

ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИСТЕЧЕНИЯ ЗАКРУЧЕННОЙ ЗАТОПЛЕННОЙ СТРУИ

Роговой А. С.¹,

¹Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

Аннотация. На основе численного моделирования исследована возможность сохранения энергии закрученной струи. Приведено сравнение применения SST-модели турбулентности с использованием поправки на кривизну линий тока и вращение потока и без него. Проанализировано вычисление степени закрутки потока и его влияние на характеристики.

Ключевые слова: закрученные течения, конфузор, численное моделирование, турбулентность, степень закрутки.

Введение

Закрученные течения являются одними из самых распространенных в природе. Они встречаются в некоторых природных явлениях и часто используются в технике: гидроциклоны, пылеуловители, сжигание топлива, вихревые клапаны, струйные эжекторы, миксеры и центрифуги [1–5]. В отличие от классических потоков без закрутки, которые в большинстве случаев можно рассчитать с помощью довольно простых уравнений, закрученные течения требуют расчетов с помощью уравнений Навье–Стокса, или значительных упрощений для асимптотических решений [6].

Анализ публикаций

В практике проектирования вихревых устройств часто приходится сталкиваться с закрученной затопленной струей [7]. В отличие от прямоточной затопленной струи, для которой существуют зависимости для расчета основных параметров, для закрученной струи необходимо каждый раз проводить новые расчеты с учетом степени закрутки [8]. На сегодняшний день проведено много экспериментальных и численных исследований такого течения и получено большое число зависимостей, которые могут помочь исследователям оценить основные параметры [9, 10]. Но если хоть один из параметров выходит за рамки исследованных в этих работах, то приходится проводить самостоятельные расчеты или эксперимент. Проведение самостоятельных расчетов требует разработки адекватных алгоритмов и методик расчета закрученных струй с возможностью качественной оценки параметров минимальными вычислительными ресурсами.

Исследование затопленной струи имеет не только теоретический интерес, но и практи-

ческое значение. Во многих гидравлических устройствах возникает необходимость использования энергии закрученной струи: вихрекамерные нагнетатели, турбины, насосы, циклоны [1–11]. Чаще всего закрученный поток или выбрасывается наружу, или используется не в полной мере с помощью направляющих аппаратов. С другой стороны, использование классических методов направления потоков имеет недостатки при использовании их для закрученных течений. Даже применение конфузора приводит к возникновению «вихревого эффекта конфузора» [12]. Существуют два подхода к исследованию вращающихся потоков: экспериментальный и расчетный при помощи вычислительной гидродинамики [13]. На сегодняшний день проведено огромное количество исследований когерентных вихревых структур, возникающих при истечении закрученных струй [8–10]. Однако до сих пор нет четкого понимания особенностей их вращения и их количества в зависимости от степени закрутки.

Кроме того, довольно усложнено применение результатов этих работ, полученных зачастую с помощью современных методов экспериментальных и численных исследований (PIV-техники, DNS и LES методы численного анализа) с инженерными целями. Поэтому актуальным становится поиск процедур адекватного численного расчета и их применение в инженерном анализе, особенно при введении во вращающийся поток внешних проточных частей, например диффузоров и конфузоров.

При оптимизации параметров течения наилучшим способом являются CFD-расчеты с дальнейшей проверкой адекватности экспериментальными исследованиями [14].

Цель и постановка задачи

Целью работы стало исследование работы конфузора на закрученных течениях с помощью численного моделирования путем решения осредненных уравнений Навье-Стокса. Исследование истечения закрученной струи поможет определить влияния основных параметров струи на возможность сохранения энергии закрученного потока и ее использование в дальнейшем.

Степень закрутки потока

Сложность прогнозирования параметров течения закрученной струи связана с тем, что наблюдается, по меньшей мере, четыре различных варианта поведения струи в зависимости от ее степени закрутки, что проиллюстрировано на рис. 1 [15].

Для зонального математического моделирования раньше имело значение, какой из четырех случаев имеет место; для CFD-моделирования это уже практически не имеет значения.

Вообще говоря, основные гидродинамические параметры затопленной струи зависят от степени закрутки потока. С увеличением закрутки увеличивается приосевая зона низкого давления и течения в обратном направлении [15]. Формирование обратноподвижного течения зависит от нескольких параметров, которые чаще всего объединяют в один комплекс и называют коэффициентом закрутки или степенью закрутки потока. Тот или иной коэффициент закрутки используют в зависимости от способа закручивания потока [16].

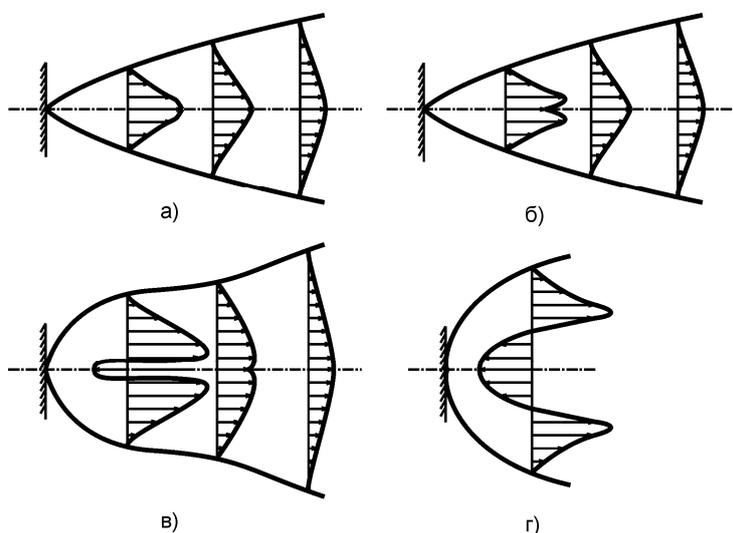


Рис. 1. Эпюры аксиальной скорости свободной затопленной струи разной степени закрутки: а) слабо закрученная струя; б) умеренно закрученная струя; в) сильно закрученная струя; г) сильно закрученная разомкнутая струя

Закрутку потока можно создать с помощью завихрителей (рис. 2). По месту расположения завихрителей можно разделить на аппараты с торцевым завихрителем и с завихрителем, расположенным на цилиндрической поверхности канала. Завихрители могут быть лопастными, щелевыми, улиточными, тангенциальными с одним или несколькими патрубками [16].

В первые годы исследований закрученных струй в качестве оценки степеней закрутки использовали геометрические параметры завихрителей, но этот подход позднее привел к невозможности сравнения характеристик течений вследствие использования разных способов создания закрутки. Для упрощения в

большом количестве публикаций для вихревых камер используют число Россби [16, 17]. Число Россби и степень вращения жидкости определяют отношением радиальной к тангенциальной составляющей скорости возле цилиндрической поверхности камеры. Кроме того, для вращающихся потоков степень закрутки можно определить двумя способами: отношением тангенциальной скорости к радиальной (спиральное движение) или отношением тангенциальной скорости к аксиальной (винтовое движение) [18]. Часто, для простоты расчета, особенно в вихревых камерах, используют следующее число, характеризующее степень закрутки:

$$K = \frac{V_\tau}{V_z}, \quad (1)$$

где V_τ – тангенциальная скорость; V_z – аксиальная скорость.

Во многих случаях, а особенно когда сравнивают ограниченные и неограниченные

закрученные течения, такое легковычисляемое число Россби не подходит для сравнения потоков. Поэтому позднее начали использовать интегральные параметры с учетом относительной величины потока импульса в тангенциальном направлении, а также циркулирующую скорость.

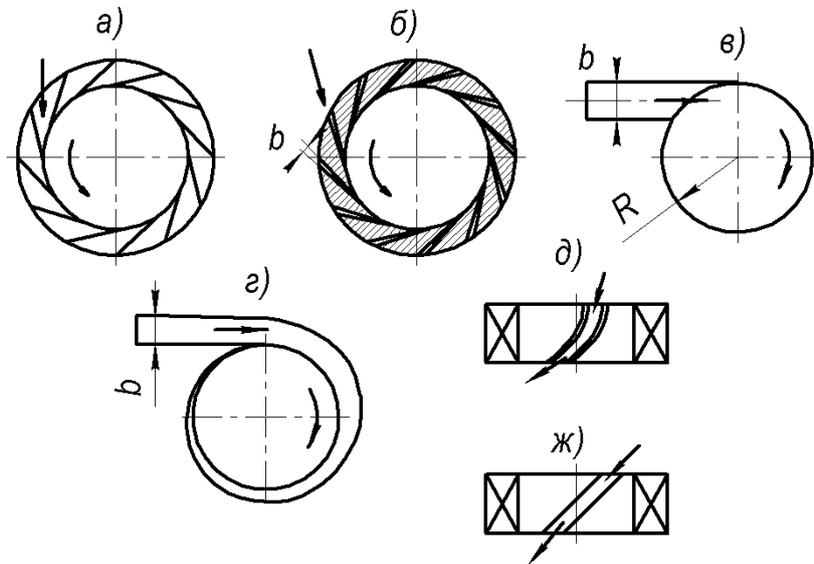


Рис. 2. Завихрители: а – лопастной; б – щелевой; в – с тангенциальным патрубком; г – улиточный; д, ж – торцевые лопастные

В качестве единого параметра, который наиболее полно учитывает основные особенности закрученных течений независимо от способа их генераций, целесообразно использовать интегральный параметр закрутки S (параметр Хигера–Бера) [19].

$$S = \frac{\int_0^R \rho V_\tau V_z r^2 dr}{R \int_0^R \rho V_z^2 r dr}, \quad (2)$$

где ρ – плотность жидкости; R – радиус канала.

По своей сущности интегральный параметр закрутки характеризует относительную величину потоков импульса, которые переносятся в угловом и аксиальном направлениях, и именно этот параметр использован в большинстве публикаций посвященных закрученным течениям как у нас в стране, так и за рубежом [8–10, 15–17, 19].

Сложность использования данного критерия, по сравнению с числом Россби, заключается в невозможности его предварительно-

го моделирования в экспериментальных или численных исследованиях. Если параметры, входящие в формулу (1), легко задать при моделировании, то интегралы, входящие в уравнение (2), предварительно рассчитать не представляется возможным вследствие сложных зависимостей скоростей (особенно тангенциальной) от радиуса. Поэтому, наиболее часто, сначала выполняют эксперимент или численный расчет, а уже затем рассчитывают параметр закрутки, что усложняет сравнение по такому критерию. В некоторых случаях, для упрощения сравнения течений, параметр Хигера–Бера на предварительном этапе можно рассчитать следующим образом. Аксиальную скорость V_z , с высокой степенью вероятности, можно считать не зависящей от радиуса. Тангенциальная скорость на программном уровне, при моделировании, с помощью пакетов программ CFD-расчетов может быть задана по зависимостям квазитвердого вращения $V_\tau = \omega r$, хотя это может быть справедливым только в ядре вращения. Очевидно, что такое задание тангенциальной скорости имеет достаточно большую погрешность определения

степени закрутки, однако, на предварительном этапе, до оценки результатами расчета, такой способ может быть вполне приемлемым. Тогда, для несжимаемой жидкости:

$$Y = \frac{\int_0^R \rho V_\tau V_z r^2 dr}{R \int_0^R \rho V_z^2 r dr} = \frac{\rho V_\tau \int_0^R \omega r^3 dr}{R \rho V_z^2 \int_0^R r dr} = \frac{\omega \int_0^R r^3 dr}{R V_z \int_0^R r dr} = \frac{2\omega R^4}{4R V_z R^2} = \frac{V_\tau}{2V_z}.$$

Значение, полученное с помощью преобразований (3), близко к значению (1) за исключением множителя 2.

Особенности моделирования течения

На сегодняшний день существует довольно большое количество программных вычислительных комплексов для проведения CFD-расчетов, которые включают в себя много разных моделей турбулентности на платной и бесплатной основе [20]. Использование данных комплексов предполагает предварительную подготовку геометрии проточной части с помощью пакетов 3D-моделирования геометрии [21]. Многие авторы приходят к выводу, что одной из наилучших по вычислительным затратам и погрешностям расчета моделей турбулентности является модифицированная двухслойная « $k-\omega$ » модель турбулентности переноса сдвиговых напряжений Ментера (SST модель [22–24]), учитывающая особенности течения возле твердых стенок и во внешнем потоке. В то же время, применение прямого моделирования турбулентности (DNS) и моделирование больших вихрей (LES), а также гибридных моделей может приводить к более точным решениям [25], однако это часто приводит к очень большим вычислительным затратам сейчас и будет к ним приводить еще какое-то время в ближайшей перспективе. В данной работе было сделано сравнение применения SST-модели с учетом корректировки на кривизну линий тока и без ее применения на основе подхода вычисления RANS-уравнений.

С системой уравнений SST модели с корректировкой на кривизну линий тока и вращением потока можно ознакомиться в работах [11, 18, 24, 26].

Математическое моделирование течения выполнено с такими граничными условиями: на твердой стенке – условие прилипания

жидкости $\vec{V}|_b = 0$, во входном сечении задавалось значение двух компонент скорости: аксиальной и тангенциальной $V_\tau = \omega r$, в выходных каналах – равенство нулю давления $p|_b = 0$. Решение задачи осуществлено в пакете программ OpenFoam [20]. Расчет проведен в стационарной постановке для несжимаемой жидкости – воды.

Использовался стандартный солвер OpenFoam на основе метода контрольных объемов и PISO-алгоритма. Расчет продолжался до снижения невязок всех уравнений до значений 10^{-5} . Все сеточные разбиения обеспечивали параметр $y^+ < 2$.

Сравнение результатов использования корректировки модели турбулентности

Влияние корректировки, введенной в модель турбулентности, показано на рис. 3. Ее использование не приводит к значительным изменениям в картине течения затопленной струи. Корректировка приводит к небольшому увеличению области закрученного течения (рис. 3, б).

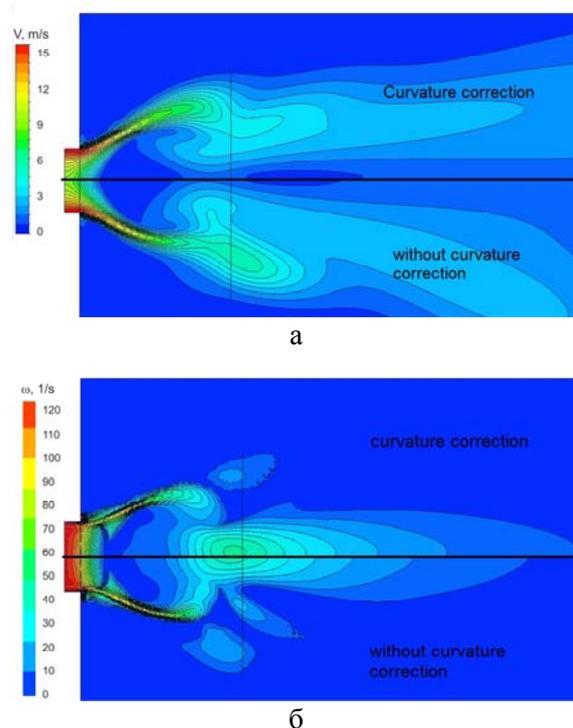


Рис. 3. Сравнение результатов расчета при использовании корректировки на кривизну линий тока: а – распределение скорости; б – интенсивность вихрей

Хотя использование SST-модели турбулентности не приводит к полному совпаде-

нию расчетных данных с результатами эксперимента, однако применение модели с ее использованием вполне корректно предсказывает вихревые структуры вблизи оси. Таким образом, можно сделать вывод о желательном использовании корректирования.

На рис. 4 представлено распределение векторов скорости струи. Сравнение векторного поля с рис. 1 показывает, что полученная картина течения соответствует сильно закрученной струе с формированием зоны обратного течения. Применение RANS-подхода с использованием скорректированной SST-модели турбулентности позволяет достаточно быстро, с помощью компьютеров средней мощности определять все основные характеристики закрученного потока.

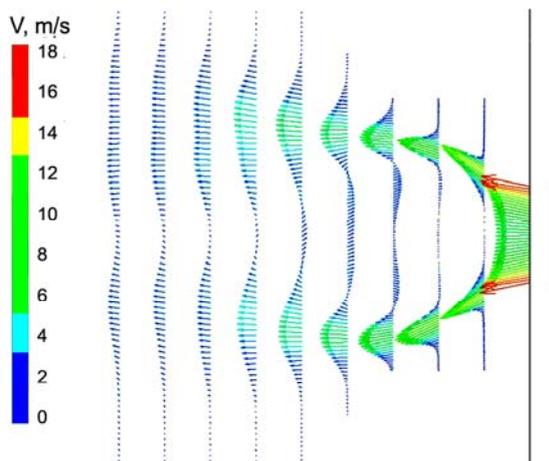


Рис. 4. Векторное поле скорости

На рис. 5 приведено сравнение скоростей потока закрученной затопленной струи при одной степени закрутки. Степень закрутки двух разных случаев моделировалась одновременным изменением диаметра выходного сопла, угловой скорости вращения входного потока и аксиальной скорости.

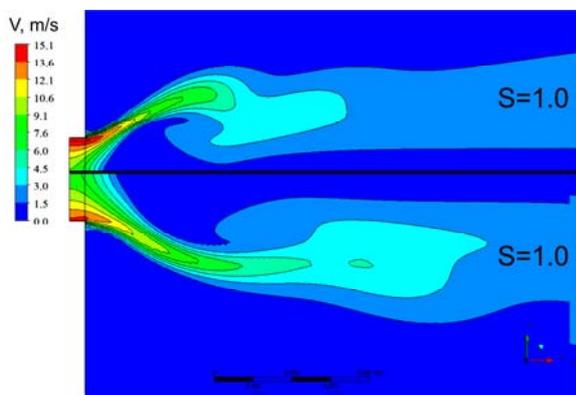


Рис. 5. Сравнение результатов расчета двух разных случаев истечения закрученной струи с одной степенью закрутки

Хотя в литературе степень закрутки выбрана как основной параметр для сравнения, рис. 5 показывает, что при изменении основных параметров, входящих в формулу для определения критерия закрутки (2), в абсолютных единицах измерения, картины течения могут отличаться, что требует определенного внимания при использовании опубликованных результатов исследования закрученных течений инженерами. Это также подтверждает необходимость самостоятельных расчетов при изменении размеров выходного сопла для оценки степени затухания струи и скоростей в абсолютных единицах.

Более корректным будет использование всех параметров закрученного течения, относенных к линейным размерам.

Результаты расчетов течения закрученной струи через конфузор

По определению, конфузор – это напорная труба, сужающаяся по течению. Для прямонаправленных потоков движение жидкостей в конфузоре сопровождается увеличением скорости и падением давления.

Сопротивление конфузора при равных геометрических соотношениях всегда меньше, чем в диффузоре. Закрученное течение значительно влияет на указанные выше заключения, вследствие изменения давления в поперечном сечении и возникновения снижения давления возле оси, а также увеличения его на периферии, что является следствием действия центробежной силы. Степень влияния центробежной силы может быть оценена при помощи коэффициента закрутки потока ($S = 1, 4$).

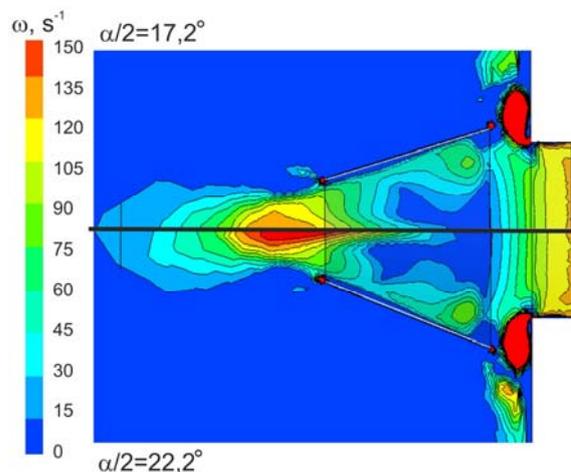


Рис. 6. Интенсивность вихрей в струе при прохождении конфузора разного угла

В данной работе рассмотрено использование двух конфузоров с разным углом раскрытия для направления закрученной затопленной струи, с той степенью закрутки, которая имеет место в вихрекамерных нагнетателях [26].

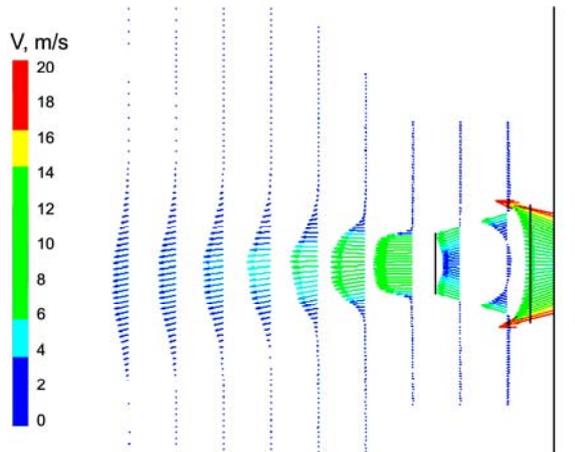


Рис. 7. Векторное поле скорости

Векторы скорости для течения через конфузор (рис. 7) показывают, что конфузор позволяет во многом выпрямить поток, и эпюра скорости на выходе из конфузора выглядит как эпюра скорости незакрученной затопленной струи.

Выводы

Численными расчетами исследовано течение затопленной закрученной струи.

1. Оценено влияние корректировки на кривизну линий тока и вращение потока SST-модели турбулентности. Корректировка позволяет достаточно быстро, с помощью компьютеров средней мощности, определять все основные характеристики закрученного потока.

2. Хотя степень закрутки выбрана как основной параметр для сравнения, исследования показали, что при изменении основных параметров, влияющих на степень закрутки в абсолютных единицах измерения картины течения, могут отличаться, что требует определенного внимания при использовании опубликованных результатов исследования закрученных течений инженерами. Это также подтверждает необходимость самостоятельных расчетов при изменении размеров выходного сопла для оценки степени затухания струи и скоростей в абсолютных единицах.

Литература

1. Valera-Medina A., Viguera-Zuniga M. O., Baej H., Syred N., Chong C. T., Bowen P. J. Outlet geometrical impacts on blowoff effects when using various syngas mixtures in swirling flows. *Applied energy*, 2017. No 207. P. 195–207.
2. Wei X. G., Li J., He G. Q. Swirl Characteristics of Vortex Valve Variable-Thrust Solid Rocket Motor. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 2018. Vol. 11(1). P. 205–215.
3. Syomin D., Rogoyi A. Features of a working process and characteristics of irrotational centrifugal pumps. *Procedia Engineering*, 2012. No 39. P. 231–237.
4. Pitsukha E. A., Teplitskii Y. S., Buchilko É. K. Mixing of Bottom and Tangential Air in a Cyclone-Fluidized Bed Chamber. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2018. Vol. 91(3). P. 696–704.
5. Yin J., Qian Y., Zhang T. & Wang D. Measurement on the flow structure of a gas-liquid separator applied in TMSR. *Annals of Nuclear Energy*, 2019. Vol. 126. P. 20–32.
6. Сёмин Д. А. Асимптотические значения параметров вихревых устройств управляющих транспортированием жидких сред. *Вісник ЧНУ*, 2002. № 6(52). С. 189–196.
7. Rogoyi A. and Khovansky S. Application of the similarity theory for vortex chamber superchargers. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017. Vol. 233. No. 1.
8. Markovich D. M., Abdurakipov S. S., Chikishev, L. M., Dulin, V. M., & Hanjalić, K. Comparative analysis of low-and high-swirl confined flames and jets by proper orthogonal and dynamic mode decompositions. *Physics of Fluids*, 2014. Vol. 26(6), P. 065109.
9. Cozzi, F., Rohit S., G. Solero. Analysis of coherent structures in the near-field region of an isothermal free swirling jet after vortex breakdown. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2019, Vol. 109, P.109860.
10. Syred N. A review of oscillation mechanisms and the role of the precessing vortex core (PVC) in swirl combustion systems. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2006. Vol. 32.2. P.93–161.
11. Rogoyi A. Energy performances of the vortex chamber supercharger. *Energy*. 2018. № 163. P. 52–60.
12. Кузнецов В. И. Некоторые предложения к варианту дифференциального уравнения физического процесса вихревой эффект конфузора. *Омский научный вестник*. 2015. №1 (137). С. 33–37.
13. Babenko, V. V., Blohin, V. A., Voskoboinick, A. V., Turick, V. N. Velocity Fluctuations in a Swirling Jet of a Vortex Chamber. *International Journal of Fluid Mechanics Research*. 2005. Vol. 32. No. 2. P. 184–198.
14. Evdokimov O. A., Piralishvili S. A., Veretennikov S. V., Guryanov A. I. CFD

Simulation of a Vortex Ejector for Use in Vacuum Applications. *In Journal of Physics: Conference Series*. 2018. Vol. 1128, No. 1, P. 012127.

15. Пиралишвили Ш. А., Поляев В. М., Сергеев М. Н. *Вихревой эффект. Эксперимент, теория, технические решения*. Москва, УНПЦ «Энергомаш», 2000. 412 с.
16. Смульский И. И. *Аэродинамика и процессы в вихревых камерах*. Новосибирск: ВО «Наука». Сибирская издательская фирма, 1992. 301 с.
17. Сьомін Д. О., Роговий А. С., Левашов А. М. Вплив закручення потоку, що перекачується, на енергетичні характеристики вихрекамерних насосів. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. *Збірник наукових праць. Серія: Гідравлічні машини та гідроагрегати*. Харків: НТУ «ХПІ». 2016. № 20 (1192), С. 68–71.
18. Сьомін Д. О., Роговий А. С. *Вихорокамерні нагнітачі: монографія*. Харків: ФОП Мезіна В.В., 2017. 204 с.
19. Митрофанова О. В. *Гидродинамика и теплообмен закрученных потоков в каналах ядерно-энергетических установок*. Москва: Физматлит, 2010. 288 с.
20. He P., Mader C. A., Martins J. R. & Maki K. J. An aerodynamic design optimization framework using a discrete adjoint approach with OpenFOAM. *Computers & Fluids*, 2018. № 168, P. 285-303.
21. Gaydamaka A., Kulik, G., Frantsuzov, V., Hrechka, I., Khovanskyi, S., Rogovyi, A., Svyarenko, M., Maksimova, M., Paraniak, N. Devising an engineering procedure for calculating the ductility of a roller bearing under a no-central radial load. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019, № 3(7-99), P. 6–10.
22. 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. 2020, P. 682–691.
23. Menter FR. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications *AIAA Journal*. 1994. V. 32(8). P. 1598–1605.
24. 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. P. 041010.
25. Yin J., Jiao L., Wang L. Large eddy simulation of unsteady flow in vortex diode. *Nuclear Engineering and Design*, 2010. Vol. 240(5), P. 970–974.
26. Rogovyi A. Use of detached-eddy simulation method (DES) in calculations of the swirled flows in vortex apparatuses. *Teka Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa*, 2016. Vol. 16, No 3. P. 57–62.

References

1. Valera-Medina A., Viguera-Zuniga M. O., Baej H., Syred N., Chong C. T., Bowen P. J. (2017) Outlet geometrical impacts on blowoff effects when using various syngas mixtures in swirling flows. *Applied energy*, 207, 195-207.
2. Wei X. G., Li J., He G. Q. (2018) Swirl Characteristics of Vortex Valve Variable-Thrust Solid Rocket Motor. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 11(1), 205-215.
3. Syomin D., Rogovyi A. (2012) Features of a working process and characteristics of irrotational centrifugal pumps. *Procedia Engineering*, 39, 231-237.
4. Pitsukha E. A., Teplitskii Y. S., Buchilko É. K. (2018) Mixing of Bottom and Tangential Air in a Cyclone-Fluidized Bed Chamber. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 91(3), 696-704.
5. Yin J., Qian Y., Zhang T., Wang D. (2019). Measurement on the flow structure of a gas-liquid separator applied in TMSR. *Annals of Nuclear Energy*, 126, 20-32.
6. Syomin D. A. (2002). Asimptoticheskie znacheniiia parametrov vikhrevykh ustroystv upravliaiushchikh transportirovaniem zhidkikh sred. [Asymptotic values of the parameters of vortex devices controlling the transportation of liquid media]. *Visnyk SNU*, 6(52), 189-196. [in Russian]
7. Rogovyi A., Khovanskyi S. (2017) Application of the similarity theory for vortex chamber superchargers. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 233(1).
8. Markovich D. M., Abdurakipov S. S., Chikishev L. M., Dulin V. M., Hanjalić K. (2014) Comparative analysis of low-and high-swirl confined flames and jets by proper orthogonal and dynamic mode decompositions. *Physics of Fluids*, 26(6), 065109.
9. Cozzi F., Rohit S., Solero G. (2019) Analysis of coherent structures in the near-field region of an isothermal free swirling jet after vortex breakdown. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 109, 109860.
10. Syred N. (2006) A review of oscillation mechanisms and the role of the precessing vortex core (PVC) in swirl combustion systems. *Progress in Energy and Combustion Science*. 32.2, 93-161.
11. Rogovyi A. (2018) Energy performances of the vortex chamber supercharger. *Energy*, 163, 52-60.
12. Kuznetsov V. I. (2015) Nekotorye predlozheniia k variantu differentsial'nogo uravneniia fizicheskogo protsessa vikhrevoi effekt konfuzora. [Some suggestions for a variant of the differential equation of a physical process vortex confuser effect]. *Omskii nauchnyi vestnik*. 1(137), 33-37. [in Russian]
13. Babenko V. V., Blohin V. A., Voskoboinick A. V., Turick V. N. (2005). Velocity Fluctuations in a Swirling Jet of a Vortex Chamber.

- International Journal of Fluid Mechanics Research*. 32(2), 184-198.
14. Evdokimov O. A., Piralishvili S. A., Veretennikov S. V., Guryanov A. I. (2018, November). CFD Simulation of a Vortex Ejector for Use in Vacuum Applications. *In Journal of Physics: Conference Series*, 1128 (1), 012127.
 15. Piralishvili Sh. A., Poliaev V. M., Sergeev M. N. (2000). *Vikhrevoi efekt. Eksperiment, teoriia, tekhnicheskie resheniia* [Vortex effect. Experiment, theory, technical solutions]. Moscow, UNPTs Energomash Publ. [in Russian]
 16. Smul'skii I. I. (1992) *Aerodinamika i protsessy v vikhrevykh kamerakh*. [Aerodynamics and processes in vortex chambers]. Novosibirsk, VO «Nauka» Publ. Sibirskaiia izdatel'skaia firma. [in Russian]
 17. Syomin D. O., Rogovyi A. S., Levashov A. M. (2016). Vplyv zakruchennja potoku, shho perekachujet'sja, na energetychni karakterystyky vyhrechamernyh nasosiv. [Effect of swirling flow of pumped flow on the energy performance of vortex pumps]. *Visnyk Nacional'nogo tehničnogo univ'ersytetu «KhPI»*. Zbirnyk naukovykh prac'. Serija: Hidravlični mashyny ta gidroagregaty [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Collection of scientific works. Series: Hydraulic machines and hydraulic units.]. Kharkiv: NTU «KhPI», 20 (1192), 68-71. [in Ukrainian]
 18. Syomin D. O., Rogovyi A. S. (2017) *Vyhorokamerni nagnitachi: monografija*. [Vortex chamber superchargers]. Kharkiv: FOP Mezina V.V. Publ. [in Ukrainian]
 19. Mitrofanova O. V. (2010) *Gidrodinamika i teploobmen zakruchennykh potokov v kanalach iaderno-energeticheskikh ustanovok* [Hydrodynamics and heat transfer of swirling flows in the channels of nuclear power plants]. Moscow: Fiz-matlit Publ, 2010. [in Russian]
 20. He P., Mader C. A., Martins J. R., Maki K. J. (2018). An aerodynamic design optimization framework using a discrete adjoint approach with OpenFOAM. *Computers & Fluids*, 168, 285-303.
 21. Gaydamaka A., Kulik G., Frantsuzov V., Hrechka I., Khovanskyi S., Rogovyi A., Svyarenko M., Maksimova M., Paraniak N. (2019) Devising an engineering procedure for calculating the ductility of a roller bearing under a no-central radial load. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 3(7-99), 6-10.
 22. Rogovyi A., Khovanskyi S., Grechka I., Pitel J. (2020) The Wall Erosion in a Vortex Chamber Supercharger Due to Pumping Abrasive Mediums. *In Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange*. Springer, Cham. 682-691.
 23. Menter FR. (1994) Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications. *AIAA Journal*, 32(8), 1598-1605.
 24. 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), 041010.
 25. Yin J., Jiao L., Wang L. (2010). Large eddy simulation of unsteady flow in vortex diode. *Nuclear Engineering and Design*, 240(5), 970-974.
 26. Rogovyi A. (2016) Use of detached-eddy simulation method (DES) in calculations of the swirled flows in vortex apparatuses. *Teka Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa*, 16(3), 57-62.
- Роговий Андрей Сергеевич**¹, д.т.н., проф. кафедри теоретическої механіки і гідравліки, тел. +38-057-707-37-30, e-mail: asrogovoy@ukr.net. ¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, г. Харків, ул. Ярослава Мудрого, 25.
- Числові дослідження течії закрученого затопленого струменя**
- Анотація.** У природі й техніці часто зустрічаються й використовуються закручені течії. Розмаїтість завдань, що зустрічаються у практиці проектування вихрових пристроїв, часто приводить до необхідності оцінки параметрів затопленого закрученого струменя й необхідності його чисельного розрахунку. Сучасні методи експериментальних і чисельних досліджень вимагають великих витрат фінансових ресурсів і часу на розрахунок. Тому для інженерних цілей потрібні спрощені алгоритми обґрунтованих і адекватних моделей розрахунку параметрів течії з мінімальними обчислювальними витратами, якою є досліджена в роботі модель турбулентності SST з коригуванням на кривизну лінії струму й обертання потоку. Математична модель містить у собі, крім моделі турбулентності, рівняння Нав'є–Стокса, осереднені за Рейнольдсом. У роботі оцінено вплив коригування на кривизну ліній струму й обертання потоку SST-моделі турбулентності. Хоча ступінь закручення обраний як основний параметр для порівняння, дослідження показали, що при зміні основних параметрів, що впливають на ступінь закручення, в абсолютних одиницях виміру, картини течії можуть відрізнятися, що вимагає певної уваги під час використання опублікованих результатів дослідження закручених течій інженерами. Це також підтверджує необхідність самостійних розрахунків при зміні розмірів вихідного сопла для оцінки ступеня загасання струменя і швидкостей в абсолютних одиницях. Розрахунок інтенсивності вихорів при проходженні закрученого струменя через конфузور показав, що більший кут конфузурності приводить до більшого ступеня закручення потоку на виході з нього. Використання конфузора дозволяє випрямити потік, й епіюра швидкості на виході з конфузора виглядає як епіюра швидкості незакрученого затопленого струменя. Коригування моделі турбулентності на кривизну ліній струму й обертання потоку дозволяє досить

швидко, за допомогою комп'ютерів середньої потужності, визначати всі основні характеристики закрученого потоку.

Ключові слова: закручена течія, конфузор, чисельне моделювання, турбулентність, ступінь закручення

Роговий Андрій Сергійович¹, д.т.н., проф. кафедри теоретичної механіки та гідравліки, тел. +38-057-707-37-30, e-mail: asrogovoy@ukr.net.
¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25

Numerical studies of the swirling flooded jet flow through the confuser

Problem. Swirling currents are often found and used in nature and technology. The variety of tasks encountered in the practice of designing vortex devices often leads to the need to evaluate the parameters of a flooded swirling jet and the need for its numerical calculation. Modern methods of experimental and numerical research require large expenditures of financial resources and time for calculation. **Goal.** Therefore, for engineering purposes, simplified algorithms of justified and adequate models for calculating flow parameters with minimal computational costs are required, which are the SST turbulence model investigated in the work, adjusted to rotation and curvature. **Methodology.** The mathematical model includes, in addition to the turbulence model, the Navier-Stokes equations averaged by Reynolds.

Results. The influence of the rotation-correction of the SST turbulence model is estimated. Although the swirl number is chosen as the main parameter for comparison, studies have shown that when the main parameters affecting the swirl number change in absolute units, the flow patterns may differ, which requires some attention when using the published study by engineers. This also confirms the need for independent calculations when changing the size of the output nozzle to assess the degree of jet attenuation and velocities in absolute units. **Originality.** The calculation of the vortex intensity during the passage of the swirling jet through the confuser showed that a larger confuser angle leads to a greater degree of swirling of the flow at the exit from it. **Practical value.** Using a confuser allows to straighten the flow, and the velocity distribution at the exit from the confuser looks like the velocity distribution of an untwisted flooded jet. The rotation-curvature correction allows us to quickly determine all the main characteristics of the swirl flow with the help of medium power computers.

Key words: swirling flows, confuser, numerical simulation, turbulence, swirl number.

Rogovyi Andrii¹, professor, Doct. Of Science, Theoretical Mechanics and Hydraulics Department, tel. +38-057-707-37-30, e-mail: asrogovoy@ukr.net.

¹Kharkiv National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.