

## ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 621.547

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2021.92.1.125

## КАРТИНИ ТЕЧІЇ НЕНЬЮТОНІВСЬКОЇ РІДИНИ У ВИХОРОКАМЕРНИХ НАСОСАХ

Роговий А.С.<sup>1</sup>, Нескорожений А.О.<sup>1</sup><sup>1</sup>Харківський національний автомобільно-дорожній університет

**Анотація.** Проведено дослідження картин течії неньютонівської (бінгамівської) рідини у вихорокамерному насосі на основі математичного моделювання. Модель складена на основі осереднених рівнянь Рейнольдса та SST (Shear Stress Transport) моделі турбулентності. Визначено вплив реологічних параметрів рідини, що перекачується, на кінематичні характеристики течії в насосі. Збільшення в'язкості рідини знижує показники ефективності насоса.

**Ключові слова:** вихорокамерний насос, бінгамівська рідина, реологія, картини течії, неньютонівські середовища.

**Вступ**

В останні роки особливу увагу дослідників привертає можливість отримання енергії завдяки спалюванню різних суспензій на основі вугілля: деревного або кам'яного. Спалювання таких водовугільних сумішей має низку переваг порівняно з класичними видами палив: скорочення викидів шкідливих речовин в атмосферу, диверсифікованість видів палив, економічна й енергетична вигода [1]. Дослідження водовугільних технологій, а також підвищення ефективності транспортування й спалювання водовугільного палива є актуальною проблемою, якою займаються дослідники в багатьох країнах: США, Канаді, Росії, Китаї, Україні, Польщі, Швеції, Німеччині та ін. Уперше ідея спалювання водовугільних сумішей замість нафтопродуктів з'явилася в 70-х рр. минулого століття внаслідок різкого підвищення вартості нафти [2]. Відтоді проведено велику кількість теоретичних й експериментальних досліджень приготування, транспортування й спалювання такого виду палива [3]. Здебільшого ці дослідження присвячені визначенню реологічних параметрів палива [4] й особливостям його згоряння в казанах [5]. Це пов'язано, насамперед, з тим, що параметри вугілля відрізняються один від одного залежно від родовищ [6], що приводить до різних реологічних параметрів і різних особливостей згоряння.

**Аналіз публікацій**

Водовугільна технологія має кілька етапів: приготування, транспортування та спалювання. Вважають, що транспортування

палива залежить здебільшого від його реологічної характеристики, і тому, звичайно, оптимізують склад палива з урахуванням особливостей спалювання [7]. Однак одним з переваг використання водовугільних технологій є саме транспортування за допомогою трубопроводів, що дозволяє знизити витрати на переміщення, підібравши відповідні реологічні параметри рідини й таким чином знизивши витрати на транспортування [8]. Тому що паливо є абразивним середовищем, що містить тверді частинки, то до насосів, які використовують у процесі перекачування подібного середовища, висуваються підвищені вимоги. Це пов'язане з тим, що на подібних середовищах насоси мають низькі показники надійності й довговічності унаслідок швидкого зношування механічних рухливих робочих органів насосів, а також їхніх ущільнень [9]. У більшості випадків використовуються лопатеві насоси й рідше – об'ємні [10]. Однак дослідження струминних апаратів, проведені в останні роки, показують, що під час перекачування середовищ, що містять тверді середовища, згаданий тип насосів цілком конкурентноздатний [11]. Застосування струминної техніки в таких випадках цілком виправдане, оскільки надійність і довговічність струминних насосів на порядок перевищують показники насосів інших типів [12]. Це досягається за рахунок відсутності рухливих механічних органів й ущільнень. Однак досить низький ККД призвів до того, що під час проведення відповідних економічних розрахунків, виявляється, що струминна техніка не часто може конкурувати з іншими насосами. Так, ККД струминних насосів не перевищує 30 % [13].

Останні дослідження, проведені в роботах [14–16], показують, що новий тип струминних апаратів – вихорокамерні нагнітачі – мають більш високі показники ефективності під час перекачування сипних середовищ, порівняно зі звичайними прямоточними струминними насосами. Однак ці дослідження були виконані в процесі перекачування сипних середовищ (вугільний пил) за допомогою повітря. Густина сипного середовища в кілька тисяч разів перевищувала густину активного потоку, що приводило до поліпшення ефективності роботи нагнітача.

Класичні вихрові ежектори не можуть перекачувати абразивні рідини й мають ККД нижчий за 10 % [12, 17, 18]. У роботах [19, 20] проводилися подальші дослідження характеристик нагнітача, удосконалювалася конструкція, описувався вплив різних чинників на характеристики, але не досліджувалася вплив реологічних параметрів рідин, що перекачуються, на ККД насоса. Наскільки нам відомо, у науковій літературі відсутня інформація про перекачування неньютонівських рідин за допомогою вихорокамерних нагнітачів. Метою створення таких нагнітачів було перекачування сумішей у пневматичному й гідравлічному транспорті [11, 12, 20]. Реологічні параметри рідини в процесі транспортування сипних середовищ у суміші з рідиною змінюються в широких діапазонах [21, 22] і впливають на швидке зношування класичних насосів, що знижує ефективність гідравлічного транспорту [23]. Вихорокамерні насоси можуть мати більш високий ККД, ніж інші струминні насоси [24] під час перекачування неньютонівських рідин [19, 20]. Однак їхня робота на таких середовищах ще не вивчена.

#### Мета і постановка завдання

Метою цієї роботи є дослідження характеристик течії неньютонівської рідини на прикладі бінгамівської у вихорокамерному насосі. Прогнозування енергетичних характеристик насоса й визначення картин течії рідин з підвищеною в'язкістю за допомогою CFD (Computational Fluid Dynamics) моделювання дозволить створити вдосконалені струминні насоси для перекачування неньютонівських рідин.

#### Моделювання течії в насосі

Концепція створення вихорокамерного нагнітача основана на використанні позитивних властивостей відцентрового й струмин-

ного насосів. Це реалізується на основі вихрової камери змішання, що дозволяє зберегти ефективну передачу енергії внаслідок дії відцентрової сили за умови забезпечення максимальної надійності й довговічності, що властиво всій струминній техніці. Вихрова камера змішування дозволяє в процесі перекачування використати основні гідродинамічні ефекти оберткових потоків: створення вакууму поблизу осі й надлишкового тиску на периферії. У вихорокамерних насосах роль лопатевого колеса виконує активний потік з параметрами  $(p, Q)_s$ , що подається тангенціально у вихрову камеру змішання (рис. 1).

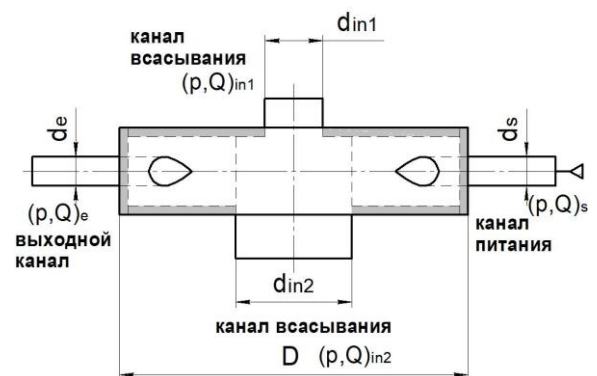


Рис. 1. Розрахункова схема вихорокамерного насоса

Основною проблемою, що виникає в моделюванні вихрових пристроїв за допомогою методів CFD-розрахунків, є трохи занижене значення величини вакууму поблизу осі. Цьому питанню присвячено багато робіт, основним висновком яких є необхідність використання спеціального виправлення до моделей турбулентності, яка б мінімізувала негативний ефект некоректного розрахунку тиску поблизу осі [25]. Помилка розрахунку розподілів швидкостей і тисків значно знижується у використанні методів прямого чисельного моделювання (DNS), методів великих (LES) та відокремлених вихорів (DES). Однак описані методи вимагають або значного зменшення розмірів розрахункової моделі й зниження чисел Рейнольдса, або значного зростання кількості елементів розрахункової області, що вкрай небажано під час проведення розрахунків характеристик насосів, що потребують великої кількості однотипних операцій з мінімальними змінами граничних умов [26]. Отже, у цій роботі застосовувалася модель турбулентності SST, що зарекомендувала себе з найкращого боку

під час дослідження закручених течій у вихрових апаратах. У процесі використання SST-моделі виникають значні помилки у визначенні швидкостей і тисків у певних точках, однак інтегральні параметри визначаються з її допомогою з достатньою точністю. Помилка не перевищує 10 % з використанням виправлення на кривизну ліній струму й обертання потоку [25, 27]. Для вирішення поставленої задачі використалися рівняння Нав'є-Стокса, осереднені за Рейнольдсом (RANS-рівняння – Reynolds-averaged Navier-Stokes), і рівняння нерозривності:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = F_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{\mu_{ef}}{\rho} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right];$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0;$$

де  $x_j$  – координати;  $u_j$  – проекції швидкості в декартовій системі координат;  $\mu_{ef} = \mu + \mu_t$  – ефективна в'язкість;  $\mu_t$  – турбулентна в'язкість;  $\mu$  – молекулярна в'язкість.

Математичну модель виправлення на кривизну ліній струму й кривизну потоку можна знайти в працях [12, 25].

Для уникнення сингулярності реологічних співвідношень бінгамівських пластиків використалася регуляризація в'язкості за умови значень швидкості зсуву між шарами, близьких до нуля [28]. Для цього обрана модель Гершеля-Балклі з виправленням Папанастасіу:

$$\mu = \frac{\mu_B \dot{\gamma}^n + \tau_0 (1 - e^{-m\dot{\gamma}/G})}{\dot{\gamma}},$$

де  $\tau_0$  – початкова напруга зсуву,  $\dot{\gamma}$  – швидкість зсуву між шарами рідини,  $\mu_B$  – структурна (бінгамівська) в'язкість;  $m$  – регуляризаційний параметр, що дорівнює для цього дослідження 1000 внаслідок компромісу між точністю рішення та часом розрахунку;  $G$  – швидкість зсуву між шарами рідини необуреного потоку;  $n=1$  – показник ступеня (індекс течії) для бінгамівського пластику.

Для розрахунку математичної моделі застосовувався пакет прикладних програм OpenFoam [28], що зарекомендував себе як пакет, що нічим не поступається провідним комерційним програмам. На сьогодні в цьому пакеті були проведені розрахунки прак-

тично всіх основних гідродинамічних особливостей різних течій, і можна вважати, що він цілком підходить для одержання точних результатів та є валідованим програмним продуктом. Оскільки течія в нагнітачі є досить складною та, за певних співвідношень вхідних параметрів, може виявляти нестационарні властивості, то розрахунки проводилися в стаціонарній і нестационарній постановках. До того ж контролювалося число Куранта-Фрідріхса-Леві та встановлювалося значення CFL < 0,5. Спочатку проводився стаціонарний розрахунок. Крок за часом задавався величиною  $10^{-5}$  с. Використовувався метод контрольних об'ємів та PISO-алгоритм (Pressure Implicit with Splitting of Operators). Використалися чисельні схеми другого порядку. Розрахунки проводилися до того моменту, поки значення за всіма основними параметрами не досягали значення  $10^{-5}$ . Крім того, другою умовою зупинки розрахунків була незмінність витрат за часом. Критерій сталості витрати обраний величиною 1 %.

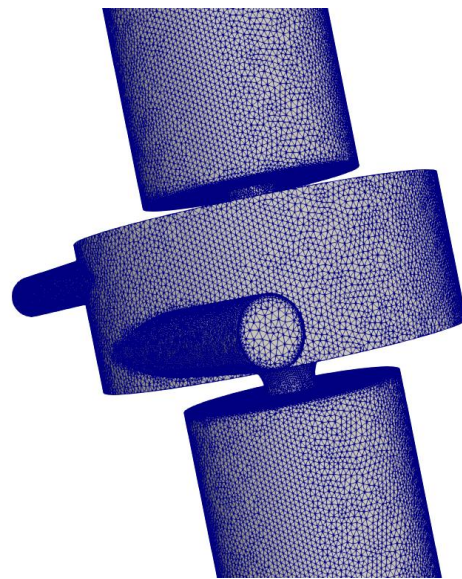


Рис. 2. Неструктурована сітка розрахункової моделі

Моделювання проведено на структурованих і неструктурованих сітках. Оскільки внаслідок порівняння інтегральних параметрів насоса після розрахунку на різних сітках розходжень більше ніж 1 % виявлено не було, то ухвалено рішення надалі використати більш просту, з погляду підготовки сіток, неструктуровану сітку на основі тетрагональних елементів. Для формування течії в прикордонному шарі використовувалися

призматичні елементи. Для визначення мінімально достатньої сітки для розрахунків зроблені обчислення на трьох різних сітках: 1 млн елементів, 4 млн елементів й 12 млн елементів. Порівняння результатів розрахунків на різних сітках здійснено на основі розподілу тиску вздовж радіуса вихрової камери змішання. До того ж результати використання сіток з 4 й 12 млн елементів практично не відрізнялися, тому ухвалено рішення надалі використовувати сіткові розбивки величиною 4 млн елементів (рис. 2). Під час попередніх розрахунків також оцінювалася вплив параметра  $y^+$  на точність вирішення. Так, на основі розрахунків, а також рекомендацій, наведених у [29], ухвалено рішення використати сітки з  $y^+ < 4$ .

У тангенціальному каналі входу (канал живлення) задавався повний тиск, у вихідному тангенціальному каналі (вихідний канал) – рівність нулю статичного тиску. В осьових вхідних каналах (канали всмоктування) задавалася відкрита границя з нульовим статичним тиском. Для моделювання реологічних параметрів задавалася бінгамівська в'язкість і початкова напруга зсуву різних величин для одержання залежностей впливу цих параметрів на картину течії бінгамівської рідини в нагнітачі. Інтенсивність турбулентності задана величиною 5 %, згідно з роботою [30]. Моделювалися турбулентні режими течії з числами Рейнольдса в діапазоні  $Re = 10^3 \dots 10^7$ , що дозволяє стверджувати, що режими роботи нагнітача є автотельними. Границя переходу від ламінарної до турбулентної течії розраховувалася відповідно до [31]. Течія в насосі моделювалася таким чином, щоб забезпечувалася турбулентний режим. Числа Рейнольдса дозволяють на основі критеріїв подоби перераховувати результати на більш масштабні моделі вихорокамерного насоса.

На рис. 3 наведені вектори швидкості в насосі під час перекачування бінгамівської рідини з різним значенням пластичної в'язкості. Зміна пластичної в'язкості значно впливає на значення швидкості у вихідному каналі, що погіршує ефективність насоса.

Кінематичні характеристики, наведені на рис. 3, б, практично відповідають гіпотетичній ідеальній рідині, тому що в реальній практиці рідини з такою аномально низькою в'язкістю практично не зустрічаються. Отже, підтверджується гіпотеза про те, що вихорокамерний нагнітач може працювати на

гіпотетичній ідеальній рідині. У цьому випадку показники ефективності такого нагнітача поліпшуються й прагнуть до ідеальних.

На рис. 4 наведені вектори швидкості в насосі під час перекачування бінгамівської рідини з різним значенням початкової напруги зсуву. Зміна початкової напруги зсуву впливає на параметри течії, але менше, ніж пластична в'язкість.

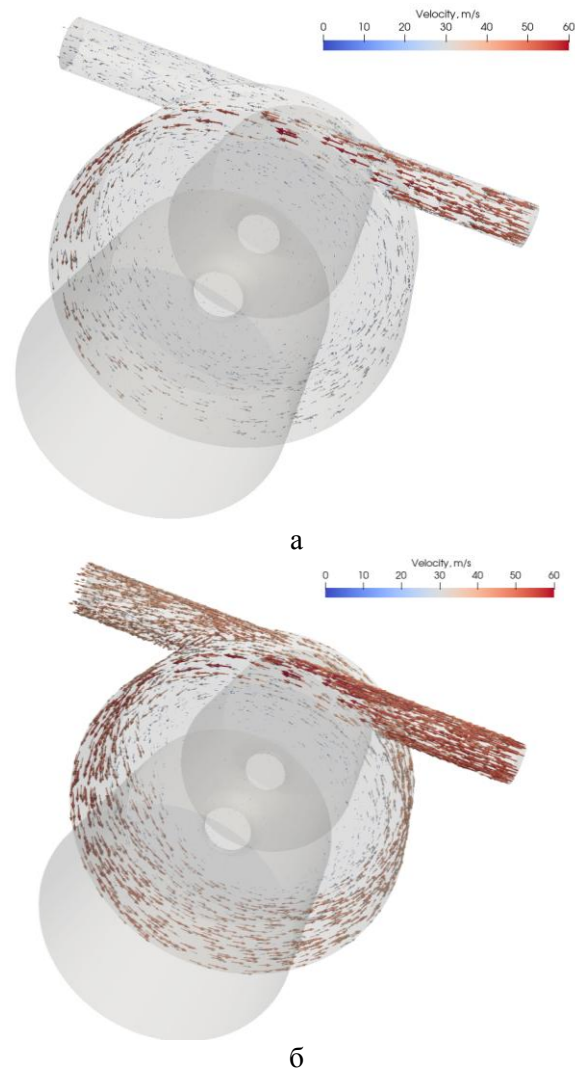


Рис. 3. Вектори швидкості в насосі:

а –  $\tau_0 = 0$  Па;  $\mu_B = 0,01$  Па·с; б –  $\tau_0 = 0$  Па;  $\mu_B = 0,00001$  Па·с

Характерних змін швидкості у вихідному каналі за умови різних значень початкової напруги «неозброєним оком» помітити неможливо. З іншого боку, подальше збільшення  $\tau_0$  приведе до більш значних змін, однак у практиці транспортування рідин у гідравлічному транспорті рідко доводиться зустрічати рідини з більшими значеннями  $\tau_0$ .



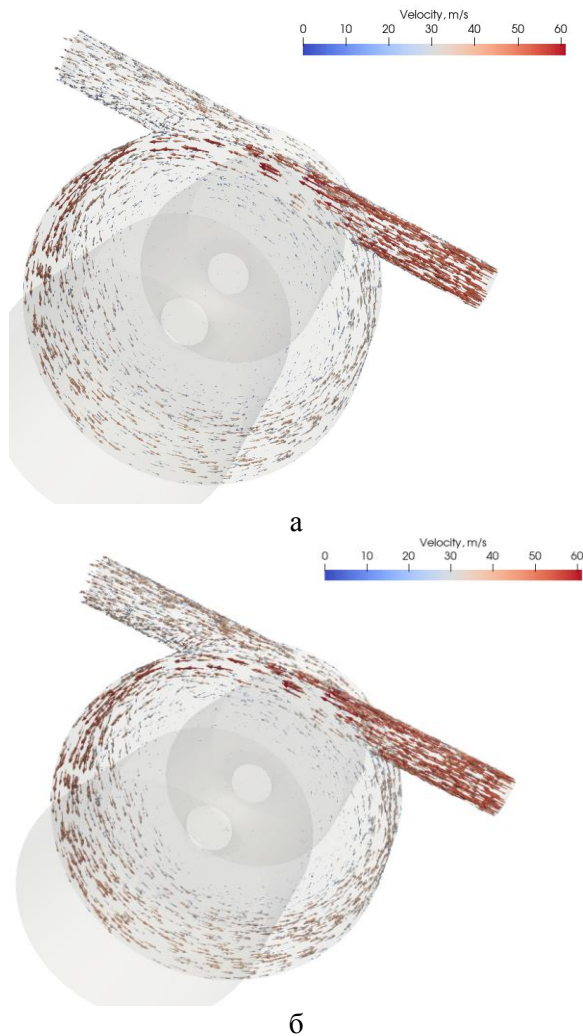


Рис. 4. Вектори швидкості в насосі:  
 а –  $\tau_0 = 10$  Па;  $\mu_B = 0,001$  Па·с; б –  $\tau_0 = 0$  Па;  $\mu_B = 0,001$  Па·с

Особливості перекачування можна краще проаналізувати, розглянувши вектори швидкості й розподіл тиску в меридіональному перетині (рис. 5). Тут можна бачити, що в разі збільшення пластичної в'язкості знижується витрата середовища, що перекачується, а за умови високих значень з'являється викид активного потоку через осьові канали (рис. 5, а). Розподіл тисків уздовж осі також значно залежить як від пластичної в'язкості, так і від початкової напруги зсуву.

Розподіл тиску вздовж радіуса вихрової камери наведений на рис. 6. Інтенсивність синіх кольорів показує збільшення або зменшення глибини вакууму поблизу осі. Найгіршим, з погляду створення витрати перекачування в насосі, є розподіл на рис. 6, а. Загалом спостерігається кореляція між значеннями в'язкості рідини й величиною вакууму в насосі. Величина вакууму впливає на енергетичні показники роботи насоса, тому що знижується

подача. Водночас величина надлишкового тиску на периферії вихрової камери знижується, але не в такій сильній залежності, як подача й величина вакууму.

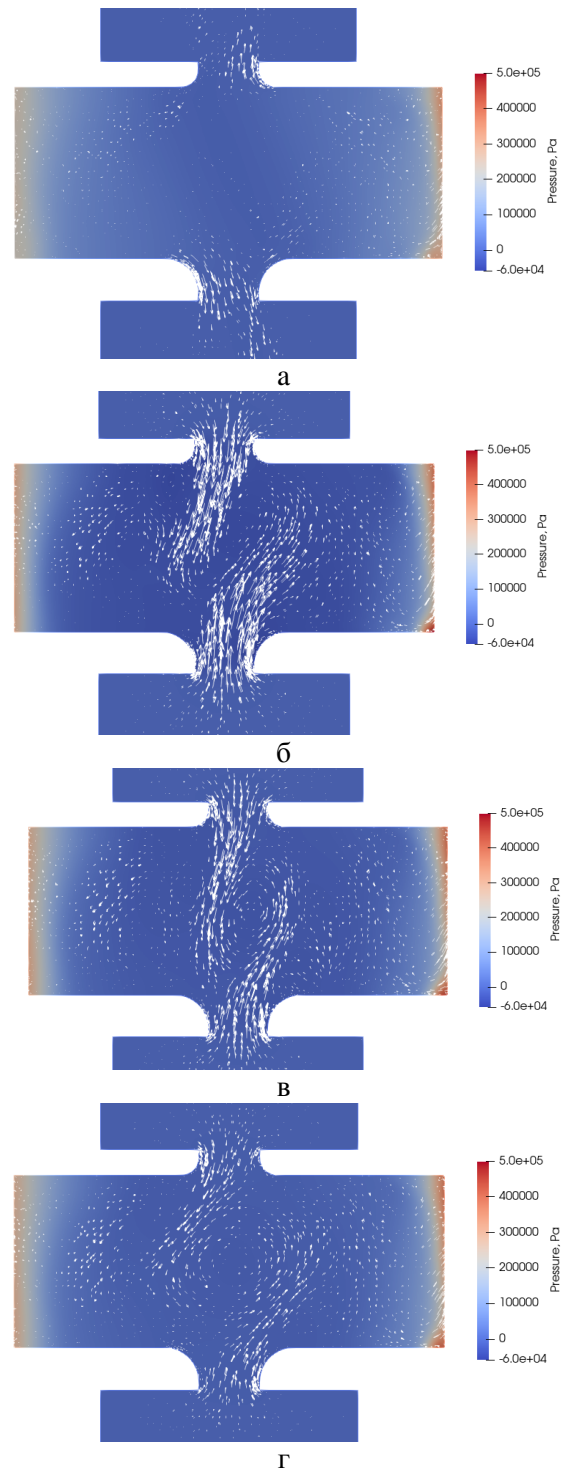


Рис. 5. Вектори швидкості й розподіл тисків у меридіональній площині насоса:  
 а –  $\tau_0 = 0$  Па;  $\mu_B = 0,1$  Па·с; б –  $\tau_0 = 0$  Па;  $\mu_B = 0,00001$  Па·с; в –  $\tau_0 = 0$  Па;  $\mu_B = 0,001$  Па·с; г –  $\tau_0 = 10$  Па;  $\mu_B = 0,001$  Па·с

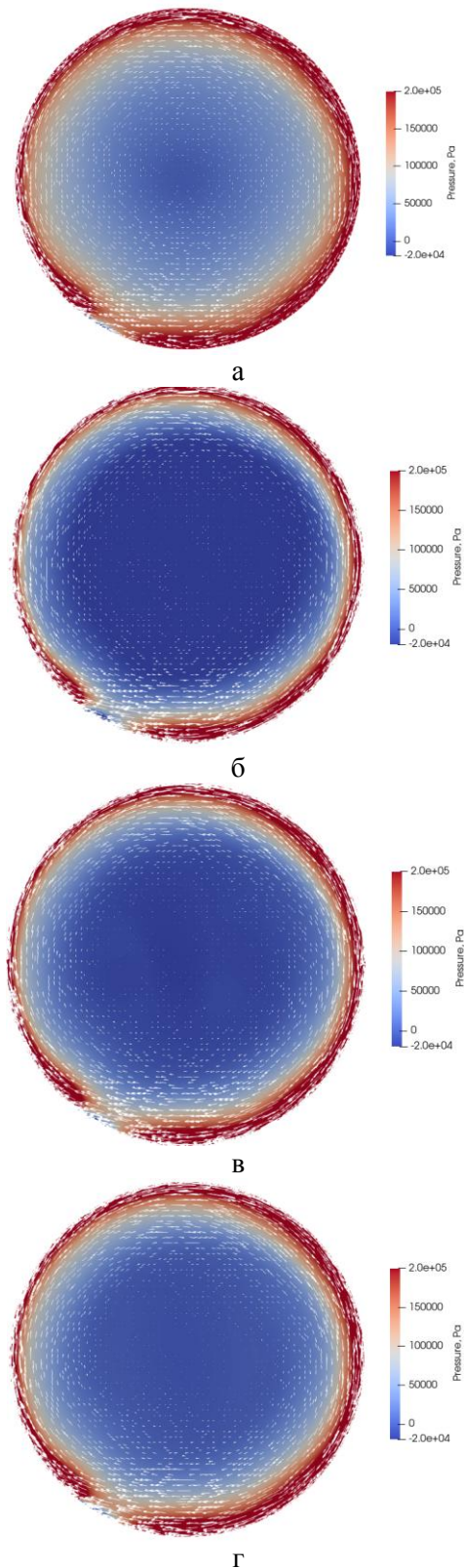


Рис. 6. Вектори швидкості й розподіл тисків у горизонтальній поперечній площині насоса: а –  $\tau_0 = 0$  Па;  $\mu_B = 0,1$  Па·с; б –  $\tau_0 = 0$  Па;  $\mu_B = 0,00001$  Па·с; в –  $\tau_0 = 0$  Па;  $\mu_B = 0,001$  Па·с; м –  $\tau_0 = 10$  Па;  $\mu_B = 0,001$  Па·с

Порівняння енергетичних параметрів насоса (витрата середовища, що перекачується, тиск на виході з насоса й ККД) представлено в табл. 1.

Тут усі параметри є параметрами насоса під час перекачування рідини з  $\tau_0 = 0$  Па й  $\mu_B = 0,00001$  Па·с.

Таблиця 1 – Енергетичні параметри роботи насоса під час перекачування бінгамівської рідини

Реологічні параметри середовища	Витрата середовища, що перекачується	Тиск на виході з насоса	ККД
$\tau_0 = 0$ Па; $\mu_B = 1 \cdot 10^{-5}$ Па·с	1,0	1,0	1,0
$\tau_0 = 0$ Па; $\mu_B = 0,1$ Па·с	-0,2	0,6	-
$\tau_0 = 0$ Па; $\mu_B = 0,001$ Па·с	0,8	0,7	0,56
$\tau_0 = 10$ Па; $\mu_B = 0,001$ Па·с	0,56	0,35	0,2

Значення показників ефективності перекачування рідини з реологічними параметрами  $\tau_0 = 0$  Па;  $\mu_B = 0,1$  Па·с негативні, що говорить про те, що насос не виконує своїх функцій.

Для забезпечення працездатності вихорокамерного насоса в процесі перекачування неньютонівських середовищ, за умови відомих реологічних параметрах суміші, необхідно підбирати необхідний тиск живлення активного потоку, а також розглядати питання розведення рідини водою для зниження в'язкості суміші й виходу енергетичних параметрів перекачування на задані значення.

Автори вважають, що узагальнення на основі реологічних параметрів дозволяє стверджувати про можливість перекачування будь-яких бінгамівських рідин. Дослідники можуть використати теоретичні результати цієї роботи для проектування нових вихорокамерних насосів для перекачування інших бінгамівських середовищ, наприклад олійної фарби, смоли, лаків, болотних ґрунтів і багатьох інших.

Адекватність отриманих результатів перевірялася на якісному рівні порівнянням картин течії з картинами течії в експерименті. Верифікація програмного комплексу для розрахунків вихорокамерного насоса проведена

на ньютонівській рідині в роботі [12], неньютонівській (бінгамівській) рідині за умови течії в трубі – у роботі [32].

### Виводи

На основі чисельного моделювання рівнянь RANS з моделлю турбулентності SST досліджені характеристики течії неньютонівської рідини на прикладі бінгамівської у вихорокамерному насосі.

1. Підтверджено гіпотезу про те, що вихорокамерний нагнітач може працювати на гіпотетичній ідеальній рідині. У цьому випадку показники ефективності такого нагнітача поліпшуються й прагнуть до ідеальних.

2. За умови збільшення пластичної в'язкості знижується витрата середовища, що перекачується, а в разі високих значень з'являється викид активного потоку через осьові канали.

### Література

- Loureiro L. M. E. F., Gil P. B. F., de Campos F. V., Nunes L. J. R., & Ferreira J. M. F. (2018). Development and rheological characterisation of an industrial liquid fuel consisting of charcoal dispersed in water. *Journal of the Energy Institute*. 2018. Vol. 91(4). P. 519–526.
- Glushkov D. O., Strizhak P. A., Chernetskii M. Y. Organic coal-water fuel: Problems and advances. *Thermal Engineering*. 2016. Vol. 63(10). P. 707–717.
- Mishra S. K., Kanungo S. B. Factors affecting the preparation of highly concentrated coal-water slurry (HCCWS). *Journal of Scientific & Industrial Research*. 2000. Vol. 59. P. 765–790.
- Rao M. A., Pavan Kumar M. V., Subba Rao S., Narasaiah N. Rheological behavior of coal-water slurry using sodium tripolyphosphate as a dispersant. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*. 2018. P. 1–13.
- Pinchuk V. A., Sharabura T. A., Kuzmin A. V. Improvement of coal-water fuel combustion characteristics by using of electromagnetic treatment. *Fuel Processing Technology*. 2017. Vol. 167. P. 61–68.
- Zasyrkin I. M., Murko V. I., Fedyaev V. I., Baranova M. P. Systems of ignition and combustion stabilization for water-coal fuel. *Thermal science*. 2012. Vol. 16(4). P. 1229–1238.
- Staroń A., Kowalski Z., Staroń P., Banach M. Analysis of the useable properties of coal-water fuel modified with chemical compounds. *Fuel Processing Technology*. 2016. Vol. 152. P. 183–191.
- Boylu F., Dincer H., Ateşok G. Effect of coal particle size distribution, volume fraction and rank on the rheology of coal–water slurries. *Fuel Processing Technology*. 2004. Vol. 85(4). P. 241–250.
- Tarodiya R., Gandhi B. K. Hydraulic performance and erosive wear of centrifugal slurry pumps-A review. *Powder Technology*. 2017. Vol. 305. P. 27–38.
- Tse P. W., Wang D. Enhancing the abilities in assessing slurry pumps' performance degradation and estimating their remaining useful lives by using captured vibration signals. *Journal of Vibration and Control*. 2017. Vol. 23(12). P. 1925–1937.
- Rogovyi A. S., Voronova Ye. Comparative Analysis Of Performance Characteristics Of Jet Vortex Type Superchargers. *Автомобильный транспорт*. 2016. Вып. 38. С. 93–98.
- Сьомін Д. О., Роговий А. С. Вихорокамерні нагнітачі: монографія. Харків, 2017. 204 с.
- Meakhail T., Teaima I. Experimental and numerical studies of the effect of area ratio and driving pressure on the performance of water and slurry jet pumps. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2012. Vol. 226 (9). P. 2250–2266.
- Сьомін Д. О., Роговий А. С. Вплив умов входу середовища, що перекачується, на енергетичні характеристики вихорокамерних насосів. *Вісник Національного технічного університету ХПІ. Серія: Гідравлічні машини та гідроагрегати*, 2015. (3). С. 130–136.
- Сьомін Д. О., Роговий А. С., Левашов А. М. Вплив закручення потоку, що перекачується, на енергетичні характеристики вихорокамерних насосів. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Гідравлічні машини та гідроагрегати*. 2016. (20). С. 68–71.
- Роговий А. С. Особливості режимів роботи вихорокамерних нагнітачів. *Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета: сб. науч. тр.* Харьков, 2016. Вып. 75. С. 120–128.
- Роговий А. С. Концепція створення вихорокамерних нагнітачів та принципи побудови систем на їх основі. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2017. № 233. С. 168–173.
- Evdokimov O. A. The influence of the ratio of the diameters of the vortexes and mixing chambers of a vortex ejector on its own characteristics. *In AIP Conference Proceedings*. 2020. Vol. 2211(1), 2020060001.
- Rogovyi A. S. Verification of Fluid Flow Calculation in Vortex Chamber Superchargers. *Автомобильный транспорт*. 2016. Вып. 39. С. 39–46.
- Rogovyi A. Energy performances of the vortex chamber supercharger. *Energy*. 2018. Vol. 163. P. 52–60.
- Ou G., Ouyang P., Zheng Z., Jin H., Bie K., Wang C. Investigation on failure process and structural improvement of a high-pressure coal water slurry valve. *Engineering Failure Analysis*. 2019. Vol. 96. P. 1–17.

22. Kumar N., Singh K. P., Dwivedi V. K., Yadav J. K., Kumar S., Kumar N. A Study on Coal Ash Slurry Flow at Higher Solid Concentrations in Pipeline. *In Proceedings of International Conference in Mechanical and Energy Technology*. 2020. P. 817–822.
23. Guangjie P., Xin H., Ling Z., Guoxin Z., Hong Z. Solid-liquid Two-phase Flow and Wear Analysis in a Large-scale Centrifugal Slurry Pump. *Engineering Failure Analysis*, 2020. 104602.
24. Cheremushkin V., Polyakov A. Investigation of the influence of geometric parameters of a multi-nozzle jet pump on its energy characteristics. *IOP Conf. Series: MS&E*, 2020. Vol. 779(1). P. 012056.
25. Smirnov P. E., Menter F. R. Sensitization of the SST turbulence model to rotation and curvature by applying the Spalart–Shur correction term. *Journal of Turbomachinery*. 2009. Vol. 131, no. 4. 041010. P. 1–8.
26. Сємин Д. А., Роговой А. С., Левашов А. М., Левашов Я. М. Верификация расчетов течений в вихорокамерных устройствах. *Вісник ХТУУ «КПІ». Серія «Машинобудування»*. 2016. № 2 (77). С. 71–78.
27. Alahmadi Y. H., Nowakowski A. F. Modified shear stress transport model with curvature correction for the prediction of swirling flow in a cyclone separator. *Chemical Engineering Science*. 2016. Vol. 147. P. 150–165.
28. Huang S., Wei Y., Guo C., Kang W. Numerical Simulation and Performance Prediction of Centrifugal Pump's Full Flow Field Based on OpenFOAM. *Processes*. 2019. Vol. 7(9), 605. P. 1–11.
29. Besagni G., Inzoli F. Computational fluid-dynamics modeling of supersonic ejectors: Screening of turbulence modeling approaches. *Applied Thermal Engineering*. 2016. Vol. 117. P. 122–144.
30. Han X., Sagaut P., Lucor D. On sensitivity of RANS simulations to uncertain turbulent inflow conditions. *Comput. Fluids*. 2012. Vol. 61. P. 2–5.
31. Потапов А. Г. Ламинарно-турбулентный переход при течении ньютоновских и неньютоновских жидкостей в круглой трубе. *Вести газовой науки*. 2016. № 2 (26). С. 174–182.
32. Chernetskaya-Beletskaya N., Rogovyi A., Baranov I., Krut A., Miroshnikova M., Bragin N. Increasing the efficiency of highly concentrated coal-water fuel based on the simulation of non-Newtonian fluid flow. *In MATEC Web of Conferences*. 2019. Vol. 294. P. 01009.
1. Loureiro, L. M. E. F., Gil, P. B. F., de Campos, F. V., Nunes, L. J. R., & Ferreira, J. M. F. (2018). Development and rheological characterisation of an industrial liquid fuel consisting of charcoal dispersed in water. *Journal of the Energy Institute*, 91(4), 519-526.
2. Glushkov, D. O., Strizhak, P. A., & Chernetskii, M. Y. (2016). Organic coal-water fuel: Problems and advances. *Thermal Engineering*, 63(10), 707-717.
3. Mishra, S. K., & Kanungo, S. B. (2000). Factors affecting the preparation of highly concentrated coal-water slurry (HCCWS). *Journal of Scientific & Industrial Research*, 59, 765-790.
4. Rao, M. A., Pavan Kumar, M. V., Subba Rao, S., & Narasaiah, N. (2018). Rheological behavior of coal-water slurry using sodium tripolyphosphate as a dispersant. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 1-13.
5. Pinchuk, V. A., Sharabura, T. A., & Kuzmin, A. V. (2017). Improvement of coal-water fuel combustion characteristics by using of electromagnetic treatment. *Fuel Processing Technology*, 167, 61-68.
6. Zasytkin, I. M., Murko, V. I., Fedyaev, V. I., & Baranova, M. P. (2012). Systems of ignition and combustion stabilization for water-coal fuel. *Thermal science*, 16(4), 1229-1238.
7. Staroń, A., Kowalski, Z., Staroń, P., & Banach, M. (2016). Analysis of the useable properties of coal-water fuel modified with chemical compounds. *Fuel Processing Technology*, 152, 183-191.
8. Boylu, F., Dincer, H., & Ateşok, G. (2004). Effect of coal particle size distribution, volume fraction and rank on the rheology of coal–water slurries. *Fuel Processing Technology*, 85(4), 241-250.
9. Tarodiya, R., & Gandhi, B. K. (2017). Hydraulic performance and erosive wear of centrifugal slurry pumps-A review. *Powder Technology*, 305, 27-38.
10. Tse, P. W., & Wang, D. (2017). Enhancing the abilities in assessing slurry pumps' performance degradation and estimating their remaining useful lives by using captured vibration signals. *Journal of Vibration and Control*, 23(12), 1925-1937.
11. Rogovyi, A., & Ye, Voronova. (2016). Comparative analysis of performance characteristics of jet vortex type superchargers. *Automobile Transport*, (38). 93-98.
12. Syomin D.O., Rogovyi A.S. (2017). Vykhorokamerni nahnitachi [Vortex chamber superchargers]. Monograph. Kharkiv. 204 p. [in Ukrainian].
13. Meakhail, T., & Teaima, I. (2012). Experimental and numerical studies of the effect of area ratio and driving pressure on the performance of water and slurry jet pumps. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 226(9), 2250-2266.
14. Syomin D.O., Rogovyi A.S. (2015). Vplyv umov vkhodu seredovyshcha, shcho perekachuyet'sya, na enerhetychni kharakterystyky vykhrekamernykh nasosiv [Influence of the input



- conditions of the pumped mediums on the energy characteristics of the vortex chamber superchargers]. *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu KhPI. Seriya: Hidravlichni mashyny ta hidroahrehaty*, (3), 130-136 [in Ukrainian].
15. Syomin D.O., Rogovyi A.S., Levashov A.M. (2016). Vplyv zakruchennya potoku, shcho perekachuyet'sya, na enerhetychni kharakterystyky vikhrekamernykh nasosiv. [Influence of the swirling of the pumped stream on the energy characteristics of the vortex chamber pumps]. *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu KhPI. Seriya: Hidravlichni mashyny ta hidroahrehaty* (20), 68-71 [in Ukrainian].
  16. Rogovyi A.S. (2016). Osoblyvosti rezhymiv roboty vykhorokamernykh nahnitachiv. [Features of vortex chamber superchargers working mode] *Vestnyk Khar'kovskoho natsional'noho avtomobil'no-dorozhnoho unyversyteta: sb. nauch. tr.* (75), 120-128.
  17. Rogovyi A.S. Kontseptsiya stvorenniya vykhorokamernykh nahnitachiv ta pryntsyipy pobudovy system na yikh osnovi. [The concept of vortex chamber superchargers creation and the principle of systems designing on their basis]. *Visnyk Skhidnoukrayins'koho natsional'noho universytetu imeni Volodymyra Dalya*, 3(233), 168-173.
  18. Evdokimov, O. A. (2020, March). The influence of the ratio of the diameters of the vortexes and mixing chambers of a vortex ejector on its own characteristics. *In AIP Conference Proceedings* 2211 (1), 060001.
  19. Rogovyi, A. (2016). Verification of fluid flow calculations in vortex chamber superchargers. *Automobile Transport*, (39). 39-46.
  20. Rogovyi A. (2018) Energy performances of the vortex chamber supercharger. *Energy*, 163, 52-60.
  21. Ou, G., Ouyang, P., Zheng, Z., Jin, H., Bie, K., & Wang, C. (2019). Investigation on failure process and structural improvement of a high-pressure coal water slurry valve. *Engineering Failure Analysis*, 96, 1-17.
  22. Kumar, N., Singh, K. P., Dwivedi, V. K., Yadav, J. K., Kumar, S., & Kumar, N. (2020). A Study on Coal Ash Slurry Flow at Higher Solid Concentrations in Pipeline. *In Proceedings of International Conference in Mechanical and Energy Technology*, 817-822.
  23. Guangjie, P., Xin, H., Ling, Z., Guoxin, Z., & Hong, Z. (2020). Solid-liquid Two-phase Flow and Wear Analysis in a Large-scale Centrifugal Slurry Pump. *Engineering Failure Analysis*, 104602.
  24. Cheremushkin, V., & Polyakov, A. (2020). Investigation of the influence of geometric parameters of a multi-nozzle jet pump on its energy characteristics. *IOP Conf. Series: MS&E*, 779(1), 012056.
  25. Smirnov, P. E., & Menter, F. R. (2009). Sensitization of the SST turbulence model to rotation and curvature by applying the Spalart-Shur correction term. *Journal of turbomachinery*, 131(4).
  26. Syomin D.O., Rogovyi A.S., Levashov A.M., Levashov Ya.M. (2016). Verifikatsiya raschetov techenii v vikhrekamernykh ustroystvakh [Verification of calculations of flows in the vortex chamber devices]. *Visnyk NTUU "KPI". Ser. Mashynobuduvannya*, 2 (77), 71-78 [in Russian].
  27. Alahmadi, Y. H., & Nowakowski, A. F. (2016). Modified shear stress transport model with curvature correction for the prediction of swirling flow in a cyclone separator. *Chemical Engineering Science*, 147, 150-165.
  28. Huang, S., Wei, Y., Guo, C., & Kang, W. (2019). Numerical Simulation and Performance Prediction of Centrifugal Pump's Full Flow Field Based on OpenFOAM. *Processes*, 7(9), 605.
  29. Besagni, G., & Inzoli, F. (2017). Computational fluid-dynamics modeling of supersonic ejectors: Screening of turbulence modeling approaches. *Applied Thermal Engineering*, 117, 122-144.
  30. Han, X., Sagaut, P., & Lucor, D. (2012). On sensitivity of RANS simulations to uncertain turbulent inflow conditions. *Computers & Fluids*, 61, 2-5.
  31. Potapov A.G. (2016). Laminarno-turbulentnyy perekhod pri teche-nii n'yutonovskikh i nen'yutonovskikh zhidko-stey v krugloy trube [Laminar-turbulent transition in the flow of Newtonian and non-Newtonian fluids in a round pipe]. *Vesti gazovoy nauki*, 2(26), 174-182.
  32. Chernetskaya-Beletskaya, N., Rogovyi, A., Baranov, I., Krut, A., Miroshnikova, M., & Bragin, N. (2019). Increasing the efficiency of highly concentrated coal-water fuel based on the simulation of non-Newtonian fluid flow. *In MATEC Web of Conferences*, 294, 01009.
- Роговий Андрій Сергійович**<sup>1</sup>, д.т.н., проф. кафедри теоретичної механіки та гідравліки, тел. +38-057-707-37-30, e-mail: asrogovoy@ukr.net.
- Нескорожений Артем Олегович**<sup>1</sup>, аспірант кафедри теоретичної механіки та гідравліки, тел. +38-057-713-61-62, e-mail: nao@m-impex.com.ua.
- <sup>1</sup>Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.
- Картины течения неньютоновской жидкости в вихрекамерных насосах**  
**Аннотация.** Проведено исследование картин течения неньютоновской (бингамовской) жидкости в вихрекамерном насосе на основе математического моделирования. Модель составлена на основе осредненных уравнений Рейнольдса и SST (Shear Stress Transport) модели турбулентности. Определено влияние реологических параметров перекачиваемой жидкости на кинематические характеристики течения в насосе. Увеличение вязкости жидкости снижает показатели эффективности насоса.

**Ключевые слова:** вихрекамерный насос, бингамовская жидкость, реология, картины течения, неньютоновские среды.

**Роговой Андрей Сергеевич**<sup>1</sup>, д.т.н., проф. кафедры теоретической механики и гидравлики, тел. +38-057-707-37-30, e-mail: asrogovoy@ukr.net.

<sup>1</sup>Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, 61002, Украина, г. Харьков, ул. Ярослава Мудрого, 25.

**Нескороженый Артем Олегович**<sup>1</sup>, аспирант кафедры теоретической механики и гидравлики, тел. +38-057-713-61-62,

e-mail: nao@m-impex.com.ua.

<sup>1</sup>Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, 61002, Украина, г. Харьков, ул. Ярослава Мудрого, 25.

### Flow fields of a non-Newtonian fluid in vortex chamber pumps

**Abstract. Problem.** Pumping different fluids by hydraulic transport is associated with fast wear of the pump contact surfaces. The fluids being pumped are often non-Newtonian. The use of jet pumps for pumping is impractical due to low efficiency. Vortex chamber pumps may have higher efficiency when pumping non-Newtonian fluids, however, their operation on such fluids has not yet been studied. The **aim** of this work is to study the characteristics of the flow fields of a non-Newtonian fluid using the example of a Bingham fluid in the vortex chamber pump. **Methodology.** Predicting pump energy performance and determining flow fields for highly viscous fluids using CFD simulations enables advanced jet pumps to handle non-Newtonian fluids. **Results.**

Modeling was carried out based on the numerical solution of the RANS equations with the SST turbulence model. To ensure the operability of the vortex chamber pump when pumping non-Newtonian fluid, with known rheological parameters of the mixture, it is necessary to select the required supply pressure for the active flow, and also to consider the issue of diluting the liquid with water to reduce the mixture viscosity and achieve the specified values of the pumping energy parameters. **Originality.** The hypothesis that the vortex chamber supercharger can operate on a hypothetical ideal fluid has been confirmed. In this case, the performance indicators of such a supercharger improve and tend to ideal. With an increase in plastic viscosity, the volumetric flow rate of the pumped fluid decreases, and at high values of the viscosity, an active flow is ejected through the axial channels. **Practical value.** Researchers can use the theoretical results of this work to design new devices for pumping other Bingham fluids, such as oil paint, resins, varnishes, swamp soils, and many others.

**Key words:** vortex chamber pump, Bingham fluid, flow field, non-Newtonian fluid.

**Rogovyi Andrii**<sup>1</sup>, professor, Doct. of Science, Theoretical Mechanics and Hydraulics Department, tel. +38-057-707-37-30, e-mail: asrogovoy@ukr.net.

**Neskorozhenyi Artem**<sup>1</sup>, PhD student of the Theoretical Mechanics and Hydraulics Department, tel. +38-057-713-61-62, e-mail: nao@m-impex.com.ua.

<sup>1</sup>Kharkiv National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.