

УДК 66.01: 66.011

# Моделирование в среде ANSYS течения многокомпонентной газовой смеси через циклон ЦКБН пылеуловителя ГП-628 на участке очистки газа

Т.Т. Алиев<sup>1</sup>, С.Н. Беляев<sup>2</sup>, А.С. Галахарь<sup>3</sup><sup>1</sup> ООО «Газпромтрансгаз Ухта», 169300, Ухта, Российская Федерация, Ленина пр., д. 39/2.<sup>2</sup> Ухтинский государственный технический университет, 169300, Ухта, Российская Федерация, Первомайская ул., д. 13.<sup>3</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

## Modeling of a multicomponent gas flow through a cyclone of dust arrester GP-628 at a gas purifying area using ANSYS

T.T. Aliev<sup>1</sup>, S.N. Belyaev<sup>2</sup>, A.S. Galakhar<sup>3</sup><sup>1</sup> LLC Gazprom Transgaz Ukhta, Lenina ave., 39/2, 169300, Ukhta, Komi Republic, Russian Federation.<sup>2</sup> Ukhta State Technical University, Pervomayskaya str., 13, 169300, Ukhta, Komi Republic, Russian Federation.<sup>3</sup> Bauman Moscow State Technical University, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation.

e-mail: taliev@sgp.gazprom.ru, sbelyaev@ugtu.net, a.galakhar@bmsu.ru



Актуальность численного исследования течения многокомпонентной газовой смеси через циклон обусловлена тем, что проведение подобного натурального эксперимента чрезвычайно трудоемко и дорого. Кроме того, при натурном эксперименте не все явления поддаются непосредственному наблюдению. Представлено численное исследование сложного трехмерного течения многокомпонентной газовой смеси через циклон ЦКБН пылеуловителя ГП-628 на участке очистки газа в рабочих условиях при средних значениях температуры, давления и расхода газа. Турбулентное течение газа рассчитано с использованием модели нулевых уравнений. В результате численного исследования получено сложное трехмерное распределение давлений и скоростей течения многокомпонентной газовой смеси через циклон ЦКБН пылеуловителя ГП-628. Расчетное значение гидравлического сопротивления циклона хорошо согласуется с паспортными данными пылеуловителя.

**Ключевые слова:** газовая смесь, распределение давлений, трехмерное распределение скоростей, турбулентное течение, численное исследование.



The numerical analysis of a multicomponent gas flow through the cyclone is of great importance because full-scale experiments are extremely time-consuming and expensive. Furthermore, some phenomena cannot be observed directly when conducting the full-scale experiments. Three-dimensional flow of a multicomponent gas mixture through the cyclone of a GP-628 dust arrester at the gas purifying area is studied numerically under working conditions at average temperature, pressure, and gas flow rate values. Turbulent gas flow was calculated using zero-equation models. Three-dimensional distributions of pressure and flow velocities of the multicomponent gas mixture through the cyclone of the dust arrester GP-628 were obtained. The calculated value of flow resistance of the cyclone is in good agreement with the published data for the dust arrester.

**Keywords:** gas mixture, pressure distribution, three-dimensional velocity distribution, turbulent flow, numerical study.

При управлении потоком природного газа необходимо обеспечить постоянство качества газа, подаваемого потребителям. Поэтому при принятии решения о перераспределении потока газа в газотранспортных сетях следует учитывать влияние изменения расхода через участок очистки на качество очистки газа от примесей.

Существующие способы расчета течения газа через циклоны пылеуловителей предполагают использование упрощающих допущений [1–3], не позволяющих получить достоверную теоретическую оценку влияния изменения расхода природного газа на газокомпрессорной станции на качество его очистки в изменяющихся условиях, а также при отклонении условий работы циклонов пылеуловителя от паспортных [1].

Для расчета течения и улавливания частиц в прямоточных циклонах в работе [4] успешно применен метод конечных разностей. Расчет качества очистки в циклоне дымовых газов при атмосферном давлении методом конечных элементов (МКЭ), используемым в среде FLUENT программного комплекса ANSYS, также показал хорошее соответствие расчетных и опытных данных [5]. Однако в научных публикациях отсутствуют результаты конечно-элементного моделирования сложного трехмерного течения природного газа через циклоны пылеуловителей ГП-628 на участке очистки газокомпрессорной станции.

Цель работы — численное исследование трехмерного распределения скоростей и давлений в циклоне пылеуловителя ГП-628 при течении через него природного газа, представляющего собой многокомпонентную газовую смесь.

**Постановка задачи.** *Конструкция пылеуловителя.* В пылеуловитель ГП-628 (рис. 1) газ подается через расположенную в его нижней части входную трубу. Отсюда он поступает на входы шести циклонов типа ЦКБН блока 3, выхлопные трубы которых открыты в верхнюю, отделенную сплошной горизонтальной перегородкой от нижней, часть циклона, откуда осуществляется выпуск газа в выходную трубу. Улавливаемые циклонами частицы загрязнений через воронки попадают в нижнюю часть пылеуловителя и по нижней выпускной трубе через определенные промежутки времени подаются на газофакельную установку для сжигания. Люки-лазы 2 и 3 в рабочих условиях герметично закрыты.

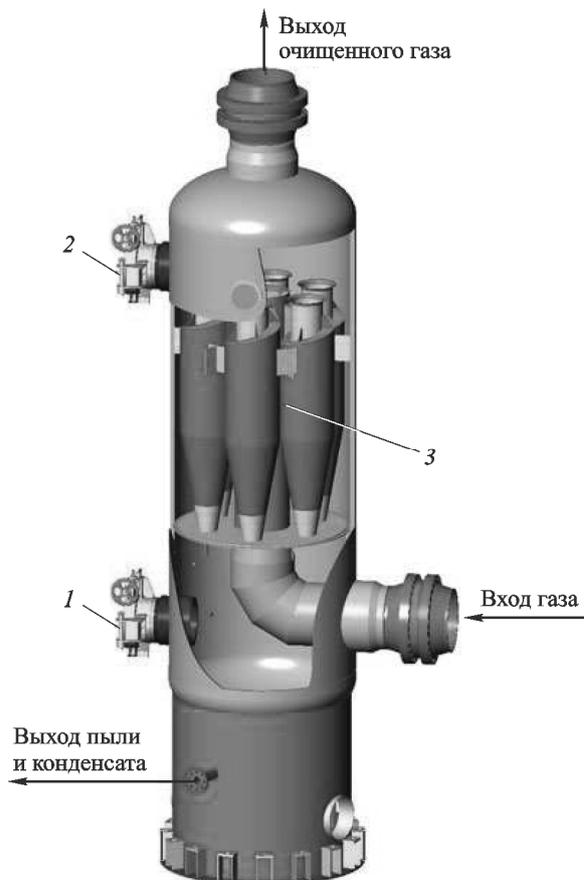


Рис. 1. Пылеуловитель ГП-628:

1, 2 — люк-лаз; 3 — блок циклонов

*Расчетная модель циклона пылеуловителя.* Для моделирования течения природного газа через циклон была построена его конечно-элементная модель, состоящая из 597 285 конечных элементов (КЭ), содержащих 150 914 узлов (рис. 2). В областях быстрого изменения скорости газового потока в круговом канале вокруг выхлопной трубы циклона и в месте соединения отверстия воронки циклона с нижней частью пылеуловителя сеть КЭ была измельчена.

*Математическое описание течения природного газа.* Для описания турбулентного течения природного газа в среде ANSYS использованы следующие уравнения в частных производных:

уравнение сплошности сжимаемого природного газа

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{w}) = 0, \quad (1)$$

где  $\rho$  — плотность природного газа в точке при рабочих условиях,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $t$  — время, с;  $\mathbf{w}$  — вектор скорости в точке течения газа в прямоугольной декартовой системе координат, показанной на рис. 2,  $\text{м}/\text{с}$ ;

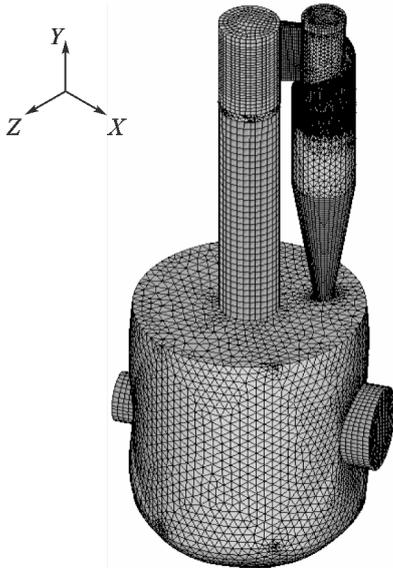


Рис. 2. Конечно-элементная модель циклона ЦКБН пылеуловителя ГП-628

уравнение движения сжимаемого природного газа

$$\Pi = -PE + 2(\eta + \eta_t)\dot{S} + \zeta \operatorname{div} wE. \quad (2)$$

Здесь  $\Pi$  — тензор напряжений в точке сплошной среды природного газа, Па;  $P$  — давление газа в рассматриваемой точке, Па;  $E$  — единичный тензор;  $\eta$  — коэффициент динамической вязкости природного газа в рассматриваемой точке, Па·с;  $\eta_t$  — коэффициент турбулентной вязкости природного газа в рассматриваемой точке, Па·с;  $\dot{S}$  — тензор скоростей деформаций в точке сплошной среды природного газа, с<sup>-1</sup>;  $\zeta$  — второй коэффициент вязкости, Па·с,

$$\zeta = \zeta_v - \frac{2}{3}\eta, \quad (3)$$

где  $\zeta_v$  — коэффициент второй (объемной) вязкости, Па·с.

При выполнении расчетов в среде ANSYS коэффициентом  $\zeta_v$  пренебрегают;

уравнение энергии сжимаемого природного газа

$$\frac{\partial(\rho c_p T_0)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho w c_p T_0) = \operatorname{div}(\overline{\lambda \operatorname{grad} T_0}) + Q_V + Q_k + Q_h + \Phi + \frac{\partial P}{\partial t}. \quad (4)$$

Здесь  $c_p$  — удельная теплоемкость газа при постоянном давлении, Дж/(кг·К);  $T_0$  — температура торможения, К;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности газа, Вт/(м·К);  $Q_V$  — мощность вязкостного трения газа, Вт/м<sup>3</sup>,

$$Q_V = \eta \left[ w_x \left( \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial w_x}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial w_x}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial w_y}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial w_z}{\partial x} \right) + w_y \left( \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial w_y}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial w_y}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial w_z}{\partial x} \right) + w_z \left( \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial w_z}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial w_z}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial w_z}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial w_x}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial w_y}{\partial z} \right) \right], \quad (5)$$

где  $w_x, w_y, w_z$  — проекции вектора скорости газа в точке на оси прямоугольной декартовой системы координат, м/с;  $Q_k$  — изменение кинетической энергии газа, Вт/м<sup>3</sup>,

$$Q_k = -\frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{w^2}{2} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial y} \left[ \frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{w^2}{2} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial z} \left[ \frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{w^2}{2} \right) \right]; \quad (6)$$

$Q_h$  — удельная мощность внутренних источников или стоков тепла в объеме перекачиваемого газа, Вт/м<sup>3</sup>;  $\Phi$  — мощность вязкостного рассеяния, Вт/м<sup>3</sup>.

$$\Phi = \eta \left[ \left( \frac{\partial w_x}{\partial z} + \frac{\partial w_z}{\partial x} \right) \frac{\partial w_x}{\partial z} + \left( \frac{\partial w_y}{\partial x} + \frac{\partial w_x}{\partial y} \right) \frac{\partial w_y}{\partial x} + \left( \frac{\partial w_z}{\partial y} + \frac{\partial w_y}{\partial z} \right) \frac{\partial w_z}{\partial y} \right]. \quad (7)$$

Температура торможения

$$T = T_0 - \frac{w^2}{2c_p}. \quad (8)$$

Здесь  $T$  — температура газа в точке, К.

При решении задачи об установившемся движении природного газа через пылеуловитель принимается  $Q_h = \partial P / \partial t = 0$ .

Турбулентная вязкость рассчитывалась по модели нулевых уравнений [6]

$$\eta_t = \rho L_S^2 \sqrt{\Phi}; \quad (9)$$

$$L_S = \min \left\{ 0,4L_n, 0,9L_c \right\}, \quad (10)$$

где  $L_n$  — кратчайшее расстояние от рассматриваемой точки потока до ближайшей стенки, м;  $L_c$  — характерный размер (наибольшее возможное значение  $L_n$ ), м.

Рабочие условия течения газа через пылеуловитель: поток природного газа через 3,94 м<sup>3</sup>/с, давление газа на выходе из пылеуловителя 5,72 МПа, температура газа на входе в пылеуловитель, равная температуре всех стенок пылеуловителя и окружающей среды, 281 К.

Задание физических свойств многокомпонентного газа. Состав газовой фазы смеси, перекачиваемой по газопроводу при рабочих условиях ( $t = +8$  °С,  $P = 5,72 \cdot 10^6$  Па), приведен в таблице.

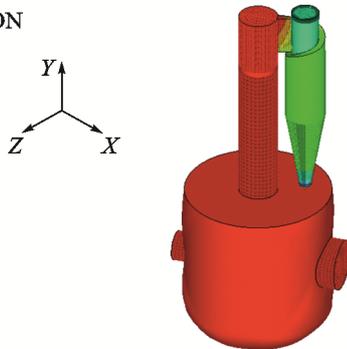
Свойства компонентов газовой смеси были определены согласно стандарту [8] и справочным данным [9].

Состав газовой фазы смеси

Смесь газов	Молярная доля в смеси	Молярная масса, кг/ моль	Парциальное давление, МПа
Метан	0,9864	0,01604303	5,642208
Этан	0,0042	0,03007012	0,024024
Пропан	0,0009	0,04409721	0,005148
Бутан	0,0003	0,05812430	0,001716
Пентан	0,0001	0,07215139	0,000572
Азот	0,0077	0,02801340	0,044044
Углекислый газ	0,0004	0,04400995	0,002288
Газовая фаза	1,0000	0,01624879	5,720000

NODAL SOLUTION

STEP = 6  
SUB = 1  
PRES AVG  
RSYS = 0  
SMN = .571E + 07  
SMX = .573E + 07

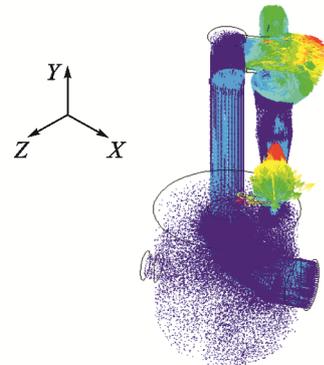


.571E+07 .572E+07 .572E+07 .572E+07 .572E+07 .573E+07 .573E+07  
Dust arrester GP 628.00.000-13D

а

VECTOR

STEP = 6  
SUB = 1  
V  
NODE = 46870  
MIN = 0  
MAX = 15.3103



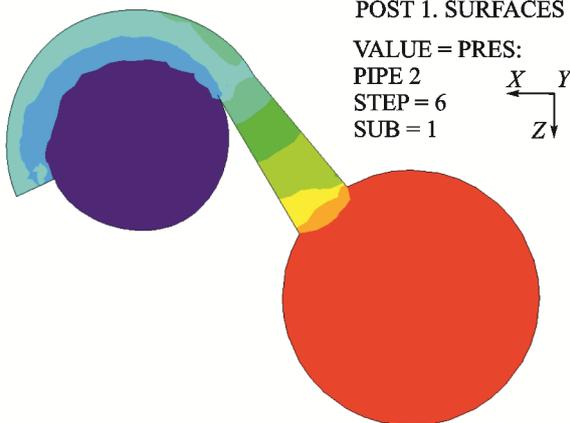
0 1.70115 3.40229 5.10344 6.80459 8.50574 10.2069 11.908 13.6092 15.3103  
Dust arrester GP 628.00.000-13D

б

Рис. 3. Распределение давлений (а) и скоростей течения (б) в циклоне пылеуловителя (Полноцветную версию см. <http://www.izvuzmash.bmstu.ru>)

POST 1. SURFACES

VALUE = PRES:  
PIPE 2  
STEP = 6  
SUB = 1

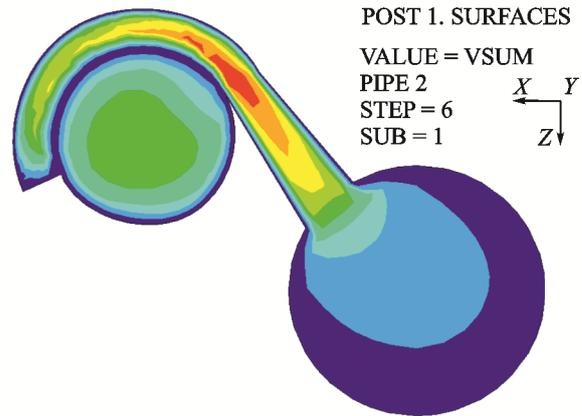


.572E+07 .572E+07 .572E+07 .572E+07 .572E+07 .573E+07 .573E+07 .573E+07  
Dust arrester GP 628.00.000-13D

а

POST 1. SURFACES

VALUE = VSUM  
PIPE 2  
STEP = 6  
SUB = 1



-.424E-10 1.40479 2.80958 4.21437 5.61917 7.02396 8.42875 9.83354 11.2383  
Dust arrester GP 628.00.000-13D

б

Рис. 4. Распределение давлений (а) и скоростей течения (б) в круговом канале циклона пылеуловителя (Полноцветную версию см. <http://www.izvuzmash.bmstu.ru>)

**Результаты расчета.** Распределение давлений в циклоне, полученное в результате расчета, представлено на рис. 3, а. Наибольшее изменение давлений наблюдается в областях, где скорость потока газа меняется наиболее быстро (рис. 3, б). В нижней части воронки циклона, открытой в непроточную полость пылеуловителя, давление пониженное, что обусловлено динамическим напором наиболее быстрого потока газа, создаваемым в нижней части воронки пылеуловителя.

Поперечное сечение кругового канала циклона по уровню нижнего края его входного раструба показано на рис. 4. Почти все падение давления в циклоне пылеуловителя происходит в круговом канале (рис. 4, а), соответствуя как наибольшей скорости движения газа в сечении канала, так и наименьшей площади его поперечного сечения (рис. 4, б). Скорости движения газа вблизи крыльчатки нижнего торца выхлопной трубы циклона оказываются значительно меньше скорости течения в поперечном сечении входной трубы пылеуловителя (рис. 5) и наличие крыльчатки не оказывает существенного влияния на падение давления в циклоне пылеуловителя.

## Выводы

1. Потеря напора газа при прохождении циклона не превышает 0,01 МПа, что полно-

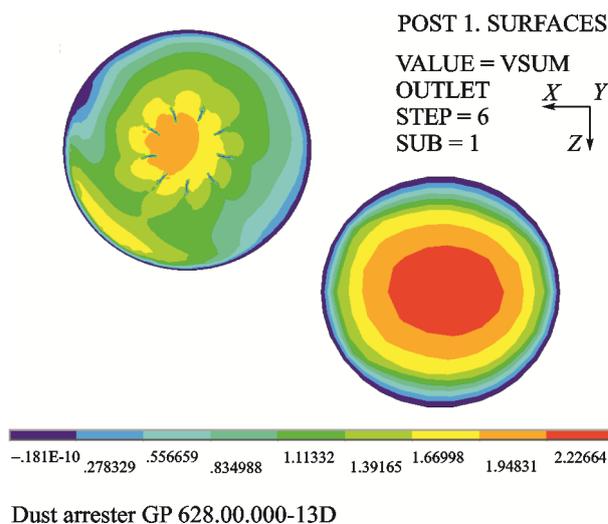


Рис. 5. Распределение скоростей в сечении по нижнему торцу выхлопной трубы циклона пылеуловителя  
(Полноцветную версию см. <http://www.izvuzmash.bmstu.ru>)

стью согласуется с техническим паспортом, в котором указано, что полное гидравлическое сопротивление всего пылеуловителя не должно превышать 0,05 МПа (см. рис. 3, а).

2. Предложенный численный способ расчета течения газа через циклон позволяет получить надежные данные о распределении скоростей и давлений газа в пылеуловителе и моделировать течение газа при любых заданных условиях работы пылеуловителя.

## Литература

- [1] Мустафин Ф.М., Коновалов Н.И., Гильметдинов Р.Ф., Квятковский О.П., Гамбург И.Ш. *Машины и оборудование газонефтепроводов*. Уфа, Изд-во УГНТУ, 2002. 384 с.
- [2] Тарасова Л.А. *Повышение технологической эффективности аппаратов вихретокового типа в системах газоочистки*. Дисс. ... д-ра техн. наук. Москва, 2010. 34 с.
- [3] Безик Д.А. *Автоматизация расчета параметров циклона на основе математического моделирования процесса пылеулавливания*. Дисс. ... канд. техн. наук. Брянск, 2000. 150 с.
- [4] Асламова В.С. *Процесс сепарации в высокопроизводительных прямоточных циклонах и методы их расчета*. Дисс. ... д-ра техн. наук. Томск, 2009. 377 с.
- [5] Кузнецов С.И., Михайлик В.Д., Русанов С.А. Моделирование работы высокоэффективного циклонно-ротационного пылеуловителя. *Вестник ХНТУ*, 2009, № 3(36), с. 81–85.
- [6] Ding J., Gidaspow D. Bubbling fluidization model using kinetic theory of granular flow. *AIChE Journal*, 1990, vol. 36, pp. 523–538.
- [7] ГОСТ Р 8.662–2009. *Газ природный. Термодинамические свойства газовой фазы. Методы расчетного определения для целей транспортирования и распределения газа на основе фундаментального уравнения состояния AGA8*. Москва, Стандартинформ, 2010. 66 с.
- [8] ГОСТ 30319.1–96. *Газ природный: методы расчета физических свойств. Определение физических свойств природного газа, его компонентов и продуктов его переработки*. Минск, Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1996. 20 с.
- [9] Варгафтик Н.Б. *Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей*. Москва, Наука, 1972. 543 с.

## References

- [1] Mustafin F.M., Konovalov N.I., Gil'metdinov R.F., Kviatkovskii O.P., Gamburg I.Sh. *Mashiny i oborudovanie gazonefteprovodov* [Machines and equipment of oil and gas pipelines]. Ufa, USPTU publ., 2002. 384 p.
- [2] Tarasova L.A. *Povyshenie tekhnologicheskoi effektivnosti apparatov vikhrevogo tipa v sistemakh gazoochistki*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Increase technological efficiency of vortex-type apparatus in gas cleaning systems. Dr. tech. sci. diss.]. Moscow, 2010. 34 p.
- [3] Bezik D.A. *Avtomatizatsiia rascheta parametrov tsyklona na osnove matematicheskogo modelirovaniia protsessa pyleulavlivaniia*. Diss. kand. tekhn. nauk [Automation of calculation parameters of the cyclone on the basis of mathematical modeling of dust separation process. Cand. tehn. sci. diss.]. Briansk, 2000. 150 p.
- [4] Aslamova V.S. *Protsess separatsii v vysokoproizvoditel'nykh priamotoknykh tsiklonakh i metody ikh rascheta*. Diss. dokt. tekhn. nauk [The process of separation in high-performance straight-through cyclones and calculation methods. Dr. tech. sci. diss.]. Tomsk, 2009. 377 p.
- [5] Kuznetsov S.I., Mikhailik V.D., Rusanov S.A. Modelirovanie raboty vysokoeffektivnogo tsiklonno-rotatsionnogo pyleulovitel'ia [Modeling of operation of high-efficiency cyclone-rotating dust collector]. *Vestnik KHNTU* [Bulletin of KNTU]. 2009, no. 3(36), pp. 81–85.
- [6] Ding J., Gidaspow D. Bubbling fluidization model using kinetic theory of granular flow. *AIChE Journal*, 1990, vol. 36, pp. 523–538.
- [7] GOST R 8.662-2009 *Gaz prirodnyi. Termodinamicheskie svoistva gazovoi fazy. Metody raschetnogo opredeleniia dlia tselei transportirovaniia i raspredeleniia gaza na osnove fundamental'nogo uravneniia sostoiianiia AGA8* [State Standard 8.662-2009 Gas natural. Thermodynamic properties of the gas phase. Methods of calculating for the purposes of transportation and distribution of gas on the basis of the fundamental equation of state AGA8]. Moscow, Standartinform publ., 2010. 66 p.
- [8] GOST 30319.1-96 *Gaz prirodnyi: metody rascheta fizicheskikh svoistv. Opredelenie fizicheskikh svoistv prirodnogo gaza, ego komponentov i produktov ego pererabotki* [State Standard 30319.1-96 Natural gas. Methods of calculation of physical properties. Definition of physical properties of natural gas, its components and processing products]. Minsk, Mezhsosudarstvennyi sovet po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii publ., 1996. 20 p.
- [9] Vargaftik N.B. *Spravochnik po teplofizicheskim svoistvam gazov i zhidkosti* [Handbook of thermophysical properties of gases and liquids]. Moscow, Nauka publ., 1972. 543 p.

Статья поступила в редакцию 30.06.2014

## Информация об авторах

**АЛИЕВ Тимур Томасович** (Ухта) — кандидат технических наук, Заместитель генерального директора ООО «Газпромтрансгаз Ухта» (169300, Ухта, Российская Федерация, Ленина пр., д. 39/2, e-mail: taliev@sgp.gazprom.ru).

**БЕЛЯЕВ Сергей Николаевич** (Ухта) — начальник научно-исследовательской части. ГБОУ ВПО Ухтинский государственный технический университет (169300, Ухта, Российская Федерация, Первомайская ул., д. 13, e-mail: sbelyaev@ugtu.net).

**ГАЛАХАРЬ Александр Сергеевич** (Москва) — доктор философии кафедры «Компьютерные системы автоматизации производства». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: a.galakhar@bmstu.ru).

## Information about the authors

**ALIEV Timur Tomasovich** (Ukhta) — Cand. Sc. (Eng.), Deputy Director General of LLC Gazprom Transgaz Ukhta (Lenina ave., 39/2, 169300, Ukhta, Komi Republic, Russian Federation, e-mail: taliev@sgp.gazprom.ru).

**BELYAEV Sergey Nikolaevich** (Ukhta) — Head of Research of Ukhta State Technical University (UGTU, Pervomayskaya str., 13, 169300, Ukhta, Komi Republic, Russian Federation, e-mail: sbelyaev@ugtu.net).

**GALAKHAR' Aleksandr Sergeevich** (Moscow) — Dr. Sc. (Phyl.) of «Automated Production Computer Systems» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: a.galakhar@bmstu.ru).