

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2020-261-5-40-46>

УДК 621.547

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФОРМЫ ВИХРЕВОЙ КАМЕРЫ НА ПАРАМЕТРЫ РАБОТЫ ВИХРЕКАМЕРНОГО НАГНЕТАТЕЛЯ

Роговой А.С.

## THE INVESTIGATION OF THE VORTEX CHAMBER FORM INFLUENCE ON THE VORTEX CHAMBER SUPERCHARGERS OPERATION PARAMETERS

Rogovyi A.S.

*На основе математического моделирования путем решения уравнений Рейнольдса с использованием SST-модели турбулентности выявлено влияние формы вихревой камеры вихрекамерного нагнетателя на его особенности работы и энергетические характеристики. Получено, что рациональной формой камеры является классическая цилиндрическая вихревая камера. Применение формы вихревой камеры отличной от классической приводит к снижению КПД на величину от 20 до 30%. Это происходит за счет значительного снижения коэффициента эжекции нагнетателя. Локальное уменьшение высоты вихревой камеры приводит к столкновению перекачиваемых потоков, что уменьшает расход всасываемой жидкости и уменьшает КПД. Локальное увеличение высоты вихревой камеры приводит к увеличению трения потока и к большим потерям энергии в вихревой камере.*

**Ключевые слова:** численный расчет, вихрекамерный нагнетатель, струйная техника, математическое моделирование, форма вихревой камеры

**Введение.** Во многих отраслях промышленности перекачивание твердых абразивных частиц вызывает быстрые темпы износа оборудования, прежде всего, насосного [1]. На сегодняшний день, для перекачивания твердых частиц с помощью жидкости и газа чаще используют динамические насосы. Абразивное изнашивание уплотнений и рабочих органов насосов приводит к ухудшению энергетических характеристик и к значительному снижению ресурса насосного оборудования, что требует остановки промышленного производства и замены деталей [2]. Резервы решения проблемы улучшения показателей надежности и долговечности за счет поиска путей модернизации центробежных насосы практически исчерпаны. Основные два пути модернизации – это использование более износоустойчивых материалов и улучшение геометрии проточной части насоса с целью уменьшения контакта абразивных частиц с рабочими органами [3]. Оба пути улучшения приводят к увеличению финансовых за-

трат на эксплуатацию гидротранспортных установок. Поэтому, на наш взгляд, возможным решением проблем повышения надежности и долговечности насосного оборудования при транспортировании твердых частиц является использование средств струйной техники. Классические струйные нагнетатели имеют довольно низкие показатели эффективности рабочего процесса [4]. Так, КПД прямооточного струйного насоса не превышает 30 %, что сдерживает распространение струйной техники для перекачивания твердых сыпучих сред. Использование положительных свойств струйных и центробежных насосов позволило создать новый тип струйных нагнетателей с вихревой камерой – вихрекамерные насосы [5, 6]. Эти насосы, в отличие от струйных прямооточных, позволяют перекачивать твердые абразивные среды с большей эффективностью [7].

**Анализ последних исследований и публикаций.** В работах [6-10] приведены результаты численных и экспериментальных исследований вихрекамерных нагнетателей на различных средах. В работе [7] показано, что эффективность перекачивания твердых сред с помощью вихрекамерного нагнетателя в два раза выше, чем с помощью прямооточного струйного эжектора. В работе [10] показана оптимизация геометрических параметров насоса, однако влияние формы вихревой камеры на энергетические характеристики и особенности течения в камере насоса осталась не исследованной.

Известно, что форма вихревой камеры довольно сильно влияет на показатели работы вихревых устройств, таких как: вихревые клапаны [11], циклоны, вихревые трубы и др. [12-14]. Исследований влияния формы вихревой камеры на показатели работы вихрекамерных нагнетателей на сегодня проведено еще не было.

Средства вычислительной гидромеханики и трехмерного моделирования [15, 16] позволяют значительно ускорить процесс исследования влияния

геометрии на основные параметры течения жидкости внутри проточной части [17-20]. Однако, их применение требует предварительной верификации используемого программного обеспечения для решения данного класса задач. Верификация программного комплекса OpenFoam для решения задач течения в вихрекамерном нагнетателе приведено в работах [10, 21, 22].

**Целью работы** является оценка влияния формы вихревой камеры вихрекамерного нагнетателя на его энергетические характеристики и особенности гидродинамики.

**Результаты исследований.** При эксплуатации вихрекамерного нагнетателя можно реализовать два рабочих процесса: с дренажным каналом [8] и без [5, 6]. В данной статье рассмотрена работа вихрекамерного нагнетателя без дренажного канала. На рис. 1 показана принципиальная схема вихрекамерного нагнетателя и исследованные в работе формы вихревой камеры.

Активный поток поступает в вихревую камеру и создает вращающийся вокруг оси вихревой камеры поток с присущими ему гидродинамическими

особенностями: падение давления вблизи оси и повышение давления на периферии. За счет перепада давлений перекачиваемый поток всасывается в вихревую камеру и перемещается на периферию камеры, приобретая кинетическую и потенциальную энергию. Отношение мощностей перекачиваемого и активного потоков формирует коэффициент полезного действия вихрекамерного нагнетателя.

Анализ примененных моделей турбулентности для расчетов вихревых устройств показывает, что оптимальной по затраченному времени на расчет и точностью прогнозирования гидродинамических параметров является SST-модель турбулентности Ментера, которая сегодня входит почти во все прикладные пакеты численного моделирования течений жидкости и газа [23, 24]. Однако, для более точного прогнозирования вакуума вблизи оси лучше применять коррекцию модели турбулентности для кривизны линий тока и вращения потока [21, 24, 25]. В данном исследовании тоже была использована SST-модель турбулентности с поправкой на кривизну линий тока.

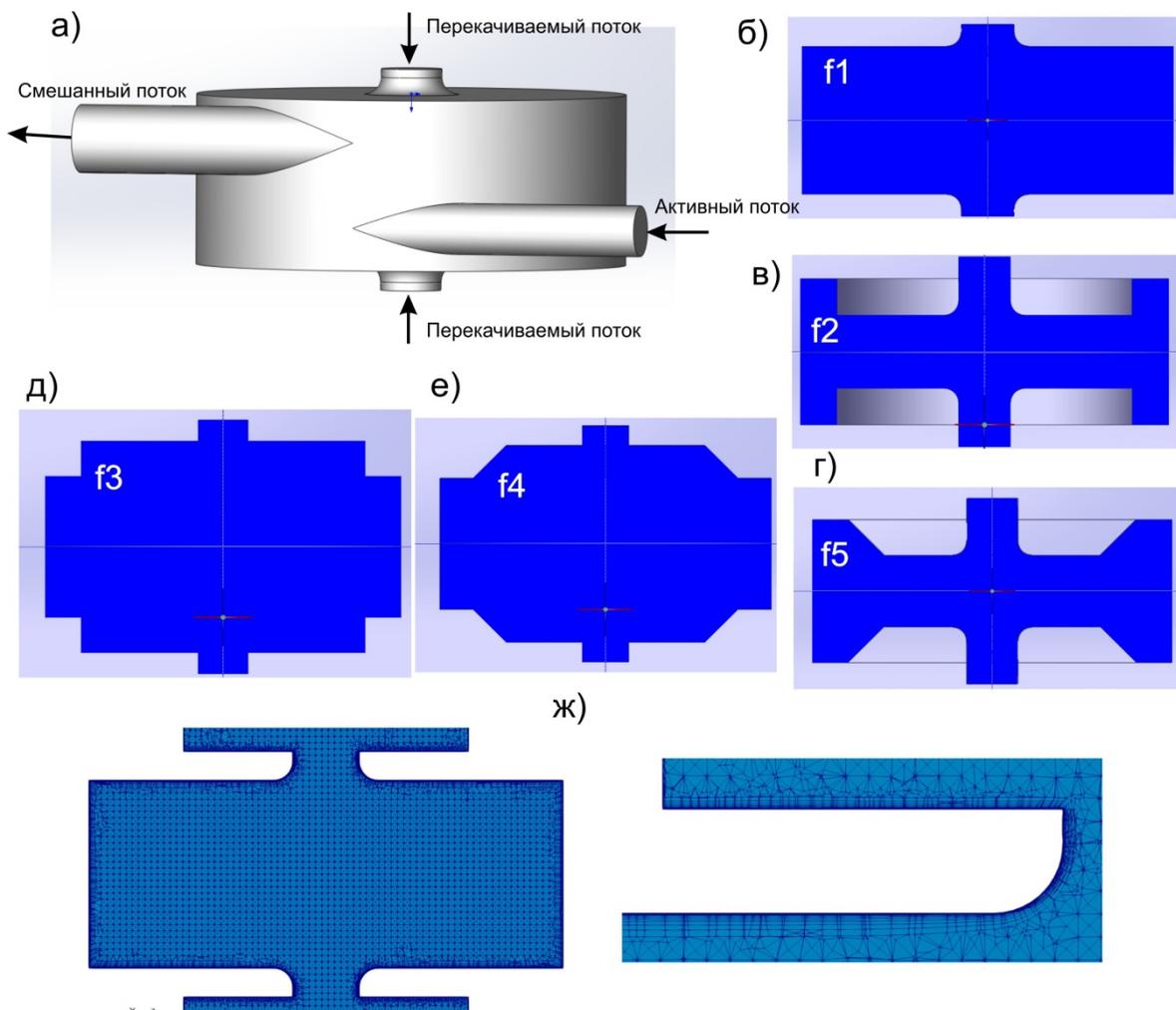


Рис. 1. Вихрекамерный нагнетатель: а – общая схема; б-е – исследованные вариации формы вихревой камеры; ж – сеточное разбиение

В предыдущих исследованиях было проанализировано влияние SST-модели турбулентности на точность полученных результатов в сравнении с экспериментальными данными работы вихрекамерного нагнетателя [10, 21]. Поэтому, эту математическую модель можно считать верифицированной. Для расчетов использован программный комплекс OpenFoam, позволяющий получить достоверные результаты и распространяется на условиях лицензии GPL версии 2 Фонда Свободного Программного Обеспечения (FSF) [26-28].

Для математического моделирования использовалась модель, состоящая из уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу, модели турбулентности с поправкой на кривизну линий тока и уравнения неразрывности [10, 23, 25].

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

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0; \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu_{ef} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k - \beta^* \rho k \omega; \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \omega) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu_{ef} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) - \rho \beta \omega^2 + Cd_{\omega} + \alpha \frac{\rho}{\mu_t} P_k. \quad (4)$$

Где  $F_i$  – проекции вектора массовых сил на оси координат;  $p$  – гидродинамическое давление;  $\rho$  – плотность;  $k$  – кинетическая энергия турбулентных пульсаций;  $x_j$  – декартовы координаты;  $u_j$  – проекции скорости в декартовой системе координат;  $\mu_{ef} = \mu + \mu_t$  – эффективная вязкость;  $\mu_t$  – турбулентная вязкость;  $\mu$  – молекулярная вязкость;  $P_k$  – генерационный член;  $Cd_{\omega}$  – перекрестный член;  $\alpha, \beta, \beta^*$  – эмпирические константы SST модели;  $t$  – время;  $\omega$  – частота турбулентных пульсаций.

При математическом моделировании проведены исследования влияния размера сеточного разбиения на результаты [19] (рис. 2). Исследованы шесть сеточных разбиений с таким количеством элементов: 0,5 млн; 2 млн; 4 млн; 7 млн; 10 млн и 15 млн. Получено, что начиная с 4 млн. элементов интегральные параметры расчета, а именно: давление и расход жидкости в каналах практически перестают меняться, поэтому принято решения использовать сетки с 4 млн. элементов. На рис. 2 приведено влияние количества сеточных элементов на расчет расхода в выходном канале. Расход отнесен к расходу, полученному при использовании сетки в 15 млн элементов. Сетки построены таким образом, чтобы обеспечивать значение параметры призматического

приграничного слоя  $y^+ < 2$  [29, 30]. Расчеты завершались при выполнении двух условий: уменьшение невязок решения всех уравнений до значений  $10^{-5}$  и обеспечение постоянного по итерациям расхода в выходном канале. Т.е., расход должен меняться не более, чем на 0,1 % за 10 итераций, когда определено, что характер изменения расхода во время расчета колебательный [21, 31].

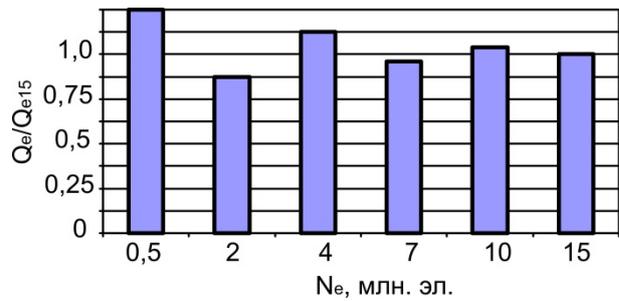


Рис. 2. Влияние сеточного разбиения на определение расхода на выходе из устройства

На рис. 3 представлено влияние формы вихревой камеры на распределение давления вдоль радиуса. Конструкция с формой вихревой камеры f4 имеет максимальные значения вакуума вблизи оси. Распределение давления определено посередине вихревой камеры. Все давления отнесены к соответствующим гидростатическим давлениям в канале питания (активный поток). Конструкции с увеличенной высотой вихревой камеры имеют большие значения вакуума вблизи оси, что можно объяснить практически завершающимся процессом смешения перекачиваемых потоков с вращающимся в вихревой камере.

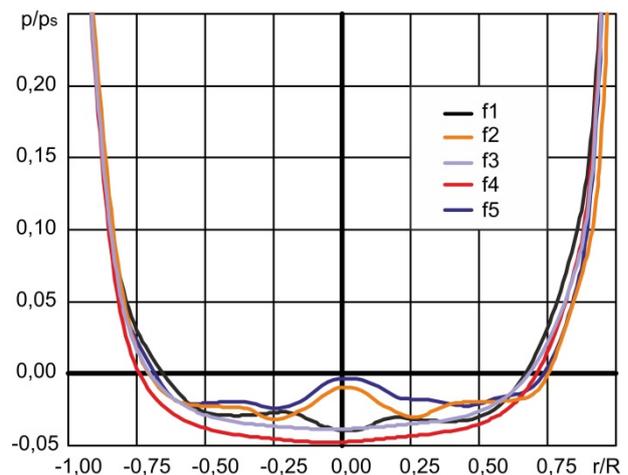


Рис. 3. Распределение давления вдоль радиуса вихревой камеры для исследованных вариаций формы

На рис. 4 представлены расчетные картины течения жидкости в вихрекамерном нагнетателе с разными формами вихревой камеры.

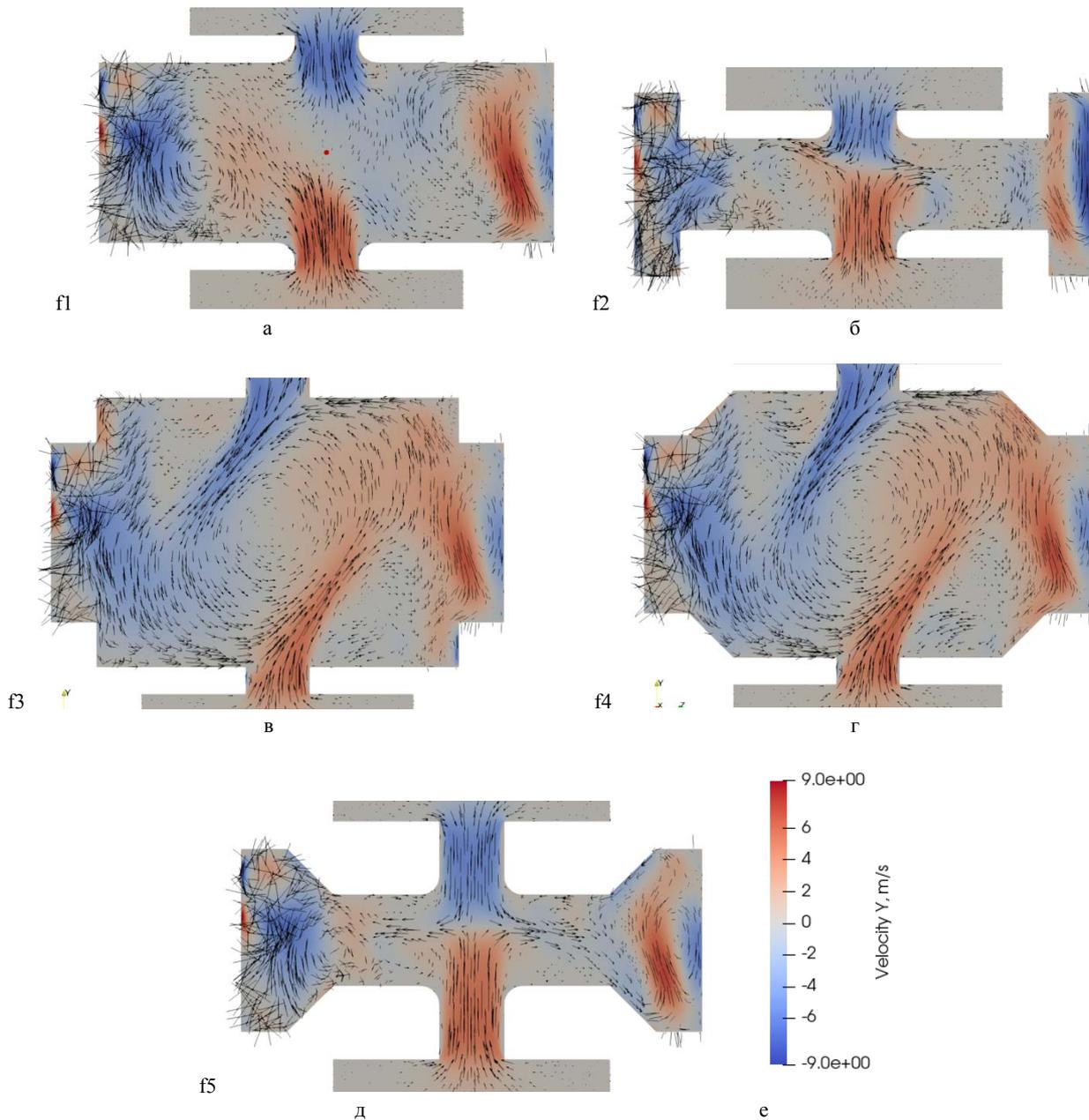


Рис. 4. Распределение осевой скорости в вихревой камере нагнетателя:  
 а-д – исследованные вариации формы вихревой камеры; е – общая для всех рисунков шкала измерения скорости

Форма камеры влияет на взаимодействие осевых потоков, всасываемых нагнетателем, что, в свою очередь, влияет на энергетические показатели работы. Локальное уменьшение высоты вихревой камеры приводит к столкновению перекачиваемых потоков, что уменьшает расход всасываемой жидкости и уменьшает КПД. С другой стороны, увеличение высоты вихревой камеры приводит к увеличению трения потока и к большим потерям энергии в вихревой камере, что также приводит к уменьшению общего КПД вихрекамерного нагнетателя.

На рис. 5 представлено сравнение энергетических показателей работы вихрекамерных нагнетателей с вихревой камерой разной формы. По КПД, относительному расходу перекачиваемого потока (ко-

эффициент эжекции) и по относительному давлению на выходе из нагнетателя наилучшей конструкцией является конструкция f1. Все показатели отнесены к наилучшим показателям конструкции f1. Т.е. значения КПД, показанные на рис. 5 для конструкций f2-f5 показаны по отношению к КПД конструкции f1.

Применение формы вихревой камеры отличной от конструкции f1 приводит к снижению КПД на величину от 20 до 30%. Это происходит за счет значительного снижения коэффициента эжекции нагнетателя (от 15 до 22 %). При этом снижение давления на выходе из нагнетателя происходит незначительное: от 5 до 11 %. Снижение расхода всасывания в устройство для конструкций f2, f5 происходят за

счет столкновения перекачиваемых потоков и потери части их энергии, что может не происходить для вихрекамерных нагнетателей, реализовывающих другой рабочий процесс: работа нагнетателя с использованием дренажного канала.

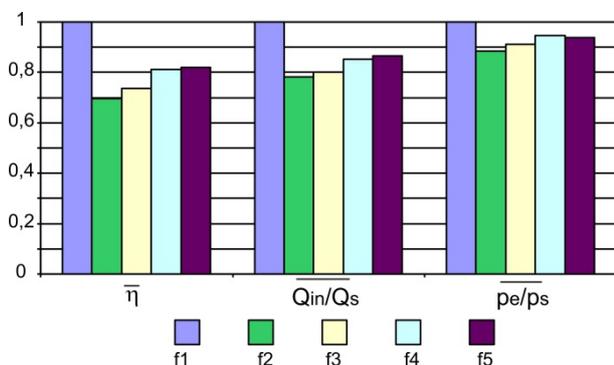


Рис. 5. Сравнение вариаций формы вихревой камеры по основным энергетическим показателям работы вихрекамерного нагнетателя

Так как взаимодействие всасываемых потоков зависит от высоты вихревой камеры и от ее формы, то второй рабочий процесс вихрекамерного нагнетателя может иметь отличающиеся от данного исследования результаты. Эта станет темой дальнейших исследований. Также дополнительного исследования требует определение оптимальной высоты вихревой камеры.

#### Выводы:

1. На основе математического моделирования путем решения уравнений Рейнольдса с использованием SST-модели турбулентности выявлено влияние формы вихревой камеры вихрекамерного нагнетателя на его особенности работы и энергетические характеристики. Получено, что рациональной формой камеры является классическая цилиндрическая вихревая камера.

2. Применение формы вихревой камеры отличной от конструкции f1 приводит к снижению КПД на величину от 20 до 30%. Это происходит за счет значительного снижения коэффициента эжекции нагнетателя (от 15 до 22 %).

3. Локальное уменьшение высоты вихревой камеры приводит к столкновению перекачиваемых потоков, что уменьшает расход всасываемой жидкости и уменьшает КПД. С другой стороны, локальное увеличение высоты вихревой камеры приводит к увеличению трения потока и к большим потерям энергии в вихревой камере.

#### Литература

- Chernetskaya-Beletskaya, N., Rogovyi, A., Shvornikova, A., Baranov, I., Miroshnikova, M., Bragin, N., & Chernetska-Biletskaya, N. Study on the coal-water fuel pipeline transportation taking into account the granulometric composition parameters. 2018. № 7 (4.3). pp. 240-245.

- Ванеев, С. М., Евтушенко, А. А., Сапожников, С. В., & Соляник, В. А. Повышение энергоэффективности насосного оборудования горно-обогатительных комбинатов. Вісник СумДУ. 2008. №2. С. 126-134.
- Tarodiya R., Gandhi V. Hydraulic performance and erosive wear of centrifugal slurry pumps-A review. Powder Technology. vol. 305. 2018. pp. 27-38.
- Соколов Е.Я., Зингер Н.М. Струйные аппараты. 3-е изд., перераб. М.: Энергоатомиздат, 1989. 352 с.
- Роговой А.С. Концепція створення вихорокамерних нагнітачів та принципи побудови систем на їх основі. Вісник СХУ ім. В.Даля. №3 (233). 2017. С. 168-173.
- Семин, Д.А., Левашов, А.Н., Левашов, Я.Н., Роговой, А.С. Экспериментальные исследования рабочих характеристик вихрекамерных нагнетателей с двухсторонним всасыванием. Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. Технічні науки, 16, т. 2, 2016. С. 65-74.
- Rogovyi A. Energy performances of the vortex chamber supercharger. Energy. № 163. 2018. pp. 52-60.
- Сьомін Д.О., Роговий А.С. Вихорокамерні нагнітачі: монографія. Харків: ФОП Мезина В.В. 2017. 204 с.
- Rogovyi, A., Khovansky, S., Grechka, I., Pitel, J. The Wall Erosion in a Vortex Chamber Supercharger Due to Pumping Abrasive Mediums. In Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange. Springer, Cham. 2019. pp. 682-691.
- Роговий А. С. Розробка теорії та методів розрахунку вихорокамерних нагнітачів : дис. ... д-ра техн. наук : спец. 05.05.17 / Харківський нац. автомобільно-дорожній ун-т. Харків, 2017. 364 с.
- Сьомін Д.О., Павлюченко В.О., Ремень В.І., Мальцев Я.І. Сполучення вихрових виконавчих пристроїв із сучасними системами управління. Луганськ: Вид-во СХУ ім. В.Даля, 2002. 174 с.
- Syomin D., Pavljuchenko V., Maltsev Y., Rogovoy A., Dmitrienko D. Vortex executive devices in control systems of fluid mediums. Polish academy of sciences branch in Lublin. TEKA. Commission of motorization and power industry in agriculture. Vol. 9., 2009. pp. 57-62.
- Matveev K.I., Leachman J. Numerical investigation of vortex tubes with extended vortex chambers. International Journal of Refrigeration. 2019. 108. pp. 145-153.
- Rafiee S.E., Sadeghiazad M.M. Three-dimensional CFD simulation of fluid flow inside a vortex tube on basis of an experimental model-The optimization of vortex chamber radius. International Journal of Heat and Technology. 2016. 34(2). pp. 236-244.
- Krol O.S., Sokolov V.I. 3D Modeling Of Machine Tools For Designers: monograph. Sofia: Prof. Marin Drinov Academic Publishing House of Bulgarian Academy of Sciences. 2018. 140 p.
- Krol O., Sokolov V. 3D modelling of angular spindle's head for machining centre. In Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1278, No.1, pp. 012002.
- Sokolov V. Diffusion of circular source in the channels of ventilation systems. In International Conference on Engineering Research and Applications. 2018. pp. 278-283.
- Mochalin I., Shi-Ju E., Wang D., Cai J.C. Numerical study of heat transfer in a Taylor-Couette system with forced radial throughflow. International Journal of Thermal Sciences. 2020. 147. pp. 106142.
- Besagni G., Inzoli F. Computational fluid-dynamics modeling of supersonic ejectors: Screening of turbulence modeling approaches. Applied Thermal Engineering. 2016. Vol. 117. pp. 122-144.

20. Blocken B. Computational Fluid Dynamics for urban physics: Importance, scales, possibilities, limitations and ten tips and tricks towards accurate and reliable simulations. *Building and Environment*. 2015. 91. 219-245.
21. Rogovyi A.S. Verification of Fluid Flow Calculation in Vortex Chamber Superchargers. *Автомобильный транспорт*. 2016. Вып. 39. С. 39-46.
22. Rogovyi A.S., Voronova Ye. Comparative Analysis Of Performance Characteristics Of Jet Vortex Type Superchargers. *Автомобильный транспорт*. 2016. Вып. 38. С. 93-98.
23. Menter F.R. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications. *AIAA Journal*. – 1994. V. 32(8). pp. 1598-1605.
24. 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. pp. 150-165.
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. №. 4. pp. 041010.
26. Jasak H. OpenFOAM: open source CFD in research and industry. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. 2009. 1(2). pp. 89-94.
27. Papakonstantinou T., Grigoropoulos G., Papadakis G. Marine propeller optimization using open-source CFD In Sustainable Development and Innovations in Marine Technologies: Proceedings of the 18th International Congress of the Maritime Association of the Mediterranean (IMAM 2019), September 9-11, 2019, Varna, Bulgaria, P.252.
28. Huang S., Wei Y., Guo C., Kang W. Numerical Simulation and Performance Prediction of Centrifugal Pump's Full Flow Field Based on Open-FOAM. *Processes* 2019. 7(9). P. 605.
29. Prakash A., Laurendeau E. Consistent surface roughness extension for wall functions. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2020. Vol.82. pp. 108552.
30. Matyushenko A. A., Stabnikov A. S., Garbaruk A. V. Criteria of computational grid generation for turbulence models taking into account laminar-turbulent transition. In *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1400, No. 7. pp. 077047.
31. Han X., Sagaut P., Lucor D. On sensitivity of RANS simulations to uncertain turbulent inflow conditions, *Comput. Fluids*. 2012. Vol. 61. pp. 2-5.
5. Rogovyi A.S. Kontsepsiya stvorenniya vykhorokamernykh nahnitachiv ta pryntsyipy pobudovy system na yikh osnovi. *Visnyk SNU im. V.Dalya*. #3 (233). 2017. S. 168-173.
6. Syomin, D.A., Levashov, A.N., Levashov, Ya.N., Rogovyi, A.S. Eksperimental'nye issledovaniya rabochikh kharakteristik vikhrekamernykh nagnetateley s dvukhstoronnim vsasyvaniem. *Pratsi Tavriys'koho derzhavnogo ahrotekhnolohichnogo universytetu. Tekhnichni nauky*, 16, t. 2, 2016. C. 65-74.
7. Rogovyi A. Energy performances of the vortex chamber supercharger. *Energy*. № 163. 2018. pp. 52-60.
8. Syomin D.O., Rogovyi A.S. Vykhorokamerni nahnitachi: monohrafiya. Kharkiv: FOP Mezina V.V. 2017. 204 s.
9. Rogovyi, A., Khovanskyi, S., Grechka, I., Pitel, J. The Wall Erosion in a Vortex Chamber Supercharger Due to Pumping Abrasive Mediums. In *Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange*. Springer, Cham. 2019. pp. 682-691.
10. Rogovyi A.S. Rozrobka teoriiyi ta metodiv rozrakhunku vykhorokamernykh nahnitachiv : dys. ... d-ra tekhn. nauk : spets. 05.05.17 / Kharkivs'kyi nats. avtomobil'no-dorozhnyi un-t. Kharkiv, 2017. 364 s.
11. Syomin D.O., Pavlyuchenko V.O., Remen' V.I., Mal'tsev Ya.I. Spoluchennya vykhrovykh vykonavchykh prystroyiv iz su-chasnykh systemamy upravlinnya. *Luhans'k: Vydvo SNU im. V.Dalya*, 2002. 174 s.
12. Syomin D., Pavljuchenko V., Mal'tsev Y., Rogovoy A., Dmitrienko D. Vortex executive devices in control systems of fluid mediums. *Polish academy of sciences branch in Lublin. TEKA. Commission of motorization and power industry in agriculture*. Vol. 9., 2009. pp. 57-62.
13. Matveev K.I., Leachman J. Numerical investigation of vortex tubes with extended vortex chambers. *International Journal of Refrigeration*. 2019. 108. pp. 145-153.
14. Rafiee S.E., Sadeghiyazad M.M. Three-dimensional CFD simulation of fluid flow inside a vortex tube on basis of an experimental model-The optimization of vortex chamber radius. *International Journal of Heat and Technology*. 2016. 34(2). pp. 236-244.
15. Krol O.S., Sokolov V.I. 3D Modeling Of Machine Tools For Designers: monograph. Sofia: Prof. Marin Drinov Academic Publishing House of Bulgarian Academy of Sciences. 2018. 140 p.
16. Krol O., Sokolov V. 3D modelling of angular spindle's head for machining centre. In *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1278, No.1, pp. 012002.
17. Sokolov V. Diffusion of circular source in the channels of ventilation systems. In *International Conference on Engineering Research and Applications*. 2018. pp. 278-283.
18. Mochalin I., Shi-Ju E., Wang D., Cai J.C. Numerical study of heat transfer in a Taylor-Couette system with forced radial throughflow. *International Journal of Thermal Sciences*. 2020. 147. pp. 106142.
19. Besagni G., Inzoli F. Computational fluid-dynamics modeling of supersonic ejectors: Screening of turbulence modeling approaches. *Applied Thermal Engineering*. 2016. Vol. 117. pp. 122-144.
20. Blocken B. Computational Fluid Dynamics for urban physics: Importance, scales, possibilities, limitations and ten tips and tricks towards accurate and reliable simulations. *Building and Environment*. 2015. 91. 219-245.
21. Rogovyi A.S. Verification of Fluid Flow Calculation in Vortex Chamber Superchargers. *Автомобильный транспорт*. 2016. Вып. 39. С. 39-46.

#### References

1. Chernetskaya-Beletskaya, N., Rogovyi, A., Shvornikova, A., Baranov, I., Miroshnikova, M., Bragin, N., & Chernetska-Biletskaya, N. Study on the coal-water fuel pipeline transportation taking into account the granulometric composition parameters. 2018. № 7 (4.3). pp. 240-245.
2. Vaneev, S. M., Evtushenko, A. A., Sapozhnikov, S. V., & Solyanik, V. A. Povyshenie energoefektivnosti nasosnogo oborudovaniya gornoobogatitel'nykh kombinatov. *Visnyk SumDU*. 2008. №2. S. 126-134.
3. Tarodiya R., Gandhi B. Hydraulic performance and erosive wear of centrifugal slurry pumps-A review. *Powder Technology*. vol. 305. 2018. pp. 27-38.
4. Sokolov E.Ya., Zinger N.M. *Struynye apparaty*. 3-e izd., pererab. M.: Energoatomizdat, 1989. 352 s.

22. Rogovyi A.S., Voronova Ye. Comparative Analysis Of Performance Characteristics Of Jet Vortex Type Superchargers. Автомобильный транспорт. 2016. Вып. 38. С. 93–98.
23. Menter F.R. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications. AIAA Journal. – 1994. V. 32(8). pp. 1598-1605.
24. 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. pp. 150-165.
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. №. 4. pp. 041010.
26. Jasak H. OpenFOAM: open source CFD in research and industry. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. 2009. 1(2). pp. 89-94.
27. Papakonstantinou T., Grigoropoulos G., Papadakis G. Marine propeller optimization using open-source CFD In Sustainable Development and Innovations in Marine Technologies: Proceedings of the 18th International Congress of the Maritime Association of the Mediterranean (IMAM 2019), September 9-11, 2019, Varna, Bulgaria, P.252.
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. 7(9). P. 605.
29. Prakash A., Laurendeau E. Consistent surface roughness extension for wall functions. International Journal of Heat and Fluid Flow. 2020. Vol.82. pp. 108552.
30. Matyushenko A. A., Stabnikov A. S., Garbaruk A. V. Criteria of computational grid generation for turbulence models taking into account laminar-turbulent transition. In Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1400, No. 7. pp. 077047.
31. Han X., Sagaut P., Lucor D. On sensitivity of RANS simulations to uncertain turbulent inflow conditions, Comput. Fluids. 2012. Vol. 61. pp. 2–5.

**Роговий А.С. Дослідження впливу форми вихрової камери на параметри роботи вихорокамерного нагнітача.**

На основі вирішення рівнянь Нав'є-Стокса, осереднених за Рейнольдсом виявлено вплив форми вихрової камери вихорокамерного нагнітача на його особливості роботи й енергетичні характеристики. Отримано, що раціональною формою камери є класична циліндрична вихрова камера. Застосування форми вихрової камери відмінної від класичної конструкції приводить до зниження ККД на величину від 20 до 30%. Це відбувається за рахунок значного зниження коефіцієнта ежекції нагнітача (від 15 до 22 %). Локальне зменшення висоти вихрової камери приводить до зіткнення потоків, що перекачуються, що зменшує витрату всмоктуваної рідини й зменшує ККД. З іншого боку, локальне збільшення висоти ви-

хрової камери приводить до збільшення тертя потоку й до більших втрат енергії у вихровій камері.

**Ключові слова:** чисельний розрахунок, вихорокамерний нагнітач, струминна техніка, математичне моделювання, форма вихрової камери

**Rogovyi A.S. The investigation of the vortex chamber form influence on the vortex chamber superchargers operation parameters.**

*Pumping solid abrasive particles in many industries is causing rapid wear on pumping equipment. The abrasive wear of the seals and the working parts of the dynamic pumps leads to energy performance degradation and to the significant reduction in the lifetime. Classic jet superchargers have fairly low workflow performance. The efficiency of the direct-flow jet pump does not exceed 30%. It contains the spread of jet technology for pumping bulk solids. Vortex chamber pumps are new pumps created on the basis of using the positive properties of jet and centrifugal pumps. These pumps, in contrast to direct-flow jet, allow pumping hard abrasive mediums with greater efficiency.*

*It is known that the shape of the vortex chamber rather strongly affects the performance of vortex devices, such as vortex valves, cyclones, vortex tubes, etc.*

*The aim of the work is to assess the influence of the vortex chamber form of the vortex chamber supercharger on its energy characteristics and hydrodynamic parameters.*

*The mathematical model has consisted of the Navier-Stokes equations averaged by Reynolds, a turbulence model adjusted for the curvature of streamlines, and continuity equation. For calculations, the OpenFoam software package was used, which allows to obtain reliable results and is distributed under the terms of the GPL version 2 license of the Free Software Foundation (FSF).*

*The shape of the vortex chamber affects the interaction of axial flows sucked by the supercharger, which, in turn, affects the energy performance.*

*The influence of the vortex chamber form of the vortex chamber supercharger on its operation parameters and energy characteristics is discovered. It was found that the classical cylindrical vortex chamber is the rational form of the vortex chamber. The use of a vortex chamber form different from classical design leads to a decrease in efficiency by 20 to 30%. This is due to a significant decrease in the ejection coefficient of the supercharger (from 15 to 22%). A local decrease in the height of the vortex chamber leads to a collision of the pumped flows, which reduces the flow rate of the suction fluid and reduces the efficiency. On the other hand, a local increase in the height of the vortex chamber leads to an increase in the friction of the flow and to energy loss in the vortex chamber.*

**Keywords:** numerical calculation, vortex chamber supercharger, jet technology, mathematical modeling, form of the vortex chamber.

**Роговий А.С.** – д.т.н., доц., професор кафедри теоретичної механіки та гідравліки, ХНАДУ, м. Харків, Україна.

Стаття подана 05.04.2020