

Л. Р. Минibaева, А. В. Клинов

РАСЧЕТ ГЕЛИКОИДНЫХ РАСХОДОМЕРОВ МЕТОДАМИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ГИДРОДИНАМИКИ

Ключевые слова: вычислительная гидродинамика, Ansys Fluent, геликоидный расходомер, К-фактор (или коэффициент преобразования).

С привлечением комплекса вычислительной гидродинамики Ansys Fluent 2020 R2 разработана методика расчета трехмерного поля скорости в турбинных расходомерах геликоидного типа, основанная на уравнении баланса моментов, т.е. равенстве крутящего момента тормозящим моментам, приложенным к турбинке, что достигается при равновесной скорости вращения для заданного постоянного объемного расхода (что выполняется при равенстве нулю углового ускорения). При постоянном расходе при изменении числа оборотов ротора определяется момент на лопасти ротора. Находится такое значение чисел оборотов, при котором момент меняет знак. Зависимость момента от числа оборотов наносится на график и определяется истинное число оборотов, при котором момент равен нулю для данного расхода. Основой математического описания турбулентного трехмерного течения в расходомерах является система дифференциальных уравнений сохранения массы (уравнение неразрывности), импульса и стандартная $k-\omega$ модель турбулентности (основанная на модели Уилкокса) с частными производными в цилиндрических координатах в трехмерной постановке задачи. Заложенный в вычислительный комплекс Ansys Fluent метод множества систем отсчета позволяет свести задачу, в которой присутствуют неподвижные и вращающиеся элементы, к стационарной. Численный расчет проводился при различных значениях расхода (от 354 до 1982 м³/ч) и кинематической вязкости (от 0,2 до 140 сСт). Определены основные характеристики турбинных расходомеров: коэффициент преобразования (или К-фактора), числа Струхала и Рошко. Наибольшее расхождение численного расчета от экспериментальных данных по значению К-фактора получено при малых расходах и при наибольшей вязкости 140 сСт (которая выходит за область применения исследуемого расходомера) и составляет не более 5%.

L. R. Minibaeva, A. V. Klinov

CALCULATION OF TURBINE FLOWMETERS BY COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS METHODS

Keywords: computational fluid dynamics, Ansys Fluent, helicoid flow meter, K-factor (or specific meter factor).

Using the Ansys Fluent 2020 R2 computational fluid dynamics suite, a method for calculating the three-dimensional velocity field in helicoid-type turbine flowmeters has been developed, based on the torque balance equation, i.e. the equality of the driving and retarding torques on the turbine, which is achieved at an equilibrium rotation speed for a given constant volumetric flow rate (which is fulfilled when the angular acceleration is equal to zero). At constant flow rate, when the rotor speed changes, the moment on the rotor blade is determined. The value of the speed is found at which the moment changes sign. The dependence of the torque on the number of revolutions is plotted on a graph and the true number of revolutions is determined at which the torque is zero for a given flow rate. The basis for the mathematical description of turbulent three-dimensional flow in flow meters is a system of differential equations of conservation of mass (continuity equation), momentum and the standard $k-\omega$ turbulence model (based on the Wilcox model) with partial derivatives in cylindrical coordinates in a three-dimensional problem setting. The multiple reference frame method incorporated into the Ansys Fluent computing suite allows reducing a problem involving stationary and rotating elements to a stationary one. The numerical calculation was performed at various flow rates (from 354 to 1982 m³/h) and kinematic viscosity (from 0.2 to 140 cSt). The main characteristics of turbine flowmeters are determined: the specific meter factor (or K-factor), Strouhal and Roschko numbers. The greatest discrepancy between the numerical calculation and the experimental data on the K-factor value is obtained at low flow rates and at the highest viscosity of 140 cSt (which is beyond the scope of application of the researched flowmeter) and is no more than 5%.

Введение

Изучением гидродинамики в расходомерах турбинного типа с использованием комплексов вычислительной гидродинамики (ВГД) заинтересовались относительно недавно, первые опубликованные работы датируются началом 2000-х гг. [1-5]. Об этом также свидетельствует справочник 2001 года выпуска Flow Measurement Handbook [6], в котором нет работ, посвященных вышеупомянутым исследованиям и автор указывает на то, что в последние годы ведутся работы и ему бы хотелось их увидеть в новом справочнике. Рост количества исследований по гидродинамике в турбинных расходомерах с привлечением вычислительных методов говорит об актуаль-

ности данной темы и в настоящий момент [1,7-8]. Однако в открытой литературе найдено всего несколько работ, связанных с численным расчетом геликоидных расходомеров [9-11]. Возможно, это связано с тем, что последние широко стали применять в нефтяной отрасли, оперирующей высоковязкими средами, лишь с 90-х годов XX века [12-14].

В перечисленных выше работах приводятся результаты по полям скорости и давления, а также величина К-фактора (или коэффициента преобразования) и других интегральных характеристик. Разница между экспериментальными данными и результатами численного расчета по К-фактору составляет не более 10 %.

К-фактор определяется как

$$K_f = \frac{N\omega}{2\pi Q},$$

где N – количество лопастей турбины, ω – число оборотов, рад/с, K_f – К-фактор, пульс/м³, Q – расход, м³/с.

Турбинные расходомеры извлекают небольшую часть кинетической энергии из текущей жидкости для вращения ротора, подвешенного в потоке. Лопастей, установленные под углом относительно направления потока жидкости, приводятся в действие крутящим моментом, создаваемым текущей жидкостью, что приводит к вращению ротора вокруг оси, который вращается на небольших шарикоподшипниках с низким коэффициентом трения. Когда жидкость движется быстрее (более высокая осевая скорость), ротор вращается быстрее в ответ на более высокий крутящий момент, создаваемый потоком. Осевая скорость жидкости пропорциональна объемному расходу. Вязкость оказывает значительное влияние на динамический отклик ротора, на сопротивление зазора кончика лопатки, вязкое сопротивление ступицы ротора, сопротивление подшипника и вязкое сопротивление первичной поверхности лопатки. Разница вязкости также влияет на профиль осевой скорости жидкости для заданного расхода, определяемого числом Рейнольдса. При постоянном объемном расходе ротор достигает равновесной скорости вращения, при которой крутящий и тормозящий моменты на роторе равны. Равновесная скорость вращения для заданного расхода достигается при равенстве нулю углового ускорения. Это означает, что крутящий момент сбалансирован по ротору. Т.о., принцип определения числа оборотов в расходомерах турбинного типа связан с равенством моментов (уравнение баланса):

$$T_{dr} - \sum T_c = J \frac{d\omega}{dt} = 0,$$

где T_{dr} – крутящий момент на лопастях ротора, $\sum T_c$ – сумма тормозящих моментов (вязкостный, в подшипниках скольжения, ступице и др.), J – момент инерции, ω – угловая скорость вращения ротора.

При постоянном расходе при изменении числа оборотов ротора определяется момент на лопасти ротора. Находится такое значение чисел оборотов, при котором момент меняет знак. Зависимость момента от числа оборотов наносится на график и определяется истинное число оборотов, при котором момент равен нулю для данного расхода [5].

В работе [2] проведен анализ влияния вязкости на работу обычного турбинного расходомера, из которой следует, что увеличение вязкости приводит к уменьшению К-фактора. Аналогичное заключение сделано и в работе [4]. Уменьшения влияния вязкости в подобной конструкции авторы предлагают достичь изменением толщины и длины лопаток ротора, изменением структуры внутренней поверхности корпуса расходомера, шероховатости стенок, и наконец, формы лопаток. Однако подобные исследования не приведены, это лишь рекомендации к дальнейшей разработке темы. Аналогичные рекомендации приведены в работе коллектива авторов ООО «НИИ Транснефть» [11], которые предполагают продолжить свою работу по поиску оптимальной формы ротора для мультивязкостного расходомера с привлечением конечно-элементного анализа.

Отсутствие зависимости от вязкости в геликоидном расходомере связано с конструкцией геликоида, а именно с тем, что лопасть рассчитана на нулевой угол падения потока, т.е. в каждой точке радиуса лопасти ротора поток движется параллельно поверхности, что показано на рис. 1б, таким образом способствуя отсутствию отрывных течений, которые образуются в обычном турбинном расходомере (рис. 1а). Подобная конструкция способствует проскальзыванию среды, что уменьшает возможность налипания, таким образом не оказывая влияния на работу геликоида. Другой важной особенностью конструкции является то, что благодаря спиралевидному ротору нарастание пограничного слоя значительно снижается при течении высоковязких сред.

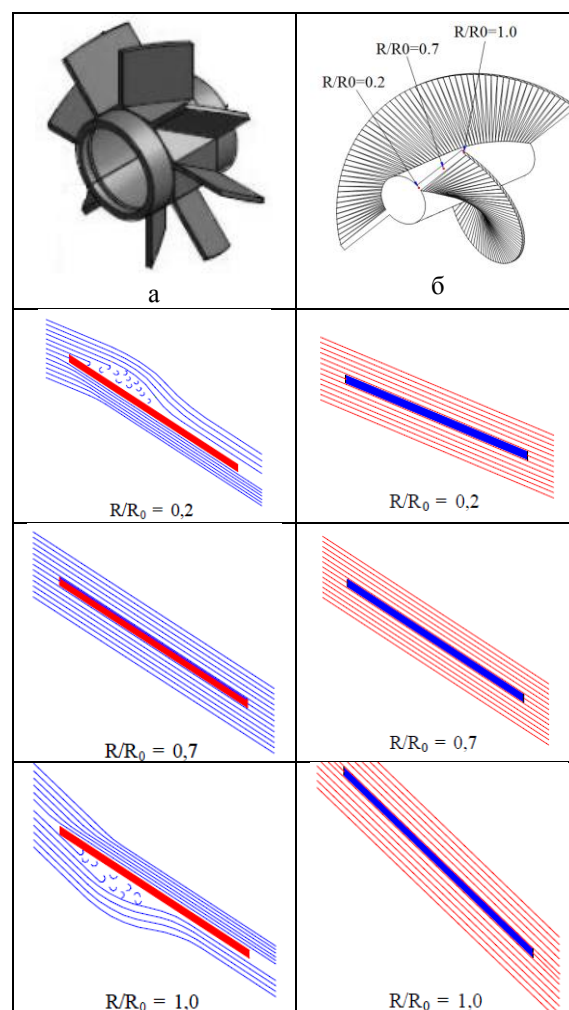


Рис. 1 – Сравнение линий тока в обычном турбинном расходомере (а) и геликоидном расходомере (б)

Fig. 1 – Comparison of pathlines in a turbine flowmeter (a) and a helicoid flowmeter (b)

Создание трехмерной модели расчетной области расходомера

Течение жидкости рассчитывалось в цилиндрическом объеме, внутри которого находились (рис. 2):

- ротор геликоидальной формы, ось вращения которого совпадала с осью цилиндра;

- два обтекателя (до и после геликоида), имеющие четыре лопасти, равномерно расположенные по окружности.

Геликоид импортировался из Компаса в формате *.sat в препроцессор Gambit 2.4, где была построена вся расчетная область, нанесена сетка и указаны граничные условия и сплошные типы зон (fluid).

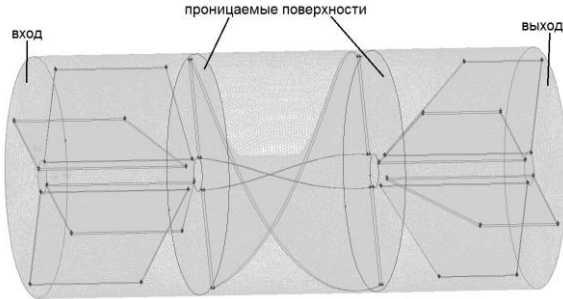


Рис. 2 – Расчетная область с нанесенной сеткой (с указанием некоторых граничных условий)

Fig. 2 – Computational domain with applied grid (with some boundary conditions indicated)

Важным элементом численного моделирования является построение расчетной сетки, от которой зависит точность решения. В расчетной области строилась гибридная сетка типа TGrid, изображенная на рис. 2. Расчетная область разбивалась на три объема двумя проницаемыми поверхностями (рис. 2). В первом объеме происходит движение потока от входа сквозь входной обтекатель до геликоида, во втором – непосредственно закручивание потока геликоидом, в третьем – поток движется после геликоида сквозь выходной обтекатель к выходу.

Построенная трехмерная модель с нанесенной сеткой экспортируется в комплекс вычислительной гидродинамики Ansys Fluent 2020 R2.

Математическое описание течения жидкости в расходомере

При движении жидкости в рассматриваемом объеме возникает вращение геликоида и создается закрученный трехмерный поток (три составляющие скорости: осевая W , радиальная U и тангенциальная V). Основой математического описания является система дифференциальных уравнений сохранения массы (уравнение неразрывности) и импульса с частными производными в цилиндрических координатах в трехмерной постановке задачи, которая в общем виде выглядит следующим образом [15, 16]:

$$\frac{\rho}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rU\phi) + \frac{\rho}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (V\phi) + \rho \frac{\partial}{\partial z} (W\phi) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\Gamma_{\phi} r \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) + S_{\phi}, \quad (1)$$

где r, θ, z – координаты; p – давление; ρ – плотность жидкости.

Члены $\phi, \Gamma_{\phi}, S_{\phi}$ для каждого уравнения системы приведены в табл. 1.

Таблица 1 - Члены $\phi, \Gamma_{\phi}, S_{\phi}$ для системы уравнений (1)

Table 1 - Members $\phi, \Gamma_{\phi}, S_{\phi}$ for the system of equations (1)

уравнение	ϕ	Γ_{ϕ}	S_{ϕ}
неразрывности	1	0	0
движения	U	$\mu + \mu_t$	$-\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\Gamma_{\phi} r \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\Gamma_{\phi} r \frac{\partial (V/r)}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma_{\phi} \frac{\partial W}{\partial z} \right) - \frac{2\Gamma_{\phi}}{r^2} \frac{\partial V}{\partial \theta} - \frac{2\Gamma_{\phi} U}{r^2} + \frac{\rho V^2}{r}$
	V	$\mu + \mu_t$	$-\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\Gamma_{\phi} \frac{\partial U}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\Gamma_{\phi} \frac{\partial V}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma_{\phi} \frac{\partial W}{\partial \theta} \right) + \Gamma_{\phi} \frac{\partial (V/r)}{\partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial (\Gamma_{\phi} V)}{\partial r} - \frac{\rho UV}{r} + \frac{\Gamma_{\phi}}{r^2} \frac{\partial U}{\partial \theta} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{2\Gamma_{\phi} U}{r} \right)$
	W	$\mu + \mu_t$	$-\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\Gamma_{\phi} r \frac{\partial U}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\Gamma_{\phi} \frac{\partial V}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma_{\phi} \frac{\partial W}{\partial z} \right)$
k-ω модель турбулентности	k	$\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}$	$G_k - Y_k + S_k$
	ω	$\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega}}$	$G_{\omega} - Y_{\omega} + S_{\omega}$

Поскольку возникающее течение при вращении геликоида является турбулентным, то для замыкания вышеописанной системы уравнений, необходимо определить турбулентную вязкость μ_t . При расчете турбулентных течений в каналах с большим градиентом скоростей хорошо зарекомендовала себя стандартная k-ω модель турбулентности [17, 18], основанная на модели Уилкокса [19, 20]. Это эмпирическая модель с уравнениями переноса турбулентной кинетической энергии k и специфической скоростью диссипации ω , которая определяется отношением k к скорости диссипации ϵ , приведенная также в табл. 1.

Обозначения, принятые в таблице 1: G_k – генерация турбулентной кинетической энергии, вызванная

градиентом осредненной скорости, G_ω – генерация специфической скорости диссипации ω , Y_k и Y_ω – диссипация k и ω , вызванная плавучестью, S_k и S_ω – источники определяемые пользователем, σ_k и σ_ω – турбулентные числа Прандтля для k и ω , соответственно, $\mu_t = \alpha^* \frac{\rho k}{\omega}$ (где $\alpha^* = f(Re)$).

Граничные условия (ГУ)

Заложенный в вычислительный комплекс Ansys Fluent метод множества систем отсчета [16] позволяет свести задачу, в которой присутствуют неподвижные и вращающиеся элементы, к стационарной. При этом поле скорости вокруг геликоида рассчитывается во вращающейся со скоростью геликоида системе отсчета, а вне ее – в неподвижной, в которой стенка и внутренние устройства неподвижны. На границе соприкосновения областей использовалось условие проницания для всех характеристик потока. В исследуемых аппаратах определены три типа зон: сплошная среда и два граничных типа – твердая и проницаемая поверхность. Корпус расходомера, геликоид и обтекатели определены как твердая поверхность (ГУ типа wall), поверхности круга между обтекателями и геликоидом – как проницаемая поверхность (ГУ типа interior), а три объема, получаемые после разбиения расходомера двумя проницаемыми поверхностями, – как сплошные среды (тип fluid).

Граничные условия: а) задается скорость потока на входе; б) задается скорость вращения сплошной среды, примыкающей к геликоиду, в движущейся системе отсчета; б) геликоид задается как подвижная стенка со скоростью вращения 0 рад/с относительно соседней ячейки зоны; в) корпус расходомера и обтекатели задаются как неподвижные стенки относительно соседней ячейки зоны; г) на выходе из расходомера задается условие «свободного выхода».

Обсуждение результатов

В данном разделе приведены результаты численного расчета для расходомера HTM10-A11-210-1S [21], область применения которого по расходу лежит в пределах от 200 до 2000 м³/ч, а по вязкости – от 0,2 сСт до 120 сСт.

Число оборотов геликоида определялось из равенства нулю момента, как было описано ранее.

Численный расчет проводился при различных значениях расхода и кинематической вязкости, результаты которого представлены в таблице 2. Также в таблице 2 представлены экспериментальные данные, взятые из сертификата калибровки.

На рисунке 3 представлена зависимость числа Струхала от числа Рошко.

Число Струхала определяется следующим образом

$$St = K_f \frac{\pi d^3}{4},$$

а число Рошко:

$$Ro = \frac{N \omega d^2}{2\pi v},$$

где d – внутренний диаметр трубы, м, v – кинематическая вязкость жидкости, м²/с, K_f – К-фактор, пульс/м³.

Из таблицы 2 видно, что наибольшее расхождение от экспериментального значения К-фактора получено при малых расходах и при наибольшей вязкости 140 сСт (которая выходит за область применения данного расходомера). Однако с увеличением расхода эта разница уменьшается. Из чего можно заключить, что расходомер данного типоразмера можно использовать и при больших вязкостях среды, но с большими расходами.

Таблица 2 - Значения К-фактора для расходомера HTM10-A11-210-1S в зависимости от расхода и кинематической вязкости: экспериментальные данные и численный расчет

Table 2 - K-factor values for the flowmeter HTM10-A11-210-1S depending on flow rate and kinematic viscosity: experimental data and CFD simulation

Метод измерения	Расход, м ³ /ч	Кинематическая вязкость, сСт	К-фактор, пульс/ м ³
Экспериментальные данные	354,563	19,128	174,9843
	663,303	19,273	175,0089
	978,463	19,242	174,9296
	1339,664	18,771	174,8298
	1650,707	17,708	174,7273
	1982,716	13,925	174,5596
	300,981	5,287	174,9647
	605,824	5,286	174,9759
	983,992	6,574	175,0029
	1359,483	6,328	174,9626
	1679,615	5,959	174,9032
Численный расчет	354,653	0,2004008	168,66287
		0,501002	169,30909
		1,00501	170,92464
		1,503006	171,24774
		5,01002	172,54018
		10,02004	173,83262
		20,04008	175,44816
		50,1002	179,16391
		120,24048	182,87967
		140,28056	184,1721
	978,463	1,00501	169,46373
		5,01002	170,62315
		10,02004	171,60691
		20,04008	172,94201
		120,24048	178,89139
	1982,716	140,28056	179,53552
		1,00501	168,81991
		5,01002	169,70996
		10,02004	170,39194
		20,04008	171,40914
		100,2004	175,20629
		120,24048	175,89983
		140,28056	176,50668

Из графика видно, что максимальное расхождение численного расчета от экспериментальных данных по значению К-фактора (или числу Струхала) составляет не более 5%.

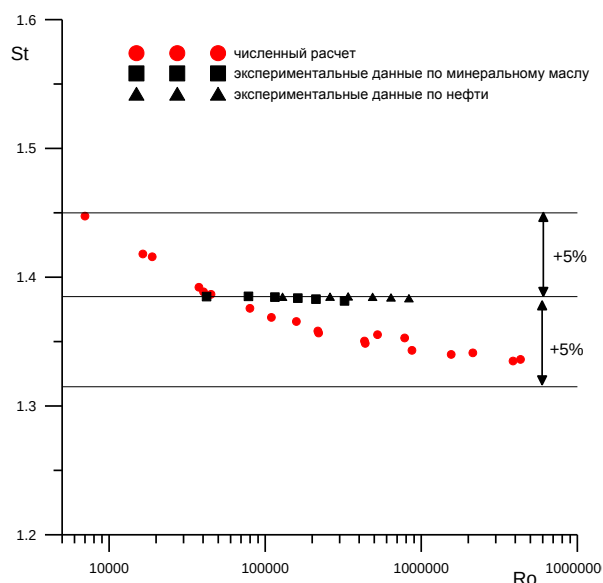


Рис. 3 – График зависимости $St(Ro)$ для расходомера НТМ10-А11-210-1S

Fig. 3 – $St(Ro)$ dependence graph for flowmeter HTM10-A11-210-1S

Заключение

Полученные результаты позволяют утверждать об адекватности разработанного метода для моделирования геликоидных расходомеров.

Литература

1. W. Zhen, Z. Tao, *Flow Measurement and Instrumentation*, **19**, 5, 233–239 (2008). DOI: 10.1016/j.flowmeasinst.2007.11.003.
2. J. Zhao, L. Sun, T. Zhang, L. Cao, *Advanced Materials Research*, **301-303**, 1283–1288 (2011). DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.301-303.1283.
3. L. Wang, H. Zhao, J. Yang, J. Li, S. Guan, *Proceedings of the 8th World Congress on Intelligent Control and Automation* (Taipei, Taiwan, June 21–25, 2011). Abstracts. Taipei, 2011. P. 285–290. DOI: 10.1109/WCICA.2011.5970744.
4. S. Guo, L. Sun, T. Zhang, W. Yang, Z. Yang, *Flow Measurement and Instrumentation*, **34**, 42–52 (2013). DOI: 10.1016/j.flowmeasinst.2013.07.016.
5. C. L. Tegtmeier, P. Anusonti-Inthra, J.E. Winchester, *53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting* (Kissimmee, Florida, USA, January 5–9, 2015). Abstracts. Kissimmee, 2015. Article 1959. DOI: 10.2514/6.2015-1959.
6. R.C. Baker, *Flow measurement handbook: industrial designs, operating principles, performance, and applications*. Cambridge University Press, Cambridge, 2000. 574 p.
7. B. Cui, C. Zhang, Y. Zhang, *Flow Measurement and Instrumentation*, **74**, Article 101779 (2020). DOI: 10.1016/j.flowmeasinst.2020.101779.
8. F. Huang, L. Yan, C.C. Monsia, Y. Han, J. Liu, H. Zan, *Sensors*, **24**, Article 4389 (2024). DOI: 10.3390/s24134389.
9. Z. Saboohi, S. Sorkhkhah, H. Shakeri, *Flow Measurement and Instrumentation*, **42**, 47–57 (2015). DOI: 10.1016/j.flowmeasinst.2014.12.009.

10. О.В. Аралов, И.В. Буянов, А.С. Саванин, Н.А. Шимель, *Нефтяное хозяйство*, **6**, 140–144 (2018). DOI: 10.24887/0028-2448-2018-6-140-144.
11. И.В. Буянов, О.В. Аралов, Н.В. Бережанский, Д.В. Былинкин, А.С. Саванин, *Нефтяное хозяйство*, **9**, 116–120 (2021). DOI: 10.24887/0028-2448-2021-9-116-120.
12. <http://afms.org/Docs/liquids/roleturb.pdf>.
13. http://afms.org/Docs/gas/The_Dev_Role_of_Helical_Turbine_Meters.pdf.
14. <http://help.intellisitesuite.com/hydrocarbon/papers/2202.pdf>.
15. А.М. Кутепов, А.Д. Полянин, З.Д. Запryanov, А.В. Вязьмин, Д.А. Казенин, *Химическая гидродинамика*. Квантум, Москва, 1996. 336 с.
16. Л.Р. Минибаева, А.В. Клинов, А.Г. Мухаметзянова, *Расчет аппаратов с перемешивающими устройствами методами вычислительной гидродинамики*. Издательство КНИТУ, Казань, 2014. 112 с.
17. В.Э. Зинуров, А.В. Дмитриев, И.И. Насырова, О.С. Дмитриева, *Вестник Технологического университета*, **25**, 4, 71–76 (2022). DOI: 10.55421/1998-7072_2022_25_4_71.
18. К.А. Алексеев, А.Г. Мухаметзянова, *Вестник Технологического университета*, **18**, 17, 64–66 (2015).
19. J.O. Hinze, *Turbulence*. McGraw-Hill Publishing Co., New York, 1975. 790 p.
20. D.C. Wilcox, *Turbulence Modeling for CFD*. DCW Industries Inc., California, 1998. 460 p.
21. <https://mnt-sas.com/>.

References

1. W. Zhen, Z. Tao, *Flow Measurement and Instrumentation*, **19**, 5, 233–239 (2008). DOI: 10.1016/j.flowmeasinst.2007.11.003.
2. J. Zhao, L. Sun, T. Zhang, L. Cao, *Advanced Materials Research*, **301-303**, 1283–1288 (2011). DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.301-303.1283.
3. L. Wang, H. Zhao, J. Yang, J. Li, S. Guan, *Proceedings of the 8th World Congress on Intelligent Control and Automation* (Taipei, Taiwan, June 21–25, 2011). Abstracts. Taipei, 2011. P. 285–290. DOI: 10.1109/WCICA.2011.5970744.
4. S. Guo, L. Sun, T. Zhang, W. Yang, Z. Yang, *Flow Measurement and Instrumentation*, **34**, 42–52 (2013). DOI: 10.1016/j.flowmeasinst.2013.07.016.
5. C. L. Tegtmeier, P. Anusonti-Inthra, J.E. Winchester, *53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting* (Kissimmee, Florida, USA, January 5–9, 2015). Abstracts. Kissimmee, 2015. Article 1959. DOI: 10.2514/6.2015-1959.
6. R.C. Baker, *Flow measurement handbook: industrial designs, operating principles, performance, and applications*. Cambridge University Press, Cambridge, 2000. 574 p.
7. B. Cui, C. Zhang, Y. Zhang, *Flow Measurement and Instrumentation*, **74**, Article 101779 (2020). DOI: 10.1016/j.flowmeasinst.2020.101779.
8. F. Huang, L. Yan, C.C. Monsia, Y. Han, J. Liu, H. Zan, *Sensors*, **24**, Article 4389 (2024). DOI: 10.3390/s24134389.
9. Z. Saboohi, S. Sorkhkhah, H. Shakeri, *Flow Measurement and Instrumentation*, **42**, 47–57 (2015). DOI: 10.1016/j.flowmeasinst.2014.12.009.
10. О.В. Аралов, И.В. Буянов, А.С. Саванин, Н.А. Шимель, *Нефтяное хозяйство*, **6**, 140–144 (2018). DOI: 10.24887/0028-2448-2018-6-140-144.
11. И.В. Буянов, О.В. Аралов, Н.В. Бережанский, Д.В. Былинкин, А.С. Саванин, *Нефтяное хозяйство*, **9**, 116–120 (2021). DOI: 10.24887/0028-2448-2021-9-116-120.
12. <http://afms.org/Docs/liquids/roleturb.pdf>.
13. http://afms.org/Docs/gas/The_Dev_Role_of_Helical_Turbine_Meters.pdf.

14. <http://help.intellisitesuite.com/hydrocarbon/papers/2202.pdf>
15. A.M. Kutevov, A.D. Polyanin, Z.D. Zapryanov, A.V. Vyazmin, D.A. Kazenin, Chemical hydrodynamics. Quantum, Moscow, 1996. 336 p.
16. L.R. Minibaeva, A.V. Klinov, A.G. Mukhametzyanova, *Stirred vessels calculating of computational fluid dynamics methods*. KNRTU Publishing House, Kazan, 2014. 112 p.
17. V.E. Zinurov, A.V. Dmitriev, I.I. Nasyrova, O.S. Dmitrieva, *Herald of Technological University*, **25**, 4, 71-76 (2022). DOI: 10.55421/1998-7072_2022_25_4_71
18. K.A. Alekseev, A.G. Mukhametzyanova, *Herald of Technological University*, **18**, 17, 64-66 (2015).
19. J.O. Hinze, *Turbulence*. McGraw-Hill Publishing Co., New York, 1975. 790 p.
20. D.C. Wilcox, *Turbulence Modeling for CFD*. DCW Industries Inc., California, 1998. 460 p.
21. <https://mnt-sas.com/>

© **Л. Р. Минибеева** – доц. каф. Процессов и аппаратов химической технологии (ПАХТ), Казанский национальный исследовательский технологический университет (КНИТУ), Казань, Россия, minibayeva@kstu.ru; **А. В. Клинов** – зав. кафедрой ПАХТ, КНИТУ, alklin@kstu.ru.

© **L. R. Minibaeva** – Associate professor of the department of Processes and Apparatuses of Chemical Technology (PACT), Kazan National Research Technological University (KNRTU), Kazan., Russia, minibayeva@kstu.ru; **A. V. Klinov** – Head of the PACT department, KNRTU, alklin@kstu.ru.

Дата поступления рукописи в редакцию – 21.04.25.

Дата принятия рукописи в печать – 05.05.25.