

УДК 621.924.93

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОСТОРОВОЇ ТРИВИМІРНОЇ ТЕЧІЇ ВОДОВУГІЛЬНОГО ПАЛИВА

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

MATHEMATICAL MODEL SPATIAL THREE-DIMENSIONAL COURSE OF WATER-COAL FUELS

Chernetska–Biletska N., Rogovyi A., Baranov I., Miroshnykova M.

В статті була розроблена математична модель просторової тривимірної течії водовугільного палива (ВВП), що дозволяє на відміну від існуючих моделей турбулентності SST визначити гідравлічні параметри транспортування ВВП в промислових гідротранспортних системах з урахуванням реологічних властивостей, режимів течії і гранулометричного складу. Для рішення поставленої задачі використано методи обчислювальної гідродинаміки – метод кінцевих об'ємів (FVM). Для виконання розрахунків гідравлічних параметрів транспортування ВВП була побудована тривимірна модель експериментальної установки. Виконано порівняння точності визначення втрат тиску за різними моделями. Встановлено, що найбільшу помилку має розрахунок течії без урахування реологічного закону, тобто течії ньютонівської рідини з тією ж в'язкістю. Встановлено, що найменшу помилку має ламінарна модель та SST-модель, з урахуванням реологічного закону. Результати числових розрахунків якісно добре збігаються з аналітичним описом бінгамівської течії та з результатами експериментальних досліджень.

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

Вступ. Розширення сфери використання водовугільного палива (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 насосного обладнання.

Найбільш перспективним напрямком розвитку вугільних технологій в Україні, є використання 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 до-

сліджень ВВП як теоретичного так і емпіричного характеру [1].

Постановка проблеми. Виконані теоретичні та експериментальні дослідження транспортування ВВП показали, що на параметри транспортування впливають досить багато чинників, з яких один з основних є гранулометричний склад палива. Дослідження впливу гранулометричного складу на енергоефективність транспортування потребує значної кількості експериментальних досліджень та постійного змінювання складу, який впливає на реологічні показники. Широке розповсюдження отримало числове вирішення задач руху ВВП 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 провести валідацію математичних моделей з метою отримання якнайменшого розходження між результатами математичного моделювання та експериментальних досліджень [1, 2]. Після отримання найменших похибок розрахунку моделей течії 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 [3]. 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 [4]. 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 [5, 6].

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, АВ Carbogel у Швеції, Elfsolaize у Франції, Japan COM, JGC та Nissho Iwai Coal Corp. в Японії, Janri CWM Corp. у Китаї, ФГАОУ ВПО, ЗАО НПП «Сибэкотехника», СФУ у Росії. Вагомий внесок у розвиток ВУТ-технологій в Україні внесли вчені ІГТМ НАН України, ДНТУ, НВО «Хаймек», СЧУ ім. В. Даля, ІВЕ НАН України, УкрНДДГідровугілля, 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., Смолдиревим А.Е., Трайніс В.В., Урьєвим Н.Б., Яхно О.М. та іншими.

Мета статті. В роботі набула подальший розвиток математична модель просторової тривимірної течії ВВП, що дозволяє на відміну від існуючих моделей турбулентності SST визначити гідравлічні параметри транспортування ВВП в промислових гідротранспортних системах з урахуванням реологічних властивостей, режимів течії і гранулометричного складу.

Основний зміст. Для рішення поставленої задачі використано методи обчислювальної гідродинаміки – метод кінцевих об'ємів (FVM). Сутність метода складається з наступного: обирається деяка замкнута область течії рідини, для якої виробляється пошук полів макроскопічних величин (наприклад, швидкості, тиску), що описують стан середовища в часі й задовольняючих певним законам, сформульованим математично [7, 8]. Найбільш використовуваними є закони збереження в ейлерових змінних: для будь-якої величини ϕ , у кожній точці $O(x, y, z, t)$ простору, оточеного деяким замкнутим кінцевим об'ємом, у момент часу t існує наступна залежність: загальна кількість величини ϕ в об'ємі може змінюватися за рахунок наступних факторів:

- транспорт кількості цієї величини через поверхню, що обмежує контрольний об'єм – потік;

- генерація (знищення) деякої кількості величини ϕ усередині контрольного об'єму – джерело (стік).

Під контрольним об'ємом розуміється деякий замкнутий елементарний об'єм dW , обмежений поверхнею dS .

У свою чергу, потік величини ϕ через границю dS може бути розбитий на дві складові:

- конвекційна – рух разом із середовищем;
- дифузійна – обумовлена хаотичним рухом у середовищі (наприклад, турбулентним).

Математично це може бути представлено в такий спосіб:

$$\underbrace{\frac{\partial \rho \phi}{\partial t}}_{\text{похідна за часом}} + \underbrace{\bar{\nabla} \cdot (\rho \bar{V} \phi)}_{\text{конвекційний член}} - \underbrace{\bar{\nabla} \cdot (\Gamma_{\phi} \bar{\nabla} \phi)}_{\text{дифузійний член}} = \underbrace{S_{\phi}(\phi)}_{\text{джерело}}$$

Оскільки одержати точне рішення рівнянь гідромеханіки не завжди можливо, то використовується процедура дискретизації. Метою дискретизації є трансформація системи диференціальних рівнянь у частинних похідних у відповідну систему алгебраїчних рівнянь [9, 10]. Результатом рішення алгебраїчної системи є множина значень, що відповідає точному рішенню системи в деяких, наперед заданих, точках у просторі й часі. У результаті дискретизації розрахункової області виходить числовий опис простору, що моделюється – розрахункова сітка. Розрахункова сітка містить у собі точки, в яких виробляється пошук рішення та опис границь. У випадку нестационарних задач, часова вісь також розбивається на кінцеве число інтервалів. Під час використання методу кінцевих об'ємів розкладання основного рівняння виробляється на складові, що впливають на сумарний баланс деякої величини. Метод кінцевих об'ємів є найбільш поширеним та найбільш популярним внаслідок того, що він дозволяє суворо дотримуватися законів збереження та основні поняття методу прямо відповідають фізичним величинам.

Крім дискретизації розрахункової області необхідно також розглянути загальну методіку дискретизації основних рівнянь. Тому що при побудові диференціального рівняння будь-якої величини використовується єдина форма, то розглянемо процес дискретизації методом контрольних об'ємів на прикладі деякої величини ϕ в інтегральному виді:

$$\int_t^{t+\Delta t} \left[\int_{W_p} \frac{\partial \rho \phi}{\partial t} dW + \int_{W_p} \bar{\nabla} \cdot (\rho \bar{V} \phi) dW - \int_{W_p} \bar{\nabla} \cdot (\Gamma_{\phi} \bar{\nabla} \phi) dW \right] = \int_t^{t+\Delta t} \left[\int_{W_p} S_{\phi}(\phi) dW \right]$$

Дискретизація даного рівняння має другий порядок. Відповідно до теореми Гауса,

$$\int_{W_p} \bar{\nabla} * \phi dW = \int_S \bar{dS} * \phi,$$

де * - будь-який тензорний добуток (наприклад, скалярний або векторний). Конвекційний член

$$\int_{W_p} \bar{\nabla} \cdot (\rho \bar{V} \phi) dW = \sum_f F \phi_f,$$

де

$$F = (\bar{S}) \cdot (\rho \cdot \bar{V})_f;$$

дифузійний член

$$\int_{W_p} \bar{\nabla} \cdot (\Gamma \phi \bar{\nabla} \phi) dW = \sum_f \Gamma_f \bar{S}_f \cdot (\bar{\nabla} \phi)_f,$$

джерело

$$\int_{W_p} S_\phi(\phi) dW = SuW_p + SpW_p \phi_p.$$

Похідна за часом: 1-й порядок точності

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{W_p} \rho \phi dW = \frac{(\rho_p \phi_p W)^n - (\rho_p \phi_p W)^0}{\Delta t}.$$

Таким чином:

$$\sum_f F \phi_f - \sum_f \Gamma(S_f) \cdot (\nabla \phi)_f = SuW_p + SpW_p \phi_p.$$

У випадку одновимірної стаціонарної задачі транспорту деякої скалярної величини рівняння перетворюється до виду:

$$\frac{d}{dx}(\rho u A \phi) - \frac{d}{dx} \left(\Gamma A \frac{d}{dx} \phi \right) = S,$$

де u – швидкість; A – площа перетину контрольного об'єму в напрямку x (для одновимірного випадку $A=1$), Γ – коефіцієнт дифузії.

Конвекційний член:

$$\frac{d}{dx}(\phi) = C_e \phi_e - C_w \phi_w,$$

де $C_e = (\rho u A)_e$ – вихідний потік, $C_w = (\rho u A)_w$ – вхідний потік.

Дифузійний член:

$$-\frac{d}{dx} \Gamma \frac{d}{dx} \phi = -[D_e(\phi_e - \phi_p) - D_w(\phi_p - \phi_w)],$$

де $D_e = \left(\frac{\Gamma A}{\Delta x} \right)_e$ та $D_w = \left(\frac{\Gamma A}{\Delta x} \right)_w$ – дифузійні коефіцієнти переносу.

Джерело розбивається на дві складові:

$$S = SuW_p + SpW_p \phi_p = b_p + s_p \phi_p.$$

Для спрощення розглянемо систему рівнянь для нестисливої ньютонівської рідини. Для ньютонівської – змінюється визначення кінематичної в'язкості.

$$\bar{\nabla} \cdot (\bar{V}) = 0,$$

$$\frac{\partial \bar{V}}{\partial t} + \bar{\nabla} \cdot (\bar{V} \bar{V}) - \bar{\nabla} \cdot (\nu \bar{\nabla} \bar{V}) = -\bar{\nabla} p$$

$$a_p \bar{V}_p = \bar{H}(\bar{V}) - \bar{\nabla} p.$$

$$\bar{V}_p = \frac{\bar{H}(\bar{V})}{A} - \frac{1}{A} \bar{\nabla} p$$

при інтерполяції величин \bar{V} і p на границях осередків рівняння здобуває вид:

$$\bar{V}_f = \left(\frac{\bar{H}(\bar{V})}{A} \right)_f - \left(\frac{1}{A} \bar{\nabla} p \right)_f$$

$$\bar{\nabla} \cdot (\bar{V}_f) = \bar{\nabla} \cdot \left(\frac{\bar{H}(\bar{V})}{A} \right)_f - \bar{\nabla} \cdot \left(\frac{1}{A} \bar{\nabla} p \right)_f = 0$$

Одержуємо, що

$$\bar{\nabla} \cdot \left(\frac{\bar{H}(\bar{V})}{A} \right)_f = \bar{\nabla} \cdot \left(\frac{1}{A} \bar{\nabla} p \right)_f$$

Рішення рівняння забезпечує виконання закону збереження маси. Зробивши стандартну процедуру дискретизації рівнянь, одержуємо дискретний аналог системи Нав'є-Стокса:

$$A \bar{V}_p = \bar{H}(\bar{V}) - \sum_f S(p)_f;$$

$$\sum_f S \left[\left(\frac{1}{A} \right) (\bar{\nabla} p)_f \right] = \sum_f S \left(\frac{\bar{H}(\bar{V})}{A} \right)_f.$$

Система рівнянь може бути вирішена одночасно або ітераційно. У більшості програмних продуктів використовуються ітеративні методи, в основному

– це SIMPLE (Semi-Implicit for Pressure-Linked Equations) для стаціонарних задач та PISO (Pressure Implicit with Splitting of Operators) для нестационарних. Суть всіх методів полягає в тому, що спочатку вирішують рівняння збереження імпульсу, користуючись старими значеннями тиску, вирішують рівняння для тиску та потім роблять корекцію поля швидкості відповідно до нових значень поля тиску [11, 12].

Використання вищенаведеної математичної моделі та числових засобів розрахунку можливе лише в спеціалізованому програмному забезпеченні внаслідок складності обчислювальних процедур виключно комп'ютерними засобами. На сьогоднішній день існують досить велика кількість програмних продуктів, що дають можливість розраховувати течії рідин та газів: OpenFoam, Ansys Fluent, Cosmos FlowWorks, Ansys CFX, FlowVision та багато інших. Деякі з цих пакетів є виключно комерційними, деякі такі як OpenFoam є некомерційними з можливістю роботи за ліцензією GPL, що дозволяє вносити в них необхідні зміни (коректування математичних моделей) без втрати ліцензії, а значить і прав на використання (у тому числі, комерційне). Наприклад, програмний пакет Ansys дозволяє не комерційне використання програмних засобів CFX та Fluent при розрахунках течії рідин з обмеженням на число елементів (до 512 000). Тому що, Ansys є програмним продуктом, який використовують більшість підприємств світу та, внаслідок використання нами гексагональних сіток розміром до 500000 елементів в наших розрахунках течії водовугільного палива, в якості програмного продукту обрано – Ansys CFX з використанням безкоштовної ліцензії Student, чого було достатньо для отримання адекватних результатів.

Для верифікації числових розрахунків були зроблені експериментальні дослідження течії водовугільного палива прямим трубопроводом та знайдено витрати тиску для реалізації заданої витрати або швидкості суміші. Установка для фізичного дослідження включає вимірювальну апаратуру з точністю достатньою для проведення верифікації розрахунків, а потім і для перевірки адекватності. Для числових розрахунків було побудовано тривимірну модель дослідного стенду із дотриманням усіх розмірів (рис. 1.).

На рис. 2. наведено результати розрахунку течії ВВП з наступними параметрами: $V = 0,5$ м/с, $\eta = 0,69$ Па·с, $\tau_0 = 4,63$ Па, $Re = 30$.

Як видно з рис. 2. біля осі труби є зона приблизно однакової швидкості, що якісно співпадає з результатами експериментальних досліджень. Ця зона є стрижневою течією, яка характерна для течії бінгамівських рідин. Таким чином, можна заключити, що результати числових розрахунків якісно добре збігаються з аналітичним описом бінгамівської течії та з результатами експериментальних досліджень. Тому що лінії струму є прямі лінії, а також при перевірці чисел Рейнольдса, можна прийти висновку, що течія є ламінарною. Тому було проведено розра-

хунки та порівняння з експериментальними даними різних моделей: ламінарна, $k - \varepsilon$ та SST-модель.

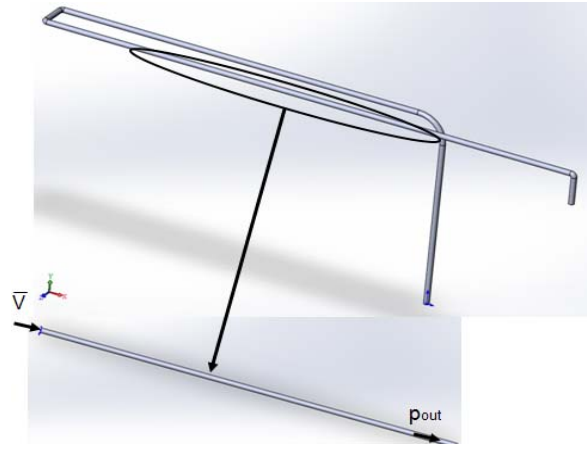


Рис. 1. Тривимірний модель експериментальної установки

Результати розрахунків наведено на рис. 3. На рисунку показано похибку розрахунку втрат тиску у відсотках. Як видно з рисунку найбільшу помилку має розрахунок течії без урахування реологічного закону, тобто течії ньютонівської рідини з тією ж в'язкістю. Найменшу помилку мають ламінарна модель та SST-модель, з урахуванням реологічного закону.

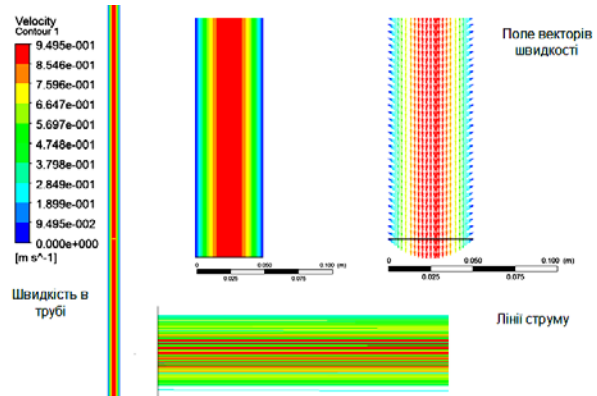


Рис. 2. Результати розрахунку течії водовугільного палива в трубі



Рис. 3. Порівняння точності визначення втрат тиску за різними моделями

Згідно порівняння точності розрахунку особливого значення не має яку саме модель обрати для розрахунку ламінарну чи модель Менгера, але щодо універсальності використання моделі, модель SST є більш універсальною та її можна використати для любых видів течій.

Висновок. В роботі була розроблена математична модель просторової тривимірної течії ВВП, що дозволяє на відміну від існуючих моделей турбулентності SST визначити гідравлічні параметри транспортування ВВП в промислових гідротранспортних системах з урахуванням реологічних властивостей, режимів течії і гранулометричного складу. Для рішення поставленої задачі використано методи обчислювальної гідродинаміки – метод кінцевих об'ємів (FVM). Для виконання розрахунків гідравлічних параметрів транспортування ВВП була побудована тривимірна модель експериментальної установки. Виконано порівняння точності визначення втрат тиску за різними моделями. Встановлено, що найбільшу помилку має розрахунок течії без урахування реологічного закону, тобто течії ньютонівської рідини з тією ж в'язкістю. Найменшу помилку мають ламінарна модель та SST-модель, з урахуванням реологічного закону. Результати числових розрахунків якісно добре збігаються з аналітичним описом бінгамівської течії та з результатами експериментальних досліджень.

Л і т е р а т у р а

- 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.
- Семин Д.А. Верификация расчетов течений в вихрекамерных устройствах. / Семин Д.А., Роговой А.С., Левашов А.М., Левашов Я.М. // Вісник НТУУ "КПІ". Сер. Машинобудування, 2016. – № 2 (77). – С. 71-78.
- Роуч П. Вычислительная гидродинамика: Пер. с англ. /П. Роуч. – М.: Мир, 1981.- 612 с.
- Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. /Л.Г. Лойцянский. – М.:Наука, 1978. – 736 с.
- Емцев Б.Т. Техническая гидромеханика. /Б.Т. Емцев. – М.: Машиностроение, 1987. - 440 с.
- 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.
- 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.
- Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости: Пер. с англ. /С. Патанкар. – М.: Энергоатомиздат, 1984.- 152 с.
- 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.
- 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.

- Stephens D.W. Turbulence model analysis of flow inside a hydrocyclone /Stephens D. W., Mohanarangam K.//Progress in Computational Fluid Dynamics, an International Journal. – 2010. – Vol. 10. – №. 5-6. – P. 366-373.
- 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.

R e f e r e n c e s

- 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.
- Sjomin D.A. Verifikacija raschetov techenij v vihrekamernyh ustrojstvah. / Sjomin D.A., Rogovoy A.S., Levashov A.M., Levashov Ja.M. // Visnik NTUU "KPI". Ser. Mashinobuduvannja, 2016. – № 2 (77). – S. 71-78.
- Rouch P. Vychislitel'naja gidrodinamika: Per. s angl. /P. Rouch. – М.: Mir, 1981.- 612 s.
- Lojczjanskij L.G. Mehanika zhidkosti i gaza. /L.G. Lojczjanskij. – М.:Наука, 1978. – 736 s.
- Emcev B.T. Tehnicheskaja gidromehanika. /B.T. Emcev. – М.: Mashinostroenie, 1987. - 440 s.
- Anderson D. Vychislitel'naja gidromehanika i teplobomen: V 2-h t. T. 1: Per. s angl. / D. Anderson, Dzh. Tannehill, R. Pletcher. – М.: Мир, 1990.- 384 s.
- Garbaruk A.V. Modelirovanie turbulentsnosti v raschetah slozhnyh techenij: uchebnoe posobie / A.V. Gar-baruk, M.H. Strelec, M.L. Shur – Spb: Izd-vo Poli-tehn. un-ta, 2012. – 88 s.
- Patankar S. Chislennye metody reshenija zadach teplobomena i dinamiki zhidkosti: Per. s angl. /S. Patankar. – М.: Jenergoatomizdat, 1984.- 152 s.
- 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.
- 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.
- Stephens D.W. Turbulence model analysis of flow inside a hydrocyclone /Stephens D. W., Mohanarangam K.//Progress in Computational Fluid Dynamics, an International Journal. – 2010. – Vol. 10. – №. 5-6. – P. 366-373.
- 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.

Чернецкая-Белецкая Н.Б., Роговой А.С., Баранов И.О., Мирошникова М.В. Математическая модель пространственного трехмерного течения водоугольного топлива.

В статье была разработана математическая модель пространственного трехмерного течения водоугольного топлива (ВУТ), что позволяет в отличие от существующих моделей турбулентности SST определить гидравлические параметры транспортировки ВУТ в промыш-

шленных гидротранспортных системах с учетом реологических свойств, режимов течения и гранулометрического состава. Для решения поставленной задачи использованы методы вычислительной гидродинамики - метод конечных объемов (FVM). Для выполнения расчетов гидравлических параметров транспортировки ВУТ была построена трехмерная модель экспериментальной установки. Выполнено сравнение точности определения потерь давления по разным моделям. Установлено, что самую большую погрешность имеет расчет течения без учета реологического закона, то есть течения ньютоновской жидкости с той же вязкостью. Установлено, что наименьшую погрешность имеет ламинарная модель и SST-модель, с учетом реологического закона. Результаты численных расчетов качественно совпадают с аналитическим описанием бингамовского течения и результатами экспериментальных исследований.

Ключевые слова: водоугольное топливо, транспортирование, моделирование, гранулометрический состав, реологические свойства, потери давления.

Chernetska-Biletska N., Rogovyi A., Baranov I., Miroshnykova M. Mathematical model spatial three-dimensional course of water-coal fuels.

In the article mathematical model three-dimensional spatial flow of water-coal fuel (WCF) was developed, which, unlike existing models SST turbulence, can determine hydraulic parameters transportation WCF in industrial hydrotransport systems, taking into account rheological properties, flow regimes and granulometric composition. To solve this problem, we used methods computational hydrodynamics - the finite volume method (FVM). A three-dimensional model experimental setup was constructed to perform calculations hydraulic transport parameters WCF. A comparison is made between

accuracy determination pressure losses by different models. It has been established that greatest error in calculating flow without taking into account rheological law, that is flow Newtonian fluid with same viscosity. It is established that slightest error is laminar model and SST-model, taking into account rheological law. The results numerical calculations qualitatively coincide with analytical description of Bingham current and results experimental studies. The use above mathematical model and numerical means calculation is possible only specialized software due complexity computational procedures exclusively by computer means. To date quite number software products that allow to calculate flow fluids and gases: OpenFoam, Ansys Fluent, Cosmos FlowWorks, Ansys CFX, FlowVision and many more.

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.

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

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

Мірошнікова 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 05.03.2018