

УДК 621.924.93

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ ВОДОВУГІЛЬНОГО ПАЛИВА В ТРУБОПРОВОДІ

Чернецька-Білецька Н.Б., Роговий А.С., Баранов І.О., Мірошникова М.В.

MATHEMATICAL MODELING MOVEMENT OF WATER-COAL FUEL IN PIPELINE

Chernetskaya-Beletskaya N., Rogovyi A., Baranov I., Miroshnykova M.

Встановлені найбільш перспективні напрямки розвитку вугільних технологій в Україні. Визначені найбільш вагомі чинники, які впливають ефективність транспортування водовугільного палива. Виконано аналіз вітчизняного та закордонного досвіду розробки методів визначення енерговитрат при транспортуванні водовугільного палива. Наведено алгоритм розробки математичної моделі просторової тривимірної течії неньютонівської рідини, що дозволяє визначати гідравлічні параметри транспортування водовугільного палива в промислових гідротранспортних системах з урахуванням реологічних властивостей, режимів течії і гранулометричного складу. Запропонована математична модель турбулентності (SST-модель Ментера) яка дозволяє визначати гідродинамічні параметри транспортування водовугільного палива в широкому діапазоні режимів течії та має низький рівень похибки розрахунків. Для кращої геометрії розрахункової області використана адаптивна локально здрібнена сітка.
Ключові слова: водовугільне паливо, транспортування, моделювання, гранулометричний склад, реологічні властивості, втрати тиску.

Вступ. Найбільш перспективним напрямком розвитку вугільних технологій в Україні, є використання водовугільного палива (ВВП) в якості альтернативного виду палива для потреб теплоенергетичного комплексу України. Низька ефективність попередніх впроваджених заходів практичної спрямованості пояснюється не тільки їх недостатньою організаційно-управлінською компонентою, а й необхідністю більш поглиблених досліджень ВВП як теоретичного так і емпіричного характеру [1].

Розширення сфери використання ВВП як ефективної вугільної технології викликає необхідність удосконалення технологій його приготування для зменшення енерговитрат в розрахунку одиницю продукту і транспортування для зменшення витрат на перекачування по трубопроводу і спрощення наосного обладнання.

Постановка проблеми. Численні теоретичні та експериментальні дослідження транспортування ВВП показали, що на параметри енергоефективності

транспортування впливають досить багато чинників, з яких один з основних є гранулометричний склад палива. Дослідження впливу гранулометричного складу на параметри та енергоефективність транспортування потребує значної кількості експериментальних досліджень та постійного змінювання складу, який впливає на реологічні показники. На сьогоднішній день, широке розповсюдження отримало числове вирішення задач руху рідини при розумних витратах часу на розрахунок. Таким чином, з'явилася можливість зменшити кількість експериментальних досліджень за рахунок заміни частини найбільш коштовних експериментальних досліджень теоретичними числовими. Для цього необхідно, в першу чергу, провести валідацію математичних моделей з метою отримання якнайменшого розходження між результатами математичного моделювання та експериментальних досліджень [1, 2]. Після отримання найменших похибок розрахунку моделей течій необхідно вказати діапазон, в якому ці моделі мають достатню точність, та підкреслити в якому діапазоні параметрів отримані результати та висновки будуть мати чинність.

Для ньютонівських рідин за останні роки проведено велику кількість різноманітних досліджень щодо визначення найкращих, за помилками, моделей практично для усіх параметрів та геометрії течії, та ці роботи безупинно проводяться в даний час. На відміну від ньютонівських рідин для неньютонівських, визначення моделей значно більш складне за рахунок впливу додаткового чинника, такого як змінення в'язкості за реологічним законом. Для цих рідин проводиться значно менша кількість досліджень із допомогою програмних комплексів CFD, та наявність досить великої кількості реологічних моделей призводить до того, що для конкретної реологічної моделі та конкретних параметрів гранулометричного складу практично не проводилося досліджень числового вирішення рівнянь руху.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

В даний час накопичено великий досвід, створена наукова база і розроблені методи для визначення енерговитрат при транспортуванні ВВП. Значний внесок у створення науково-методичного забезпечення та вирішення зазначених завдань внесли роботи зарубіжних вчених EERC у США, Cape Breton Development Corporation в Канаді, Snamprogetti в Італії, Salzgitter у Німеччині, AB Carbogel у Швеції, Elfsolaize у Франції, Japan COM, JGC та Nissho Iwai Coal Corp. в Японії, Janji CWM Corp. у Китаї, ФГАОУ ВПО, ЗАО НПП «Сибзекотехника», СФУ у Росії. Вагомий внесок у розвиток ВУТ-технологій в Україні внесли вчені ІТМ НАН України, ДНТУ, НВО «Хаймек», СЧУ ім. В. Даля, ІВЕ НАН України, УкрНДГідровугілля, ІНФОУ НАН України та ІК-ХІХВ НАН України та інші.

Вирішенню питань зниження гідравлічного опору при транспортуванні ВВП промисловим гідротранспортом присвячені роботи вчених Білецького В.С., Брагіна Б.Ф., Власова Ю.Ф., Крутя О.А., Мурко В.І., Світлого Ю.Г., Семененко Є.В., Сергєєва П.В. та інших. Основи сучасних методів розрахунку параметрів транспортування неньютоновських рідин трубопроводами закладені Алієвим Р.А., Бібіком Е.Е., Губіним В.С., Дмитрієвим Г.П., Лойцяньський Л.Г., Рабіновичем Е.З., Смолдирєвим А.Е., Трайніс В.В., Урьєвим Н.Б., Яхно О.М. та іншими.

Мета статті. Метою роботи є розробка математичної моделі просторової тривимірної течії неньютоновської рідини, що дозволяє визначити гідравлічні параметри транспортування водовугільного палива в промислових гідротранспортних системах з урахуванням реологічних властивостей, режимів течії і гранулометричного складу.

Результати досліджень. Розрахунки на математичних моделях процесів, що відбуваються під час транспортування водовугільного палива у трубопроводі та різноманітних елементах гідросистем дозволяють скоротити час на удосконалення методик розрахунку параметрів гідротранспортування та отримати найбільш точні характеристики систем із окресленням меж їх використання. Тому математичне моделювання є однією з найважливіших й актуальних задач дослідження руху висококонцентрованого водовугільного палива [3].

Для опису поведінки рідини запишемо теорему про зміну головного вектора кількості руху системи. Ця теорема формулює зв'язок індивідуальної похідної від головного вектора кількості руху «рідкого» об'єму з головним вектором зовнішніх об'ємних та поверхневих сил, що прикладені до частинок рідини, які розташовані відповідно в об'ємі та на поверхні, що його обмежує [4]:

$$\frac{d\bar{V}}{dt} = \bar{F} + \frac{1}{\rho} \text{Div}T. \quad (1)$$

Де \bar{V} – вектор швидкості; \bar{F} – вектор масових сил; ρ – густина середовища; t – час.

Тензор напружень:

$$T \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} \end{pmatrix}.$$

В декартових координатах система рівнянь записується в такий спосіб:

$$\left\{ \begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial V_1}{\partial t} + V_1 \frac{\partial V_1}{\partial x_1} + V_2 \frac{\partial V_1}{\partial x_2} + V_3 \frac{\partial V_1}{\partial x_3} \right) &= \\ &= \rho F_1 + \frac{\partial p_{11}}{\partial x_1} + \frac{\partial p_{21}}{\partial x_2} + \frac{\partial p_{31}}{\partial x_3}, \\ \rho \left(\frac{\partial V_2}{\partial t} + V_1 \frac{\partial V_2}{\partial x_1} + V_2 \frac{\partial V_2}{\partial x_2} + V_3 \frac{\partial V_2}{\partial x_3} \right) &= \\ &= \rho F_2 + \frac{\partial p_{12}}{\partial x_1} + \frac{\partial p_{22}}{\partial x_2} + \frac{\partial p_{32}}{\partial x_3}, \\ \rho \left(\frac{\partial V_3}{\partial t} + V_1 \frac{\partial V_3}{\partial x_1} + V_2 \frac{\partial V_3}{\partial x_2} + V_3 \frac{\partial V_3}{\partial x_3} \right) &= \\ &= \rho F_3 + \frac{\partial p_{13}}{\partial x_1} + \frac{\partial p_{23}}{\partial x_2} + \frac{\partial p_{33}}{\partial x_3}. \end{aligned} \right. \quad (2)$$

Система рівнянь (2.2) у більш компактній індексній за правилом Ейнштейна, формі має наступний вигляд [4]:

$$\rho \left(\frac{\partial V_i}{\partial t} + V_k \frac{\partial V_i}{\partial x_k} \right) = \rho F_i + \frac{\partial p_{ki}}{\partial x_k} \quad (3)$$

($i, k = 1, 2, 3$; підсумовування за k), (3)

де V_i, V_k – проекції складової вектора швидкості на осі координат; F_i – проекції вектора масових сил на осі координат; p_{ki} – елементи тензору напружень T .

Залежність між компонентами тензорів напружень та швидкостей деформації характеризує реологічний закон досліджуваної рідини. За результатами досліджень реологічного закону водовугільного палива отримано, що воно, за відповідною концентрацією твердої фази, відноситься до в'язкопластичних (бінгамівських) рідин. Тоді компоненти тангенціальних напружень

$$p_{ik} = 2 \left(\eta + \frac{\tau_0}{H} \right) S_{ik}, \quad i \neq k, \quad (4)$$

де

$$H = \left[\left(\frac{\partial V_1}{\partial x_2} + \frac{\partial V_2}{\partial x_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial V_1}{\partial x_3} + \frac{\partial V_3}{\partial x_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial V_2}{\partial x_3} + \frac{\partial V_3}{\partial x_2} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial V_1}{\partial x_1} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial V_2}{\partial x_2} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial V_3}{\partial x_3} \right)^2 \right]^{0,5} \quad (5)$$

Складові тензора швидкостей деформацій S записуються наступним чином

$$S_{ik} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_i}{\partial x_k} + \frac{\partial V_k}{\partial x_i} \right). \quad (6)$$

З урахуванням реологічного закону для в'язкопластичних рідин, для тривимірного руху, залежність між елементами тензорів в узагальненому вигляді формулюється наступним чином:

$$\begin{aligned} p_{11} &= -p + 2 \left(\eta + \frac{\tau_o}{H} \right) \frac{\partial V_1}{\partial x_1} - \frac{2}{3} \left(\eta + \frac{\tau_o}{H} \right) \operatorname{div} \bar{V}; \\ p_{22} &= -p + 2 \left(\eta + \frac{\tau_o}{H} \right) \frac{\partial V_2}{\partial x_2} - \frac{2}{3} \left(\eta + \frac{\tau_o}{H} \right) \operatorname{div} \bar{V}; \\ p_{33} &= -p + 2 \left(\eta + \frac{\tau_o}{H} \right) \frac{\partial V_3}{\partial x_3} - \frac{2}{3} \left(\eta + \frac{\tau_o}{H} \right) \operatorname{div} \bar{V}; \\ p_{12} &= p_{21} = \left(\eta + \frac{\tau_o}{H} \right) \left(\frac{\partial V_2}{\partial x_1} + \frac{\partial V_1}{\partial x_2} \right); \\ p_{13} &= p_{31} = \left(\eta + \frac{\tau_o}{H} \right) \left(\frac{\partial V_3}{\partial x_1} + \frac{\partial V_1}{\partial x_3} \right); \\ p_{23} &= p_{32} = \left(\eta + \frac{\tau_o}{H} \right) \left(\frac{\partial V_3}{\partial x_2} + \frac{\partial V_2}{\partial x_3} \right); \end{aligned}$$

Для замикання математичної моделі до рівнянь руху необхідно додати рівняння нерозривності.

Водовугільне паливо можна вважати нестисливою рідиною [4], тоді маємо

$$\operatorname{div} \bar{V} = 0,$$

або

$$\frac{\partial V_1}{\partial x_1} + \frac{\partial V_2}{\partial x_2} + \frac{\partial V_3}{\partial x_3} = 0. \quad (7)$$

У найбільш поширеному, турбулентному русі рідини, на сьогоднішній день, за недостатністю комп'ютерних ресурсів для прямого моделювання рівнянь, які є нелінійними диференціальними рівняннями в частинних похідних другого порядку [4], використовують їх осереднення за Рейнольдсом [4-6]. Запишемо теорему про зміну головного вектора кількості руху системи враховуючи осереднення та опускаючи знаки осереднення в подальшому:

$$\begin{cases} \frac{\partial \bar{V}}{\partial t} + (\bar{V} \cdot \nabla) \bar{V} = \bar{F} - \frac{1}{\rho} \overline{\operatorname{grad} p} + \frac{1}{\rho} \overline{\operatorname{Div}(T_M + T_T)}; \\ \operatorname{div} \bar{V} = 0. \end{cases} \quad (8)$$

де T_M і T_T – молекулярна та турбулентна складові тензору в'язких напружень.

Величини молекулярних складових тензору напружень визначають згідно реологічної моделі в'язкопластичної рідини:

$$T_M = 2 \left(\eta + \frac{\tau_o}{H} \right) S, \quad (9)$$

Система рівнянь (8) є незамкнутою оскільки зв'язок між турбулентними складовими тензора напружень T_T з параметрами осередненої течії невідомо й повинна визначатися за допомогою додаткових співвідношень, тобто моделлю турбулентності. Якщо використовують лінійну модель турбулентності, наприклад SST-модель Ментера, припускають виконання узагальненої гіпотези Бусінеска [7]:

$$T_T = 2\mu_t S + \frac{2}{3} kE, \quad (10)$$

де μ_t – турбулентна в'язкість; k – кінетична енергія турбулентності,

$$k = \frac{1}{2} (V_1'^2 + V_2'^2 + V_3'^2), \quad (11)$$

$$E_{ij} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \text{ – тензорна одиниця.}$$

Наведені вище рівняння є загальними для розрахунку турбулентної течії. Якщо течія ламінарна, то ці рівняння значно спрощуються та немає необхідності розрахунку пульсаційних компонент або використання моделей турбулентності. Для визначення режиму руху в'язкопластичної рідини обчислюють відповідне число Рейнольдса за наступною формулою [6]:

$$\operatorname{Re}^* = \frac{\rho V d}{\eta \left(1 + \frac{\tau_o d}{\eta V} \right)}. \quad (12)$$

У подальшому верхній індекс * записувати не будемо, але мова буде йти саме про відповідне для в'язкопластичної рідини число Рейнольдса.

У більшості випадків геометрична форма проточної частини характеризується великою кількістю змінень площі поперечного перетину, і задалегідь не відомо який тип течії існує. Особливо невизначеність проявляється під час поворотів та проходження елементів зі звуженням проточного перетину, де можуть локально з'являтися числа Рейнольдсу, що відповідають турбулентному рухові рідини. Таким чином, надалі будемо записувати рівняння, які відповідають загальному випадку турбулентної течії рідини.

За допомогою рівнянь переносу характеристик турбулентності можливо описати зміну в часі й просторі кінетичної енергії турбулентності й питомої швидкості її дисипації [7-9]:

$$\begin{cases} \frac{\partial k}{\partial t} + V_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = P_k - \beta^* k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + \sigma_{k1} v_T) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]; \\ \frac{\partial \omega}{\partial t} + V_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \alpha \Omega^2 - \beta \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + \sigma_{\omega 1} v_T) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \\ + 2(1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, \end{cases} \quad (13)$$

де V_j – компоненти швидкості; P_k – генераційний турбулентний член; F_1 – емпірична функція; $CD_{k\omega}$ – позитивна частина перехресних дифузійних членів [10, 11].

В роботі математичне моделювання проводилося при таких значеннях констант моделі: $\sigma_{k1} = 0,85$; $\sigma_{k2} = 1$; $\sigma_{\omega 1} = 0,5$; $\sigma_{\omega 2} = 0,856$; $\alpha_1 = 5/9$; $\alpha_2 = 0,44$; $\beta_1 = 3/40$; $\beta_2 = 0,0828$, обумовлених рівнянням $\phi = \phi_1 F_1 + \phi_2 (1 - F_1)$ [8].

Перевагами даної моделі турбулентності є нечутливість до граничних умов у зовнішньому потоці та врахування впливу структури турбулентності з боку шарів рідини, розташованих вище за течією [7].

Параметри τ_0 , η – початкова напруга зсуву та структурна в'язкість завдавалися програмно за результатами експериментальних досліджень щодо реологічних параметрів водовугільного палива.

Застосовувалися універсальні «жорсткі» граничні умови, що дозволяють розрахувати поле течії.

На твердих стінках, враховуючи прилипання рідини, приймалася наступна гранична умова:

$$\bar{V}|_b = 0.$$

У вхідному перетині каналу задавалася вхідна швидкість:

$$V|_b = V_{in}.$$

У вихідному перетині каналу рівність нулю статичного тиску:

$$p|_b = 0.$$

Для характеристик турбулентності на твердій поверхні прийняті такі граничні умови [12]. Рівність нулю потоку кінетичної енергії турбулентності: $Fk = 0$.

Питома швидкість дисипації енергії турбулентності на твердій стінці розраховувалася за залежністю [12]:

$$\omega = 10 \frac{6\nu}{\beta_1 (\Delta y)^2},$$

де Δy – прилежувальний крок.

У вхідному перетині каналу питому швидкість дисипації розраховували за залежністю:

$$\omega_{\infty} = (1 \rightarrow 10) \frac{V}{L_{\infty}},$$

де L_{∞} – орієнтовна довжина розрахункової області.

У вхідному перетині кінетична енергія турбулентності розраховували на основі вихрової в'язкості:

$$k_{\infty} = v_{t\infty} \omega_{\infty},$$

де $v_{t\infty} = 10^{-(2 \rightarrow 5)} \nu$ – вихрова в'язкість у вхідному перетині.

Для кращого рішення малих деталей геометрії розрахункової області й в області високих градієнтів параметрів розрахункових змінних використана адаптивна локально здрібнена сітка. Апроксимація розрахункової змінної виконана як схема реконструкції, що має підвищений порядок точності [12].

Розрахунок течії водовугільного палива каналом на запропонованій математичній моделі, займає тривалий проміжок часу, що становить приблизно 3 години при використанні персонального комп'ютера середньої потужності (CPU 5200 MHz, RAM 8192 Mb), що говорить про складність процесів, описуваних нею й необхідності використання потужної комп'ютерної техніки для розрахунку течії, особливо під час складних елементів звуження потоків або поворотів.

Висновок. В роботі були встановлені найбільш перспективні напрямки розвитку вугільних технологій в Україні. Визначені найбільш вагомими чинниками, які впливають на ефективність транспортування водовугільного палива. Виконано аналіз вітчизняного та закордонного досвіду розробки методів визначення енерговитрат при транспортуванні водовугільного палива.

На підставі запропонованої теорії наведено алгоритм розробки математичної моделі просторової тривимірної течії неньютонової рідини, що дозволила визначати гідравлічні параметри транспортування водовугільного палива в промислових гідротранспортних системах з урахуванням реологічних властивостей, режимів течії і гранулометричного складу. Запропонована математична модель турбулентності (SST-модель Ментера) дозволила визначити гідродинамічні параметри транспортування водовугільного палива в широкому діапазоні режимів течії, при цьому мала низький рівень похибки розрахунків. Для кращої геометрії розрахункової області в роботі була використана адаптивна локально

здрібнена сітка на основі гексагональних елементів, що дозволило отримати задовільні результати розрахунків.

Література

1. Rogovyi A.S. Verification of Fluid Flow Calculation in Vortex Chamber Superchargers/ A.S. Rogovyi // Автомобильный транспорт: сб. науч. тр. / МОН Украины, ХНАДУ. – Харьков, 2016. – Вып. 39. – С. 39-46.
2. Сємин Д.А. Верификация расчетов течений в вихрекамерных устройствах. / Сємин Д.А., Роговой А.С., Левашов А.М., Левашов Я.М. // Вісник НТУУ "КПІ". Сер. Машинобудування, 2016. – № 2 (77). – С. 71-78.
3. Роуч П. Вычислительная гидродинамика: Пер. с англ. /П. Роуч. – М.: Мир, 1981.- 612 с.
4. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. /Л.Г. Лойцянский. – М.:Наука, 1978. – 736 с.
5. Емцев Б.Т. Техническая гидромеханика. /Б.Т. Емцев. – М.: Машиностроение, 1987. - 440 с.
6. Андерсон Д. Вычислительная гидромеханика и теплообмен: В 2-х т. Т. 1: Пер. с англ. / Д. Андерсон, Дж. Таннехилл, Р. Плетчер. – М.: Мир, 1990.- 384 с.
7. Гарбарук А.В. Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений: учебное пособие / А.В. Гарбарук, М.Х. Стрелец, М.Л. Шур – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 88 с.
8. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости: Пер. с англ. /С. Патанкар. – М.: Энергоатомиздат, 1984.- 152 с.
9. Shur, M. L. A hybrid RANS-LES approach with delayed-DES and wall-modelled LES capabilities /Shur, M. L., Spalart, P. R., Strelets, M. K., & Travin, A. K.// International Journal of Heat and Fluid Flow, 2008. – 29(6), – P. 1638-1649.
10. Rogovyi A. Use of detached-eddy simulation method (DES) in calculations of the swirled flows in vortex apparatuses /A.Rogovyi// Teka Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa. – 2016. – Vol. 16, No. 3. – P. 57-62.
11. Stephens D.W. Turbulence model analysis of flow inside a hydrocyclone /Stephens D. W., Mohanaragam K.//Progress in Computational Fluid Dynamics, an International Journal. – 2010. – Vol. 10. – №. 5-6. – P. 366-373.
12. Nazukin V. A. CFD Analysis of Swirling Flows in Premixers /V. Nazukin, V.Avgustinovich//ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition. – American Society of Mechanical Engineers, 2014. – P. V04AT04A051-V04AT04A051.

References

1. Rogovyi A.S. Verification of Fluid Flow Calculation in Vortex Chamber Superchargers/ A.S. Rogovyi // Автомобильный транспорт: сб. науч. тр. / МОН Украины, ХНАДУ. – Харьков, 2016. – Вып. 39. – С. 39-46.
2. Sjomin D.A. Verifikacija raschetov techenij v vikhrekamernyh ustrojstvah. / Sjomin D.A., Rogovoj A.S., Levashov A.M., Levashov Ja.M. // Visnik NTUU "KPI". Ser. Mashinobuduvannja, 2016. – № 2 (77). – С. 71-78.
3. Rouch P. Vychislitel'naja gidrodinamika: Per. s angl. /P. Rouch. – М.: Мир, 1981.- 612 с.
4. Lojczanski L.G. Mehanika zhidkosti i gaza. /L.G. Lojczanski. – М.:Наука, 1978. – 736 с.
5. Emcev B.T. Tehnicheskaja gidromehanika. /B.T. Emcev. – М.: Mashinostroenie, 1987. - 440 с.

6. Anderson D. Vychislitel'naja gidromehanika i teplobmen: V 2-h t. T. 1: Per. s angl. / D. Anderson, Dzh. Tannehill, R. Pletcher. – М.: Мир, 1990.- 384 s.
7. Garbaruk A.V. Modelirovanie turbulentsnosti v ras-chetah slozhnyh techenij: uchebnoe posobie / A.V. Gar-baruk, M.H. Strelec, M.L. Shur – SPb: Izd-vo Poli-tehn. un-ta, 2012. – 88 s.
8. Patankar S. Chislennye metody reshenija zadach teplobmena i dinamiki zhidkosti: Per. s angl. /S. Patankar. – М.: Jenergoatomizdat, 1984.- 152 s.
9. Shur, M. L. A hybrid RANS-LES approach with delayed-DES and wall-modelled LES capabilities /Shur, M. L., Spalart, P. R., Strelets, M. K., & Travin, A. K.// International Journal of Heat and Fluid Flow, 2008. – 29(6), – P. 1638-1649.
10. Rogovyi A. Use of detached-eddy simulation method (DES) in calculations of the swirled flows in vortex apparatuses /A.Rogovyi// Teka Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa. – 2016. – Vol. 16, No. 3. – P. 57-62.
11. Stephens D.W. Turbulence model analysis of flow inside a hydrocyclone /Stephens D. W., Mohanaragam K.//Progress in Computational Fluid Dynamics, an International Journal. – 2010. – Vol. 10. – №. 5-6. – P. 366-373.
12. Nazukin V. A. CFD Analysis of Swirling Flows in Premixers /V. Nazukin, V.Avgustinovich//ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition. – American Society of Mechanical Engineers, 2014. – P. V04AT04A051-V04AT04A051.

Чернецька-Білецька Н.Б., Роговий А.С., Баранов І.О., Мірошнікова М.В. Математичне моделювання руху водовугільного палива в трубопроводі.

Встановлені найбільш перспективні напрямки розвитку вугільних технологій в Україні. Визначені найбільш вагомі чинники, які впливають ефективність транспортування водовугільного палива. Виконано аналіз вітчизняного та закордонного досвіду розробки методів визначення енерговитрат при транспортуванні водовугільного палива. Наведено алгоритм розробки математичної моделі просторової тривимірної течії ньютонівської рідини, що дозволяє визначати гідравлічні параметри транспортування водовугільного палива в промислових гідротранспортних системах з урахуванням реологічних властивостей, режимів течії і гранулометричного складу. Запропонована математична модель турбулентності (SST-модель Ментера) яка дозволяє визначати гідродинамічні параметри транспортування водовугільного палива в широкому діапазоні режимів течії та має низький рівень похибки розрахунків. Для кращої геометрії розрахункової області використана адаптивна локально здрібнена сітка.

Ключові слова: водовугільне паливо, транспортування, моделювання, гранулометричний склад, реологічні властивості, втрати тиску.

Chernetskaya-Beletskaya N., Rogovyi A., Baranov I., Miroshnykova M. Mathematical modeling movement of water-coal fuel in pipeline.

The most perspective directions development of coal technologies in Ukraine are established. The most important factors that influence efficiency transportation coal-fired fuel are determined. An analysis domestic and foreign experience in the development methods for determining energy consumption during transport of water-coal fuel has been made. An al-

gorithm for developing a mathematical model three-dimensional flow non-Newtonian fluid, which allows to determine the hydraulic parameters of transporting water-coal fuel in industrial hydrotransport systems, taking into account rheological properties, flow regimes and granulometric composition. It is proposed mathematical model turbulence (SST-model of Menter) which allows determine hydrodynamic parameter transport of water-coal fuel in wide range flow regimes and has low level calculations. For better geometry calculated area, an adaptive locally gridded grid is used.

In the most common, turbulent motion fluid, due to lack computer resources for direct modeling equations, which are nonlinear differential equations in partial second order derivatives, they use averaging over Reynolds.

Calculations mathematical models processes occurring during transportation of coal-fired fuel in pipeline and various elements hydrotransport systems can reduce time improve methods of calculating parameters hydrotransport and obtain most accurate characteristics systems with delineation limits of their use.

Keywords: water-coal fuel, transportation, modeling, granulometric composition, rheological property, pressure loss.

Чернецька-Білецька Н.Б. – д.т.н., проф., зав. кафедри «Логістичне управління та безпека руху на транспорті» СХУ ім. В. Даля.

Роговий А.С. – д.т.н., проф. кафедри «Логістичне управління та безпека руху на транспорті» СХУ ім. В. Даля.

Баранов І.О. – старший викладач кафедри «Логістичне управління та безпека руху на транспорті» СХУ ім. В. Даля. mail: baranov_90@ukr.net

Мірошникова М.В. - асистент кафедри «Логістичне управління та безпека руху на транспорті» СХУ ім. В. Даля.

Рецензент: д.т.н., проф. **Марченко Д.М.**

Стаття подана 08.12.2017.