

УДК 66.071

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ВИНТОВОГО ЗАКРУЧИВАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА МЕТОДОМ CFD-АНАЛИЗА

Ахметов Р.Ф., Сидоров Г.М., Рахимов М.Н., Беркань В.О.

*Уфимский государственный нефтяной технический университет,
Уфа, e-mail: ahmetov.rustam2011@yandex.ru*

В настоящее время в процессах утилизации попутных нефтяных газов в основном используются процессы фракционирования углеводородных газов, сжигания в газозлектрогенераторах и синтеза моторных топлив посредством технологии GTL. Но большие капитальные затраты, трудоемкость монтажных, пусконаладочных работ и наличие выбросов продуктов горения в случае с сжиганием газа в газозлектрогенераторах затрудняют использование вышеперечисленных способов на удаленных и небольших месторождениях. Качественной заменой традиционных процессов переработки углеводородных газов может стать газодинамический метод разделения. В данной работе приведены данные по поиску оптимальной конструкции винтового закручивающего устройства путем моделирования течения газа при помощи CFD-анализа (CFD – computer fluid dynamic). Представлены сведения об основных направлениях утилизации попутного нефтяного газа. Рассмотрены основные типы вихревых труб, применяемых в процессах переработки природных и попутных нефтяных газов. В качестве закручивающего устройства предлагается использовать винтовое закручивающее устройство (ВЗУ), которое превосходит тангенциальное закручивающее устройство по ряду характеристик. Проводится моделирование методом CFD-анализа (Computational fluid dynamics – вычислительная гидродинамика) на предмет стабилизации поля скоростей в винтовом закручивающем устройстве.

Ключевые слова: попутный нефтяной газ, вихревая труба, эффект Ранка – Хилша, винтовое закручивающее устройство, тангенциальное закручивающее устройство, поле скоростей

IMPROVING THE DESIGN OF HELICAL VORTEX GENERATOR WITH CFD-ANALYSIS

Akhmetov R.F., Sidorov G.M., Rakhimov M.N., Berkan V.O.

Ufa State Petroleum Technical University, Ufa, e-mail: ahmetov.rustam2011@yandex.ru

Currently in the processes of disposal of associated petroleum gas fractionation processes are mainly used hydrocarbon gases, combustion gas electricity generators and synthesis of motor fuels GTL technology. But large capital costs, man-hours of assembling, commissioning and availability of the products of combustion emissions in the case of the combustion of gas in gas electricity generators is hampered by the use of the above methods on remote and small fields. High-quality replacement for the traditional process of hydrocarbon gases can be formed then the split method. This paper provides information on finding optimal design of helical creating devices by simulating the gas flow by using CFD analysis (CFD-computer fluid dynamic). Provides information about the main directions of utilization of associated petroleum gas (APG). The main types of vortex tubes, used in the processing of natural and associated gas. As the vortex generator proposed to use helical vortex generator (HVG), which is superior to the tangential vortex generator for a number of characteristics. Held simulation by CFD-analysis for stabilization of the velocity field in a helical vortex generator.

Keywords: associated petroleum gas, vortex tube, Ranque-Hilsch effect, helical vortex generator, tangential vortex generator, the velocity field

В настоящее время в процессах утилизации попутных нефтяных газов в основном используются процессы фракционирования углеводородных газов [2, 3], сжигания в газозлектрогенераторах [3] и синтеза моторных топлив посредством технологии GTL [9]. Но большие капитальные затраты, трудоемкость монтажных, пусконаладочных работ и наличие выбросов продуктов горения в случае с сжиганием газа в газозлектрогенераторах затрудняют использование вышеперечисленных способов на удаленных и небольших месторождениях.

Качественной заменой традиционных процессов переработки углеводородных газов может стать газодинамический метод разделения. Газодинамический метод

разделения газовых смесей заключается в придании потоку газа высоких скоростей (вплоть до сверхзвуковых) с целью получения статической температуры, которая заведомо ниже температуры торможения на входе в трубу. К газодинамическим аппаратам относят трубы Ранка – Хилша, 3-S сепараторы, резонансные трубы Спрингера, пульсационные трубы и т.д. В нашей стране в процессах переработки попутных нефтяных газов наибольшее распространение получили 3-S сепараторы и вихревые трубы Ранка – Хилша. Но в силу высокой производительности, возможности получать холодный и горячий потоки, простотой конструкции и изготовления вихревые трубы нашли большее распространение [4, 5].

Вихревые трубы Ранка – Хилша – простые аппараты без движущихся элементов, предназначенные для разделения высоконапорного закрученного потока газа на две фракции – охлажденную и подогретую. Эффект температурной сепарации газа впервые был описан французским инженером Ж. Ранком в 30-х годах прошлого века. Более детальное изучение процесса и поиск способов совершенствования конструкции вихревых труб начался с работ немецкого исследователя Р. Хилша.

На сегодняшний день существует множество типов вихревых труб, различающихся как конструктивно, так и по назначению. В процессах переработки природного и попутного газа используются двухпоточные и трехпоточные вихревые трубы [6, 12].

От способа закрутки газа, формы соплового ввода, угла ввода высоконапорного газа во многом зависит холодопроизводительность вихревых труб и доля конденсируемой влаги/тяжелых углеводородов. Традиционно для закрутки высоконапорного газа используется тангенциальное закручивающее устройство (ТЗУ), но данный способ закрутки имеет ряд недостатков (рис. 1, а):

- необходимость соосного расположения закручивающего устройства, камеры энергоразделения и диафрагмы отвода холодного потока;

- раздельное изготовление соплового ввода и закручивающей улитки вызывает потери давления на входе и высокий уровень шума.

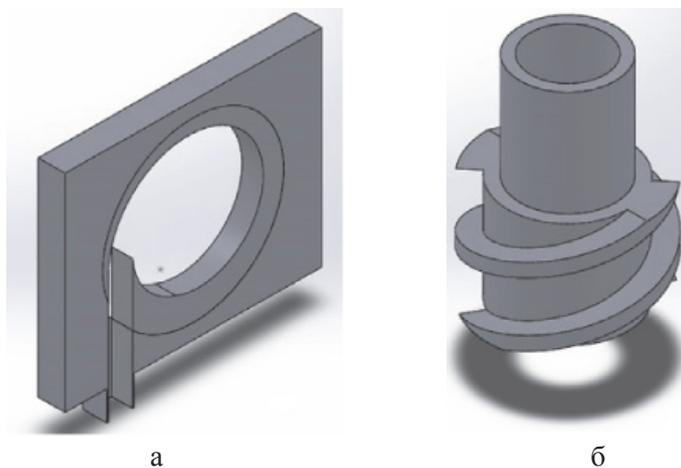


Рис. 1. Основные закручивающие устройства: а – тангенциальное закручивающее устройство; б – винтовое закручивающее устройство

Общий недостаток установок с использованием двухпоточных вихревых труб заключается в том, что слой конденсата, который образуется на стенках камеры энергоразделения, движется в сторону горячего конца трубы, разогревается вместе с общей массой газа и испаряется. Это обстоятельство понижает эффективность фазоразделения в системах с использованием двухпоточной ВТ.

Более эффективное удаление жидкости осуществляется трехпоточными вихревыми трубами. Так холодопроизводительность двухпоточной вихревой трубы при $\mu = 0,7$ составила 19°C , а трехпоточной трубы – 26°C [7]. Кроме того, существует возможность эксплуатации трехпоточных вихревых труб при малых перепадах давлениях ($\pi < 2$), т.е. в дозвуковом режиме истечения газа из сопла [8].

Большое значение в работе вихревых труб имеет тип закручивающего устрой-

ства. На наш взгляд, использование винтовых закручивающих устройств (ВЗУ) позволит решить вышеописанные проблемы и увеличить холодопроизводительность вихревой трубы [11] (рис. 1, б).

В данной работе нами была проведена работа по поиску оптимальной конструкции винтового закручивающего устройства путем моделирования течения газа при помощи CFD-анализа (CFD – computer fluid dynamic). Несмотря на то, что исследования эффекта Ранка –Хилша методом CFD анализа начались сравнительно недавно, было опубликовано большое число работ, в которых описана возможность применения средств CFD-анализа к моделированию вихревых труб [13, 14, 15]. Анализ работ по моделированию процесса термической сепарации показал, что внимание многих исследователей сосредоточено только на процессах, происходящих в камере энергоразделения. Зачастую исследуемые

модели вихревых труб упрощаются и не рассматриваются процессы в сопловом вводе вихревой трубы. К тому же в случае с ВЗУ процесс термической сепарации начинается непосредственно в закручивающем устройстве, и масштаб изменения температуры газа будет оказывать влияние на холодопроизводительность вихревой трубы и формирование пленки конденсата [11].

В качестве объекта исследования была выбрана проточная часть вихревой трубы со следующими параметрами:

- внутренний диаметр камеры энерго-разделения 30 мм;
- диаметр канала отвода охлажденного газа 14 мм;
- угол ввода газа варьировался от 65 до 75°;
- длина камеры энергоразделения составила 300 мм;
- длина и ширина прямоугольного соплового канала составила соответственно 20,4 и 3,8 мм (рис. 1).

Рабочим телом был выбран воздух при 27°C. Моделирование течения газа описывалось системой трехмерных уравнений Навье – Стокса, уравнениями состояния и энергии. В качестве модели турбулентности выступала стандартная k-ε модель. Математическая модель состояла из следующих уравнений.

Число элементов расчетной сетки составило около 1 млн. На входе задавалось граничное условие Bulk Mass Flow 0,3 kg/s. На горячем и холодном концах задавалось граничное условие Static Pressure 0,1 МПа.

Выбор оптимальной геометрии проводился путем сравнения векторных полей скоростей в винтовом закручивающем устройстве. Так, при рассмотрении винто-

вого закручивающего устройства с углом ввода высоконапорного газа в 65° была отмечена неравномерность поля скоростей и наличие «застойных» зон на входе в ВЗУ (рис. 3). На рис. 4 представлено векторное поле скоростей на котором так же заметна «застойная» зона на входе в ВЗУ и резкое увеличение скорости газа в области выхода из закручивающего устройства.

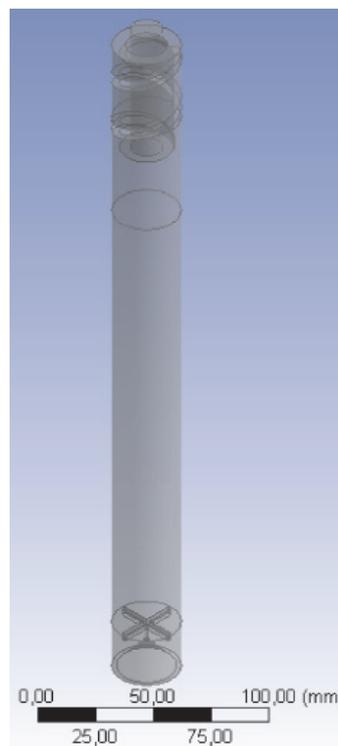


Рис. 2. Проточная часть исследуемой вихревой трубы

Математическая модель для описания течения газа в вихревой трубе

Уравнение	Математическое выражение
Сохранения массы	$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho U_j)}{\partial x_j} = 0$
Сохранения энергии	$\frac{\partial (\rho H)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho U_i)}{\partial x_j} = \frac{\partial P}{\partial t} - \frac{\partial (U_i \tau_{ij} + Q)}{\partial x_j} + \rho U_i f_i$
Сохранения импульса	$\frac{\partial (\rho U_j)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho U_i U_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho f_i$
Состояния	$P \vartheta = RT$
Модель турбулентной вязкости	$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho U_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k - \rho \epsilon$
Генерация турбулентной кинетической энергии	$P_k = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial U_i}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_k}{\partial x_k}$
Коэффициент диффузии	$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}$

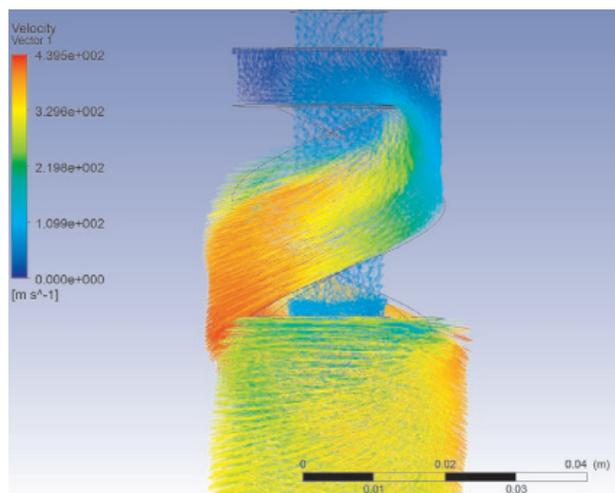


Рис. 3. Распределение векторного поля скоростей на входе в ВЗУ с углом ввода газа 65°

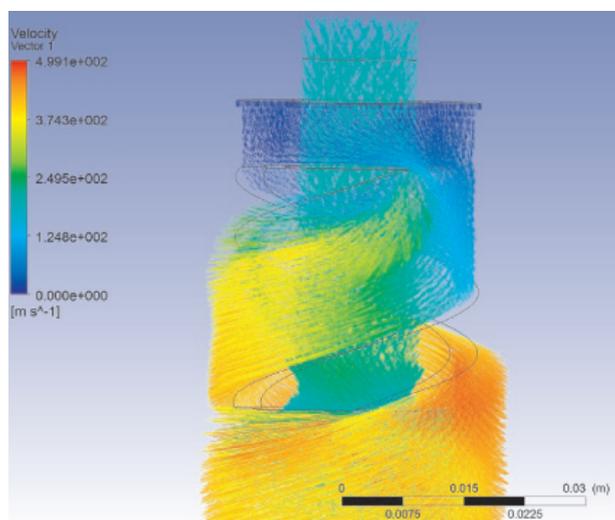


Рис. 4. Распределение векторного поля скоростей на входе в ВЗУ с углом ввода газа 70°

Подобное скачкообразное и неравномерное распределение скоростей в самом ВЗУ и на выходе приводит к следующим негативным последствиям. Во-первых, снижается холодопроизводительность вихревой трубы вследствие потерь энергии движения газа. Во-вторых, неравномерное распределение конденсата и его унос в приосевую область из-за скачкообразного характера поля скоростей на выходе газа из ВЗУ. В-третьих, вместе с неравномерным распределением скоростей происходит неравномерное распределение полей температур и давлений, что так же негативно сказывается на процессе образования пленки конденсата в пристеночной области.

Изначально было сделано предположение, что неравномерное течение возникает из-за острых кромок винтового канала. Для проверки этого острые края существующей модели ВЗУ были сделаны более пологими

(рис. 5). Моделирование течения газа показало, что заметного улучшения течения в этом случае не наблюдается.

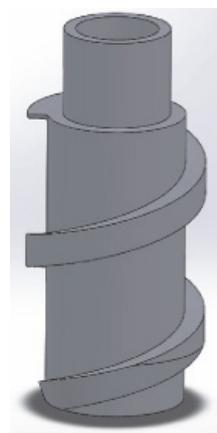


Рис. 5. Модель ВЗУ с пологими кромками входа и выхода газа

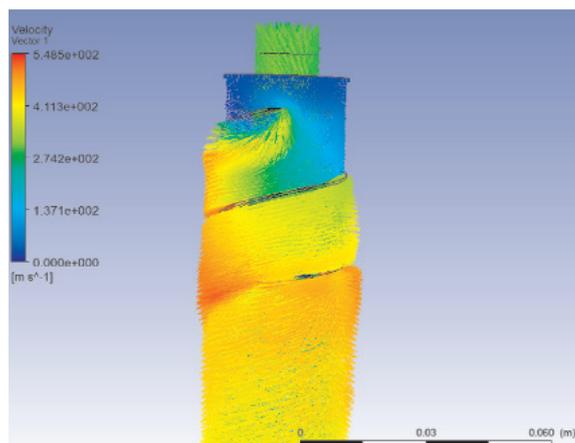


Рис. 6. Распределение векторного поля скоростей на входе в ВЗУ с углом ввода газа 75°

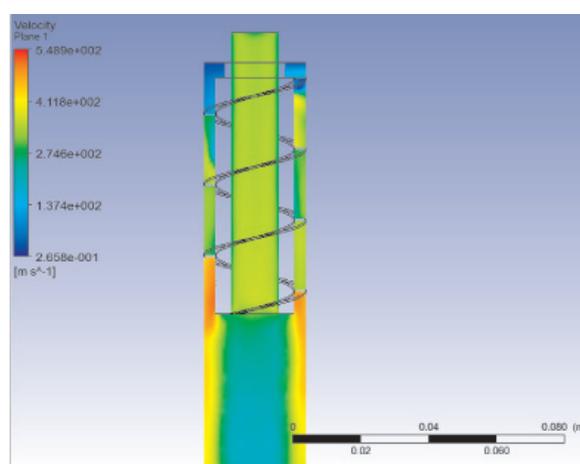


Рис. 7. Стабилизация поля скоростей по длине закручивающего устройства

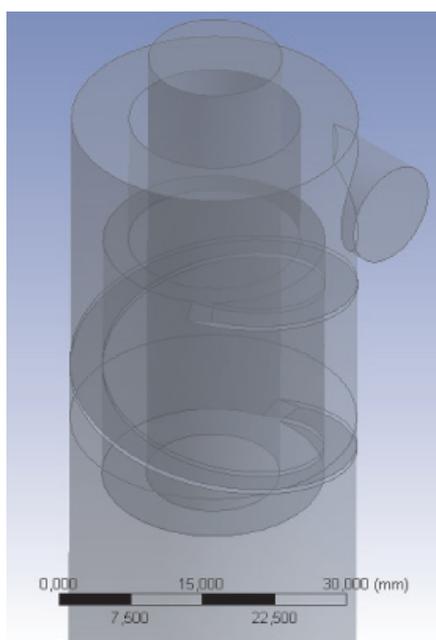


Рис. 8. Вид проточной части вихревой трубы с тангенциальным вводом газа

Отрицательные результаты были получены также при создании зазора между закручивающим устройством и стенкой вихревой трубы, изготовление спирали канала закрутки с переменным шагом, различными вариациями формы закручивающего канала и увеличением длины закрутки.

Следующим шагом исследования стало моделирование ВЗУ с максимально возможным углом ввода газа 75°. Моделирование показало практически полное исчезновение возмущений на выходе из закручивающего устройства (рис. 6). Также необходимо отметить, что увеличение длины участка закрутки положительно влияет на стабилизацию поля скоростей потока, которая начинается на 2–3 витках канала.

Значительно уменьшить «застойную» зону на входе газа в закручивающее устройство удалось тангенциальным вводом газа в вихревую трубу (рис. 8). При этом важно задать газу такое направление движения, которое совпадало бы с направлением закрутки каналов ВЗУ (рис. 9).

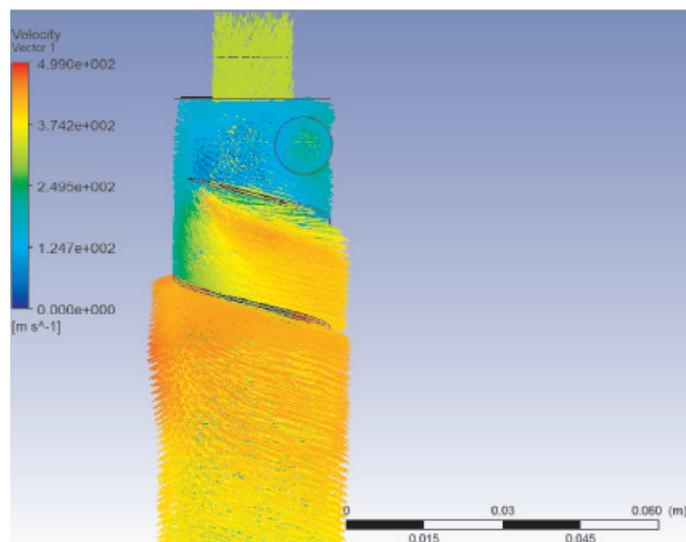


Рис. 9. Уменьшение «застойной» зоны на входе в ВЗУ, путем тангенциального ввода газа в вихревую трубу

Таким образом, из результатов моделирования различных конструкций винтового закручивающего устройства можно сделать следующие выводы. Во-первых, течение газа в ВЗУ имеет сложную структуру, и в случае использования вихревой трубы в качестве высокоскоростного низкотемпературного сепаратора необходимо добиваться равномерного распределения скоростей на входе и на выходе из ВЗУ для формирования слоя конденсата в пристеночной области. Во-вторых, наилучшие результаты по формированию равномерного поля скоростей показывают ВЗУ с максимально возможным углом ввода газа в 75° . С увеличением участка закрутки газа степень стабилизации потока увеличивается, однако с увеличением длины участка закрутки увеличивается и длина канала отвода холодного потока, из-за чего увеличивается температура охлажденного газа вследствие торможения газа о стенки канала. Кроме того, в вихревой трубе с углом ввода газа 75° отличается высокой холодопроизводительностью [1]. В-третьих, значительное уменьшение «застойных» зон возможно посредством тангенциального введения газа в вихревую трубу.

Список литературы

1. Артамонов Н.А., Качак В.В. Очистка газов. Вихревые и фотохимические аппараты. Теория и эксперимент: учебное пособие для вузов. – М.: ЗАО «Информ-Знание», 2002. – 336 с.
2. Бородин А.В. Технология переработки попутного нефтяного газа, перспективы извлечения целевых углеводородов // Мир нефтепродуктов. – 2011. – № 6. – С. 35–37.
3. Булатников В.В., Седышева С.А., Свитцов А.А. (ОАО «ВНИИ НП», ООО «Мембранный центр») Попутный нефтяной газ. Мембранные методы его разделения // Мир нефтепродуктов. – 2012. – № 6. – С. 3–8.
4. Бурцев С.А., Леонтьев А.И., Исследование влияния диссипативных эффектов на температурную стратификацию в потоках газа (обзор) // Теплофизика высоких температур. – 2014. – Т. 52, № 2. – С. 310–322.
5. Девислов В.А., Жидков Д.А. Газодинамическая очистка попутного нефтяного газа – путь к улучшению экологии планеты // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2014. – Т. 16, № 1 (6).
6. Жидков М.А., Гусев А.П., Рябов А.П., Вшивцев С.П., Кошовец Н.В., Коляко Б.Г., Соболев Е.П., Староконцев А.П. Трехпоточная вихревая труба – эффективное газодинамическое устройство для подготовки природного газа к транспорту // Нефть, газ и энергетика – июнь. – 2007.
7. Жидков М.А., Бунятов К.Г., Иванов Р.Н., Габдулхаков А.Х., Спиридонов В.С., Кирикова О.В., Жидков Д.А. Температурная эффективность высокоскоростных ТВТ на установке подготовки нефтяного газа Комсомольского месторождения (опыт пусконаладки) // Нефть. Газ. Новации. – 2012. – № 5. – С. 46–52.
8. Жидков М.А., Жидков Д.А., Лаптев Е.Н., Сыпин А.Г., Намазов М.О. Особенности работы ТВТ Добринского месторождения (опыт пусконаладки) // Нефть. Газ. Новации. – 2012. – № 9. – С. 6–11.
9. Каримова А.Р., Ипатов Е.А., Абдюшев Р.Р., Хамзин Ю.А., Давлетшин А.Р., Шириязданов Р.Р. Проблемы и перспективы переработки попутных нефтяных газов // Нефтегазохимия. – 2015. – № 1. – С. 17–20.
10. Малофеев В.В., Шаталов А.Н., Гревцов В.М., Сахабутдинов Р.З. (ТатНИПИнефть). Опыт использования электростанций для утилизации попутного нефтяного газа на нефтепромысловых объектах Татарстана // Нефтепромысловое дело. – 2008. – № 8. – С. 42–47.
11. Мухутдинов Р.Х., Амиров Р.Я., Альмеев Л.Э., Ханнанов М.М. Эффективность внедрения вихревых аппаратов (применительно к нефтехимическим производствам) / под общей редакцией Я.С. Амирова. – Уфа: Изд-во «Реактив», 2001. – 347 с.
12. Патент РФ № 2191957. Заявка 2003112496/06, 27.10. 2004. Способ работы устройства для ожижения газа

и устройства для ожижения газа. Белостоцкий Ю.Г., Кошелев А.М.

13. Abdol Reza Bramo, Nader Pourmahmoud. Computational fluid dynamics simulation of length to diameter ratio effects of the energy separation in a vortex tube // *Thermal science*. – 2012, – Vol. 15, № 3. – P. 833–848.

14. Dincer K., Tasdemir S., Baskaya S., Uysal B.Z. Modeling of the effect length to diameter ratio and nozzle number on performance of counterflow Ranque-Hilsch vortex tubes using artificial neural networks // *Applied thermal engineering*. – 2008. – № 28. – P. 2380–2390.

15. Tarunin E.L., Alikina O.N. Calculation of heat transfer in Ranque-Hilsch's vortex tube // *International journal for numerical methods in fluids*. – 2005. – № 48. – P. 107–113.

References

1. Artamonov N.A., Kachak V.V. *Ochistka gazov. Vihrevye i fotohimicheskie apparaty. Teorija i jeksperiment: uchebnoe posobie dlja vuzov*. M.: ZAO «Inform-Znanie», 2002. 336 p.

2. Borodin A.V. *Tehnologija pererabotki poputnogo nefljanogo gaza, perspektivy izvlechenija celevyh uglevodorodov // Mir nefteproduktov*. 2011. no. 6. pp. 35–37.

3. Bulatnikov V.V., Sedysheva S.A., Svitcov A.A. (OAO «VNII NP», OOO «Membrannyj centr») *Poputnyj nefljanoy gaz. Membrannye metody ego razdelenija // Mir nefteproduktov*. 2012. no. 6. S. 3–8.

4. Burcev S.A., Leontev A.I., *Issledovanie vlijanja dissipativnyh jeffektov na temperaturnuju stratifikaciju v potokah gaza (obzor) // Teplofizika vysokih temperatur*. 2014. T. 52, no. 2. pp. 310–322.

5. Devislov V.A., Zhidkov D.A. *Gazodinamicheskaja ochistka poputnogo nefljanogo gaza put k uluchsheniju jekologii planety // Izvestija Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk*. 2014. T. 16, no. 1 (6).

6. Zhidkov M.A., Gusev A.P., Rjabov A.P., Vshivcev S.P., Koshovec N.V., Koljako B.G., Sobol E.P., Starokoncev A.P. *Trehpotočnaja vihvovaja truba jeffektivnoe gazodinamicheskoe ustrojstvo dlja podgotovki prirodnoho gaza k transportu // Neft, gaz i jenergetika* ijun. 2007.

7. Zhidkov M.A., Bunjatov K.G., Ivanov R.N., Gabdulhakov A.H., Spiridonov V.S., Kirikova O.V., Zhidkov D.A. *Temperaturnaja jeffektivnost vysokorashodnyh TVT na ustanovke podgotovki nefljanogo gaza Komsomolskogo mestorozh-*

denija (opyt puskonaladki) // Neft. Gaz. Novacii. 2012. no. 5. pp. 46–52.

8. Zhidkov M.A., Zhidkov D.A., Laptev E.N., Sypin A.G., Namazov M.O. *Osobennosti raboty TVT Dobrinskogo mestorozhdenija (opyt puskonaladki) // Neft. Gaz. Novacii*. 2012. no. 9. pp. 6–11.

9. Karimova A.R., Ipatova E.A., Abdjushev R.R., Hamzin Ju.A., Davletshin A.R., Shirijazdanov R.R. *Problemy i perspektivy pererabotki poputnyh nefljanoy gazov // Neftegazohimija*. 2015. no. 1. pp. 17–20.

10. Malofeev V.V., A.N. Shatalov, V.M. Grevcov, R.Z. Sahabutdinov (TatNIPneft). *Opyt ispolzovanija jelektrostancij dlja utilizacii poputnogo nefljanogo gaza na neftepromyslovyh obektah Tatarstana // Neftepromyslovoe delo*. 2008. no. 8. pp. 42–47.

11. Muhutdinov R.H., Amirov R.Ja., Almeev L.Je., Hannanov M.M. *Jefferektivnost vnedrenija vihvovyh apparatov (primenitelno k neftehimicheskim proizvodstvam) / pod obshhej redakciej Ja.S. Amirova*. Ufa: Izd-vo «Reaktiv», 2001. 347 p.

12. Patent RF no. 2191957. *Zajavka 2003112496/06, 27.10.2004. Sposob raboty ustrojstva dlja ozhizhenija gaza i ustrojstva dlja ozhizhenija gaza*. Belostockij Ju.G., Koshelev A.M.

13. Abdol Reza Bramo, Nader Pourmahmoud. Computational fluid dynamics simulation of length to diameter ratio effects of the energy separation in a vortex tube // *Thermal science*. 2012, Vol. 15, no. 3. pp. 833–848.

14. Dincer K., Tasdemir S., Baskaya S., Uysal B.Z. Modeling of the effect length to diameter ratio and nozzle number on performance of counterflow Ranque-Hilsch vortex tubes using artificial neural networks // *Applied thermal engineering*. 2008. no. 28. pp. 2380–2390.

15. Tarunin E.L., Alikina O.N. Calculation of heat transfer in Ranque-Hilsch's vortex tube // *International journal for numerical methods in fluids*. 2005. no. 48. pp. 107–113.

Рецензенты:

Ахметов А.Ф., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Технология нефти и газа», Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа;

Гильмутдинов А.Т., д.т.н., профессор кафедры технологии нефти и газа, Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа.