

УДК 621.924.93

Чернецкая-Белецкая Н.Б. д.т.н., проф., Роговой А.С. д.т.н., доц., Баранов И.О.

ВНУ им. В. Даля. “Восточноукраинский национальный университет имени Владимира Даля”, г. Северодонецк, Украина

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ТРЕХМЕРНОГО ТЕЧЕНИЯ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ SST

*Аннотация* В работе разработана математическая модель пространственного трехмерного течения водоугольного топлива (ВУТ) на основе модели турбулентности SST на основе решения уравнения Навье-Стокса. Предложена теорема об изменении главного вектора количества движения системы. Определены значения потерь давления, расхода и распределения скорости по сечению трубопровода в прямом участке и в повороте. При стационарном расчете траектория течения жидких частиц имеет вид линий течения, которые совпадают с траекториями частиц. Исследования пространственной модели течения ВУТ проводилось на основе сеточной модели трубопровода с использованием гексагональных элементов. Выполнены расчеты скоростей по предложенной модели Бингамовской и Ньютоновской жидкостей при одинаковых значениях эффективной вязкости ВУТ. Установлено, что наиболее приемлемыми для расчета перепада давления при транспортировании ВУТ является модель SST и ламинарная модель Бингамовской жидкости.

*Ключевые слова:* водоугольное топливо, моделирование, гранулометрический состав, потери давления, реология.

Наиболее перспективным направлением развития угольных технологий в Украине, является использование водоугольных суспензий (ВУС) в качестве альтернативного вида топлива для потребностей теплоэнергетического комплекса Украины. Расширение сферы использования водоугольного топлива (ВУТ) как эффективной угольной технологии вызывает необходимость дальнейших исследований, направленных на совершенствование технологий его приготовления для уменьшения энергозатрат на транспортирование.

Опыт эксплуатации промышленных гидротранспортных систем (ПГТС) показал – традиционные подходы к решению задач снижения энергозатрат на транспортирование ВУТ не достаточно эффективны. Проведенные автором предварительные расчеты позволили оценить степень влияния удельных потерь давления при гидротранспортировании ВУТ от соотношения долей фракций и различных концентраций твердой фазы [1]. Анализ полученных предварительных результатов показал: – повышение энергоэффективности ПГТС за счет снижения гидравлического сопротивления может быть достигнуто путем выбора рационального гранулометрического состава ВУТ, обеспечивающего требуемые его реологические свойства [2]; – минимальные значения удельных потерь давления наблюдается в диапазоне концентрации твердой фазы 60%-65% [3].

В работе была разработана математическая модель пространственного трехмерного течения ВУТ на основе модели турбулентности SST на основе решения уравнения Навье-Стокса. Теорема об изменении главного вектора количества движения системы имеет вид:

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

где  $T_M$  и  $T_T$  – молекулярная и турбулентная составляющие тензора вязких напряжений;  $\rho_{ВУТ}$ ;  $\bar{V}$  - вектор скорости потока в данной точке пространства;  $t$  - время;  $\bar{F}$  - вектор массовый сил;  $p$  - гидродинамическое давление.

Усредненные характеристики турбулентности связанные с турбулентной вязкостью следующим соотношением:

$$v_T = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, \Omega F_2)}, \quad (2)$$

где  $k$  – кинетическая энергия турбулентности;  $a_1 = 0,31$  – эмпирический коэффициент;  $\omega$  – удельная (в единице объема) скорость диссипации;  $\Omega$  – абсолютная величина завихренности;  $F_2$  – смесительная функция:

$$F_2 = \tanh \left[ \left[ \max \left( \frac{2\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500v}{y^2 \omega} \right) \right]^2 \right]; \quad \Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right). \quad (3)$$

где  $y$  – расстояние от стенки;  $\beta^*$  – константа, равная 0,075;  $x_j$  – декартовы координаты;  $V_j$  – проекции скорости в декартовой системе координат.

Математическое моделирование проводилось при таких значениях констант модели:  $\sigma_{k1} = 0,85$ ;  $\sigma_{k2} = 1$ ;  $\sigma_{\omega1} = 0,5$ ;  $\sigma_{\omega2} = 0,856$ ;  $\alpha_1 = 5/9$ ;  $\alpha_2 = 0,44$ ;  $\beta_1 = 3/40$ ;  $\beta_2 = 0,0828$ , обусловленных уравнением  $\phi = \phi_1 F_1 + \phi_2 (1 - F_1)$ .

Реологическая модель:

$$v = \left( \frac{\eta}{\rho} + \frac{\tau_0}{\rho H} \right); \quad (4)$$

где  $H$  – скорость сдвига между слоями.

Удельная скорость диссипации энергии турбулентности на твердой стенке рассчитывалась по зависимости:

$$\omega = 10 \frac{6v}{\beta_1 (\Delta y)^2} \quad (5)$$

где  $\Delta y$  – пограничный шаг.

Во входном сечении кинетическая энергия турбулентности определена на основе вихревой вязкости:

$$k_{\infty} = v_{\infty} \omega_{\infty}, \quad (6)$$

где  $v_{\infty} = 10^{-(2 \rightarrow 5)} v$  – вихревая вязкость во входном сечении.

В выходном сечении канала равенство нулю статического давления  $p|_b = 0$ ; на твердых стенках, учитывая прилипания жидкости, принималось граничное условие  $\overline{V}|_b = 0$ .

Исследования пространственной модели течения ВУТ проводилось на основе сеточной модели трубопровода с использованием гексагональных элементов. Расчет проводился с помощью программного продукта ANSYS CFX основу которого составляет Бингамовская модель [4,5]. В результате проведенных расчетов определены значения потерь давления, расхода и распределения скорости по сечению трубопровода в прямом участке и в повороте. При стационарном расчете траектория течения жидких частиц имеет вид линий течения, которые совпадают с траекториями частиц.

По результатам расчета были построены профили распределения скорости течения ВУТ. Для сравнения результатов расчета и подтверждения правильности выбора реологической модели были выполнены расчеты скоростей по предложенной модели

Бингамовской и Ньютоновской жидкостей при одинаковых значениях эффективной вязкости ВУТ ( $\eta = 0,69$ ). Анализ полученных профилей распределения скорости показал, что Бингамовская жидкость имеет стержневое течение вблизи оси трубопровода, что подтверждает корректность выполнения расчетов.

В результате выполнения расчетов было установлено, что наиболее приемлемыми для расчета перепада давления при транспортировании ВУТ является модель SST и ламинарная модель Бингамовской жидкости [6,7]. Данные модели имеют наименьшую погрешность расчетов, что говорит о наибольшей целесообразности использования именно реологической модели. Выбор реологической модели турбулентности SST основывался на ее универсальности и возможности расчета турбулентного потока жидкости, по сравнению с ламинарной моделью, который может возникать на поворотах трубопровода.

### Список литературы

1. *N. Chernetskaya-Beletskaya, O. Guschin, A. Shvornikova, I. Baranov, M. Miroshnikova. Improving industrial pipeline transport using research regularities of flow of mixtures in material pipeline. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies ISSN 1729-3774 "SCOPUS". DOI: 10.15587/1729-4061.2017.106790.*
2. *Чернецкая-Белецкая Н.Б., Баранов И.О., Остапенко В.Н., Мирошникова М.В. Исследование влияния гранулометрического состава водоугольного топлива на его реологические и гидродинамические характеристики. Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, №3 (233), 2017, с. 117-125.*
3. *Чернецька-Білецька Н.Б., Баранов І.О., Мірошникова М.В. Дослідження реологічних характеристик і гідравлічних параметрів транспортування водовугільного палива / Забезпечення сталого розвитку регіону: економічні, управлінські, правові та інформаційно-технічні аспекти : колективна монографія / [П. В. Кривуля, Н. Б. Чернецька-Білецька, С. С. Штапаук та ін.] ; за заг. ред. Ю. І. Ключ., Н. В. Швець. – Сєвєродонецьк : вид-во СНУ ім. В. Даля, 2017. ISBN 978-617-11-0118-0 – 193–212 с.*
4. *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.*
5. *Rogovyi A.S. Verification of Fluid Flow Calculation in Vortex Chamber Superchargers/ A.S. Rogovyi // Автомобильный транспорт: сб. науч. тр. / МОН України, ХНАДУ. – Харьков, 2016. – Вып. 39. – С. 39-46.*
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.*

УДК 536.252:532.527.2

**Бадах В.М. к.т.н., Тарасенко Т.В. к.т.н., Браженко В.М.**

Національний авіаційний університет, м. Київ, Україна

### ВЕРИФІКАЦІЯ ТА ВАЛІДАЦІЯ РОЗРАХУНКОВОЇ МОДЕЛІ ТЕЧІЇ РІДИНИ В ПОВНОПОТОКОВОМУ ГІДРОДИНАМІЧНОМУ ФІЛЬТРІ

В останні роки поширення набуло використання CFD – моделювання для вирішення різних завдань гідрогазодинаміки. Це пов'язано з тим, що натурні випробування витратні, проводяться в обмеженому діапазоні умов і вимагають ретельного контролю впливу параметрів експериментальної установки і вимірювальної апаратури на результат. Але сучасні досягнення обчислювальної техніки та обчислювальної математики дозволяють вирішити досить складні завдання, проте далеко не завжди їх використання дає адекватні результати. Це особливо стосується просторових течій, коли використовуються не повністю адекватні моделі, а для їх чисельного моделювання застосовуються деякі не зовсім обґрунтовані припущення.

Повнопотокові фільтри мають безліч переваг і потенційно можуть бути універсальними пристроями для видалення механічних домішок з різноманітних рідин [1].