полное извлечение из недр и рациональное использование полезных ископаемых, а также компонентов, содержащихся в них; недопущение вредного влияния горных работ, связанных с использованием недр, на сохранение запасов минерального сырья; охрану полезных ископаемых от затопления, пожаров и других факторов, снижающих их качество и ценность; а также сохранения и улучшения состояния окружающей среды в районах вблизи расположения действующих месторождений.

Ключевые слова: минеральное сырье, интегральное уменьшение турбулентной вязкости, квазиточечный турбулентный вихрь, оптимальное движение, стационарное вязкое вращательное движение, гидротехнические системы

Annotation. In the article, the authors analyze parameters of operating efficiency of the hydrotechnical system modes used in technologies for mineral raw material processing, which determine a complex of functional, environmental and economic factors that objectively affect the production profitability and are realized through the creation of favourable conditions for modernization of the technologies, introduction of new tools and equipment and reduction of energy consumption in the processes of transportation. It is substantiated that for the preservation and renewal of mineral raw materials, the following basic conditions should be provided: rational use of mineral resources (especially for non-renewable resources); undertaking of effective measures for the natural resources renewing (to restore and improve natural fertility of the land, to bed forest plantations, to renew water reservoirs); maximization of the secondary raw materials and other waste products use; improvement and support of environmentally friendly processing industries and nature management. By using the concept of the Taylor-Coetta boundary current and its properties, a mathematical model of a quasi-point turbulent vortex is proposed. Since the parabolic law of longitudinal velocity for the laminar flow corresponds to a quasi-point laminar vortex, it is also logically to use a quasi-point vortex distribution for the turbulent flow. This very distribution corresponds qualitatively to the experimentally observed longitudinal velocity profile and, as a result, indicates the integral effect of reducing the turbulent viscosity based on the Reynolds equations and the Bussinesque gradient turbulence model. The main requirements for the rational use of mineral raw materials in Ukraine are the most complete extraction from the bowels and rational use of minerals and the components contained therein; prevention of harmful influence of mining works related to the use of mineral resources, on the mineral resources conservation; protection of minerals from flooding, fires and other factors that reduce their quality and value; and preservation and improvement of the environment in areas near the location of existing deposits.

Keywords: mineral raw material, turbulent viscosity integral reduction, quasi-point turbulent vortex, optimum motion, stationary viscous rotational motion, hydraulic engineering systems

Стаття надійшла до редакції 30.10. 2018

Рекомендовано до друку д-ром техн. наук Семененком Є.В.