

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ ВИХРЕВЫХ ГАЗОСЕПАРАТОРОВ

VORTEX GAS SEPARATORS DESIGN OPTIMIZATION

А. Н. Мусинский
Artem N. Musinskii

Пермский национальный
исследовательский
политехнический университет,
г. Пермь, Российская Федерация

Perm National Research
Polytechnic University,
Perm, Russian Federation

М. О. Перельман
Maksim O. Perelman

АО «Новомет-Пермь»,
г. Пермь, Российская Федерация

Novomet-Perm JSC,
Perm, Russian Federation

С. Н. Пещеренко
Sergey N. Peshcherenko

Пермский национальный
исследовательский
политехнический университет,
г. Пермь, Российская Федерация

Perm National Research
Polytechnic University,
Perm, Russian Federation

В настоящее время одним из способов интенсификации добычи нефти является увеличение депрессии на пласт путем снижения забойного давления, обычно до значений ниже давления насыщения. Поэтому в скважине образуется газожидкостная смесь, и в состав установок электроцентробежных насосов включают газосепараторы.

Однако, при увеличении дебита, во-первых, уменьшается время нахождения газожидкостной смеси в поле центробежных сил сепаратора и снижается эффективность сепарации. Во-вторых, возрастает вынос частиц породы, особенно в скважинах после гидроразрыва пласта, которые под действием центробежных сил скапливаются у стенок корпуса газосепараторов, что приводит к их гидроабразивному разрушению.

Возможным решением данной проблемы является применение вихревых газосепараторов, в которых используется укороченный сепарационный узел (шнек), после которого, вниз по течению, находится вихревая камера, где жидкость по инерции продолжает вращение. Первоначально, вихревые сепараторы разрабатывали с целью уменьшения гидроабразивного воздействия частиц породы на корпус за счет применения более коротких шнеков.

Целью данной работы является решение задачи об оптимизации конструкции вихревых газосепараторов. Нами предложен безразмерный критерий, определяющий величину коэффициента сепарации газосепараторов в зависимости от геометрических размеров вихревой камеры, условий эксплуатации: концентрации газа и частоты вращения вала. Проведены стендовые испытания трех новых конструкций вихревых газосепараторов в 5, 5А и 6 габаритах, показавшие, что зависимость имеет сравнительно узкий максимум, что позволяет подобрать оптимальные размеры вихревой камеры для заданных условий эксплуатации.

Currently, one of the ways to intensify oil production is to increase the depression to the reservoir by reducing the bottomhole pressure, usually to values below the saturation pressure. Therefore, a gas-liquid mixture is formed in the well, and gas separators are included in the composition of the electric centrifugal pump installations.

However, with an increase in flow rate, firstly, the time spent by the gas-liquid mixture in the field of centrifugal separator forces decreases and the separation efficiency decreases. Secondly, the removal of rock particles increases, especially in wells after hydraulic fracturing, which, under the action of centrifugal forces, accumulate at the walls of the gas separator housing, which leads to their hydroabrasive destruction.

Ключевые слова

вихревой газосепаратор;
коэффициент сепарации;
оптимизация;
безразмерный параметр

Key words

vortex gas separator;
separation coefficient;
optimization;
dimensionless parameter

A possible solution of this problem is the use of vortex gas separators, which use a shortened separation unit (screw), after which, downstream, there is a vortex chamber, where the liquid continues to rotate by inertia. Initially, vortex separators were designed to reduce the hydroabrasive effect of rock particles on the hull through the use of shorter screws.

The purpose of this work is to solve the problem of optimizing the design of vortex gas separators. We have proposed a dimensionless criterion that determines the value of the separation ratio of gas separators depending on the geometrical dimensions of the vortex chamber, the operating conditions: gas concentration and shaft rotation frequency. Bench tests of three new designs of vortex gas separators in 5, 5A and 6 dimensions were carried out, showing that the dependence has a relatively narrow maximum which allows choosing the optimal dimensions of the vortex chamber for the given operating conditions.

Введение

В настоящее время для интенсификации нефтедобычи применяют такие методы, как увеличение депрессии на пласт и гидроразрыв пласта. Депрессию увеличивают за счет снижения уровня жидкости в скважине. Однако когда давление на входе в насос становится ниже давления насыщения, из жидкости выделяются газовые пузырьки. Образуется газожидкостная смесь.

В проточных каналах насоса газ внутри пузырьков имеет примерно такую же скорость, что и окружающая пузырьки жидкость, но его плотность, а значит и кинетическая энергия, примерно в 103 раза меньше. Поэтому пузырьки газа не могут привести в движение окружающую их жидкость. Они малоподвижны и препятствуют течению в проточных каналах. Давление, создаваемое насосом, падает, что может привести к срыву подачи. Универсальным способом решения этой проблемы является применение предвключенных центробежных газосепараторов, которые часть газа сбрасывают в затрубное пространство.

Но в условиях интенсификации нефтедобычи, т.е. при увеличении дебита, во-первых, уменьшается время нахождения газожидкостной смеси в поле центробежных сил сепаратора, снижается эффективность сепарации. Во-вторых, возрастает вынос частиц породы, особенно в скважинах после гидроразрыва пласта. Эти частицы скапливаются в газосепараторах вблизи стенок корпуса, что приводит к их гидроабразивному разрушению. Ясно, что чем выше коэффициент сепарации, тем больше будет износ корпуса, вплоть до расчленения установки электроцентробежных насосов (УЭЦН) и падения на забой ее нижней части. Для ликвидации последствий таких

аварий требуются длительные и дорогостоящие ремонты скважин.

Проблема износа центробежных газосепараторов была решена за счет применения в качестве сепарационного узла геликоидальных шнеков [1, 2]. Компенсировать же падение сепарации из-за уменьшения времени нахождения газожидкостной смеси в поле центробежных сил сепаратора не удалось. Причина состоит в том, что увеличивать длину сепарационного узла можно только до определенного предела. При превышении этого предела в проточных каналах шнека образуется вихрь (неустойчивость Рэлея-Тейлора вращательного движения жидкости [3, 4]), и сепарация ухудшается.

Возможным решением данной задачи является применение вихревой конструкции газосепаратора. В вихревых газосепараторах используется укороченный сепарационный узел (шнек). После шнека, вниз по течению, находится вихревая камера (образованная внутренней поверхностью корпуса сепаратора и вращающимся валом). В вихревой камере жидкость по инерции продолжает вращение. Первоначально вихревые сепараторы разрабатывали с целью уменьшения гидроабразивного воздействия частиц породы на корпус за счет применения более коротких шнеков [5–7].

Целью данной работы является решение задачи об оптимизации конструкции вихревых газосепараторов. Во-первых, предлагается использовать шнек примерно такой же длины, как в центробежных сепараторах, но для уменьшения гидроабразивного воздействия на корпус применить геликоидальный шнек [8]. Во-вторых, на примере газосепараторов для высокодебитных скважин в 5, 5A и 6 габаритах провести комплекс стендовых

испытаний с целью оптимизации их сепарационных характеристик. В качестве варьируемой величины взять безразмерный параметр (описывающий как геометрию сепарационного узла, так и условия испытаний), впервые предложенный нами в [9].

Методика испытаний и конструкция газосепараторов

Схема испытательного стенда представлена на рисунке 1.

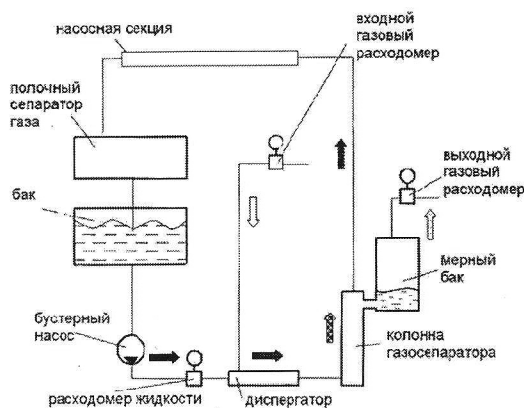


Рисунок 1. Схема стенда для измерения сепарационных характеристик газосепараторов

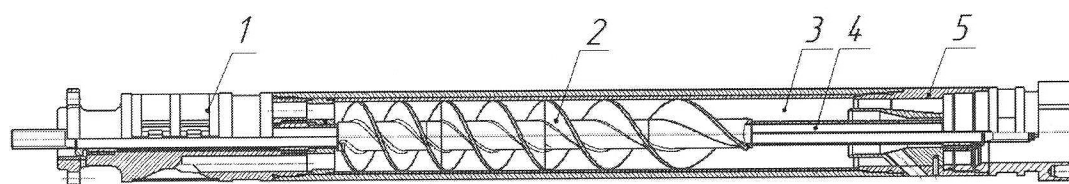
Испытания проводились на газожидкостной смеси (вода + воздух + ПАВ), моделирующей пластовую жидкость, которая бустерным насосом подавалась на вход диспергатора. Поддачи воздуха и воды измерялись до их перемешивания, что повышает точность измерений. В диспергаторе создается мелкодисперсная газожидкостная смесь со средним размером пузырьков газа 0,1–0,2 мм, типичным для скважинных условий [10]. Далее смесь поступает в газосепаратор, установленный вертикально внутри модели обсадной колонны. По системе трубопроводов выход газосепаратора соединяется с насосной секцией, также как и в скважинных условиях. Выкидные отверстия для газа, выполненные

в корпусе газосепаратора, соединены с мерным баком, в который поступают отсепарированный газ и часть жидкости. Объем отсепарированного газа измеряется с помощью газового расходомера, установленного на выходе из мерного бака. По разнице потоков газа на входе в диспергатор и на выходе из мерного бака определяется остаточный объем газа, поступающего в насосную секцию после газосепаратора. Часть газа, прошедшая вместе с рабочей жидкостью в насосную секцию, окончательно отделяется от жидкости в полочном сепараторе после насосной секции.

Стенд [11] позволяет проводить измерения рабочих характеристик газосепаратора в диапазоне подач от 7 до 1300 м³/сут, объемная концентрация газа в газожидкостной смеси может достигать 95 %. Частота вращения вала изменялась от 1000 до 6000 об/мин. Температура газожидкостной смеси на входе и выходе газосепаратора поддерживалась постоянной, равной 23 °С.

Измеряли следующие величины, используемые для получения рабочих характеристик газосепараторов: $Q_{ж}$ — объемная подача жидкости; q_1 — объемная подача газа, подаваемая в систему при нормальных условиях; P_1 — давление на входе (1 атм); P_2 — давление на выходе газосепаратора (давления на входе в газосепаратор и в области его выкидных отверстий поддерживали примерно равными, отличие не превышало 0,01 атм); q_2 — объемная подача газа на выходе из резервуара, собирающего сброшенный из выкидных отверстий газосепаратора газ, измеренная при нормальных условиях; V — объем жидкости в баке, связанном с затрубным пространством; t — время работы газосепаратора, пока затрубье соединено с резервуаром.

Конструкция газосепараторов соответствует патенту [8] и представлена на рисунке 2.



1 — входной модуль; 2 — геликоидальный шнек; 3 — вихревая камера; 4 — вал; 5 — разделитель

Рисунок 2. Общий вид вихревого газосепаратора для высокоскоростных скважин

В процессе испытаний экспериментальные данные автоматически записывали в файл. По измеренным величинам рассчитывались объемная концентрация газа в смеси перед входом в газосепаратор $\beta_{вх}$

$$\beta_{вх} = \frac{q_1}{q_1 + Q_{жк}} \tag{1}$$

и остаточная объемная концентрация газа в смеси после газосепаратора $\beta_{ост}$

$$\beta_{ост} = \frac{q_1 - q_2}{(q_1 - q_2) + \left(Q_{жк} - \frac{V}{t}\right)} \tag{2}$$

Затем вычисляется коэффициент сепарации K [12]:

$$K = \frac{\beta_{вх} - \beta_{ост}}{\beta_{вх} - \beta_{ост} \beta_{ост}} \tag{3}$$

Подача газожидкостной смеси на вход в насос:

$$Q_{гжк} = (q_1 - q_2) + \left(Q_{жк} - \frac{V}{t}\right) \tag{4}$$

Для описания сепарации использовали модель, предложенную в [9]. Считали, что коэффициент сепарации определяется числом оборотов пузырька газа вокруг вала газосепаратора в шнеке (k) и в вихревой камере (m).

Число оборотов в шнеке $k = const$ и определяется только конструкцией шнека, не зависит от условий работы газосепаратора: подачи, частоты вращения вала, концентрации газа.

Число оборотов в вихревой камере $m \sim n \cdot t$, где n — частота вращения вала; t — время нахождения пузырька газа в вихревой камере, которое пропорционально длине вихревой камеры (L) и средней скорости пузырька газа (u_r) $t \sim L/u_r$.

Средняя скорость движения пузырьков газа определяется как отношение: $u_g \sim Q_g/S$, где Q_g — подача по газу; S — площадь кольцевого канала вихревой камеры, т.е. $t \sim LS/Q_g$.

Подачу по газу выразим через подачу газожидкостной смеси $Q_{гжк}$, для чего воспользуемся определением концентрации газа в смеси: $\beta = Q_g/Q_{гжк}$, откуда $Q_g = \beta Q_{гжк}$, поэтому

$$t \sim \frac{LS}{\beta Q_{гжк}}, \quad m \sim \frac{LSn}{\beta_{вх} Q_{гжк}} \tag{5}$$

Коэффициент сепарации монотонно убывает с увеличением подачи и имеет минимальное значение при $Q_{гжк} = Q_{max}$, где Q_{max} — максимальная подача газосепаратора, при которой его напор равен нулю. Определим безразмерный параметр X , характеризующий число оборотов пузырька газа вокруг оси газосепаратора, следующим образом:

$$X = \frac{LSn}{\beta_{вх} Q_{max}} \tag{6}$$

Зависимость $K(X)$ определяет минимальную величину коэффициента сепарации при варьировании геометрии вихревой камеры сепаратора (L, S) для различных условий эксплуатации ($\beta_{вх}, n$).

Результаты испытаний и их обсуждение

Были испытаны три конструкции газосепараторов ГН5-600, ГН5А-900 и ГН6-1000: в 5, 5А и 6 габарите с максимальными подачами 600, 900 и 1000 м³/сут соответственно. При испытаниях каждого газосепаратора варьировали частоту вращения вала n в пределах от 1000 до 5000 об/мин; концентрацию газа на входе $\beta_{вх}$ от 20 % до 80 %; длину вихревой камеры L от 50 до 250 мм.

Рассмотрим последовательность испытаний на примере газосепаратора ГН5-600. На первом этапе получали напорно-расходную характеристику газосепаратора $H(Q)$ при фиксированных $n, \beta_{вх}, L$ из указанного выше диапазона их варьирования. Находили максимальную подачу газосепаратора Q_{max} . В качестве примера на рисунке 3 приведена одна из таких зависимостей. Видно, что $Q_{max} = 620$ м³/сут.

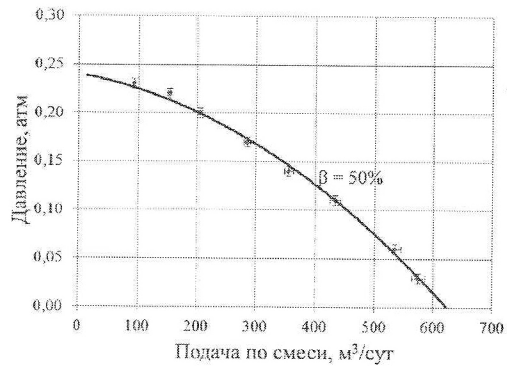


Рисунок 3. $H(Q)$ газосепаратора ГН5-600
 $n = 3000$ об/мин, $\beta_{вх} = 50\%$, $L = 120$ мм

Затем измеряли коэффициент сепарации K при $Q < Q_{max}$ и экстраполировали полученные значения на подачу Q_{max} (получили $K = 0,73$, см. рисунок 4).

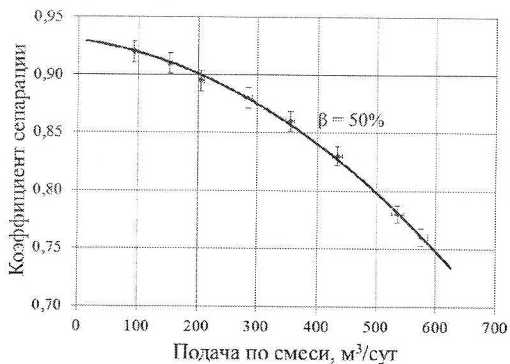


Рисунок 4. $K(Q)$ газосепаратора ГН5-600
при $n = 3000$ об/мин, $\beta_{вх} = 50\%$, $L = 120$ мм

По полученным данным строили зависимость $K(X)$ (рисунок 5), откуда видно, что эта зависимость немонотонная, с максимумом при $X \sim 21-22$.

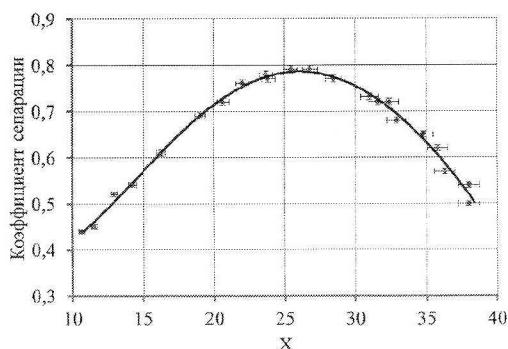


Рисунок 5. Зависимость $K(X)$ для газосепаратора ГН5-600

Результаты испытаний ГН5А-900 приведены на рисунке 6. Зависимость $K(Q)$ также имеет максимум при $X \sim 22$.

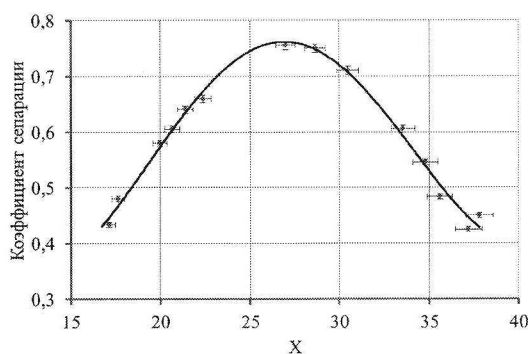


Рисунок 6. Зависимость $K(X)$ для газосепаратора ГН5А-900

Аналогичные результаты были получены при испытании ГН6-1000 (рисунок 7). Максимум функции $K(X)$ находится при $X \sim 23$.

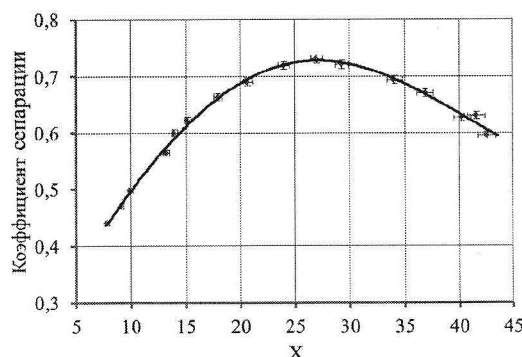


Рисунок 7. Зависимость $K(X)$ для газосепаратора ГН6-1000

Для всех газосепараторов максимуму функции $K(X)$ соответствует значение X_0 из сравнительно узкого интервала значений, от 21 до 23. Следовательно, геометрические размеры вихревой камеры газосепаратора для заданных условий эксплуатации (β_{ex}, n) определяются следующей зависимостью:

$$L \times S = \frac{X_0 \times Q_{max} \times \beta_{ex}}{n} \quad (7)$$

Выводы

1. Предложен безразмерный критерий $X = LSn/(\beta_{ex} Q_{max})$, определяющий величину коэффициента сепарации газосепараторов K в зависимости от геометрических размеров вихревой камеры (L, S) и условий эксплуатации: концентрации газа (β_{ex}) и частоты вращения вала (n).

2. Проведены стендовые испытания трех новых конструкций вихревых газосепараторов в 5, 5А и 6 габаритах, показавшие, что зависимость $K(X)$ имеет максимум при $21 \leq X_0 \leq 23$.

3. Величина X_0 критерия подобия вихревых газосепараторов позволяет подобрать оптимальные размеры вихревой камеры (L, S) для заданных условий эксплуатации (β_{ex}, n).

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Перельман М.О., Пешеренко М.П., Пешеренко С.Н. Особенности многофазных течений в газосепараторах, определяющие их гидроабразивную стойкость // Бурение и нефть. 2013. № 5. С. 42–44.
2. Пат. 2363842 РФ, МПК Е 21 В 43/48. Абразивостойкий газосепаратор / С.Н. Пешеренко, М.П. Пешеренко, А.И. Рабинович, М.О. Перельман, Г.Л. Дорогокупец, О.Е. Иванов, П.Б. Куприн, М.Ю. Мельников. 2008108255/03, Заявлено 03.03.2008, Опубл. 10.08.2009. Бюл. 22.
3. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: учеб. пособие: в 10 т. 3-е изд., перераб. М.: Наука, 1986. Т. VI: Гидродинамика. 736 с.

4. Andereck C.D., Liu S., Swinney H.L. Flow Regimes in a Circular Couette System with Independently Rotating Cylinders // Journal of Fluid Mechanics. 1986. Vol. 164. P. 155–183.
5. Wilson B.L. Gas Separation: A New Generation, A New Twist // Gulf Coast Section Electric Submersible Pump Workshop held in Houston, Texas, 27-29 April 2005.
6. Product Sheets of Vortex Gas Separator Assembly. Schlumberger, 2016.
7. Якимов С.Б., Шпюртко А.А., Шалагин Ю.Ю. О путях повышения надежности газосепараторов ЭЦН на месторождениях ПАО «НК «Роснефть» // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. 2017. № 1. С. 33-40.

8. Пат. 161892 РФ, МПК Е 21 В 43/38. Вихревой газосепаратор / А.Н. Мусинский, М.П. Пешчеренко, С.Н. Пешчеренко. 2015100464/03, Заявлено 12.01.2015, Оpubл. 10.05.2016. Бюл. 13.

9. Пешчеренко М.П., Перельман М.О., Пешчеренко С.Н. Универсальная сепарационная характеристика центробежного газосепаратора // Нефтяное хозяйство. 2015. № 1. С. 105–108.

10. Мищенко И.Т. Скважинная добыча нефти: учебное пособие для вузов. М.: Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2003. 816 с.

11. Пат. 2531090 РФ, МПК Е 21 В 43/38. Способ испытания газосепараторов на газожидкостных смесях и стенд для его осуществления / А.Н. Мусинский, М.П. Пешчеренко, С.Н. Пешчеренко. 2013140877/06, Заявлено 04.09.2013, Оpubл. 20.10.2014. Бюл. 29.

12. Денгаев А.В. Повышение эффективности эксплуатации скважин погружными центробежными насосами при откачке газожидкостных смесей: дис. ... канд. техн. наук. М., 2005. 194 с.

REFERENCES

1. Perelman M.O., Peshcherenko M.P., Peshcherenko S.N. Osobennosti mnogofaznykh techenii v gazoseparatorakh, opredelyayushchie ikh gidroabrazivnyuyu stoikost' [Peculiarities of Multi-Phase Flows Determining Hydroabrasive Strength of Gas Separators]. *Burenie i nefi' — Drilling and Oil*, 2013, No. 5, pp. 42–44. [in Russian].

2. Peshcherenko M.P., Peshcherenko S.N., Perelman M.O. e.a. *Abrazivostoiiki gazoseparator* [Abrasive-Stable Gas Separator]. Patent RF, No. 2363842, 2009. [in Russian].

3. Landau L.D., Lifshic E.M. *Teoreticheskaya fizika: Uchebnoe posobie* [Theoretical Physics: Textbook]. Moscow, Nauka Publ., 1986 p. [in Russian].

4. Andereck C.D., Liu S., Swinney H.L. Flow Regimes in a Circular Couette System with Independently Rotating Cylinders. *Journal of Fluid Mechanics*, 1986, Vol. 164, pp. 155–183.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ABOUT THE AUTHORS

Мусинский Артем Николаевич, старший преподаватель кафедры физических и технологических проблем нефтедобычи, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Российская Федерация

Artem N. Musinskii, Senior Lecturer of Physical and Technological Problems of Oil Production Department, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

e-mail: musinskij.an@novomet.ru

Перельман Максим Олегович, генеральный директор АО «Новомет-Пермь», г. Пермь, Российская Федерация

Maksim O. Perelman, General Director, Novomet-Perm JSC, Perm, Russian Federation

e-mail: maxim@novomet.ru

Пешчеренко Сергей Николаевич, д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой физических и технологических проблем нефтедобычи, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Российская Федерация

Sergey N. Peshcherenko, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of Physical and Technological Problems of Oil Production Department, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

e-mail: psn@novomet.ru

5. Wilson B.L. Gas Separation: A New Generation, A New Twist. *Gulf Coast Section Electric Submersible Pump Workshop held in Houston, Texas*, 2005, pp. 27–29.

6. *Product Sheets of Vortex Gas Separator Assembly*, Schlumberger, 2016.

7. Yakimov S.B., Shportko A.A., Shalagin Yu. Yu. O putyakh povysheniya nadezhnosti gazoseparatorov ETsN na mestorozhdeniyakh PAO «NK «Rosneft» [Ways of Improving Gas Separators Reliability Used to Protect Electric Centrifugal Pumps (ESP) in the Deposits of PJSC «NK «Rosneft»]. *Oborudovanie i tekhnologii dlya neftegazovogo kompleksa — Equipment and Technologies for Oil and Gas Complex*, 2017, No. 1, pp. 33–40. [in Russian].

8. Musinskij A.N., Peshcherenko M.P., Peshcherenko S.N. *Vikhrevoi gazoseparator* [Vortex Gas Separator]. Patent RF, No. 161892, 2015. [in Russian].

9. Peshcherenko M.P., Perelman M.O., Peshcherenko S.N. Universal'naya separatsionnaya kharakteristika tsentrobezhnogo gazoseparatora [Universal Separation Curve for Centrifugal Gas Separators]. *Neftyanoe hozyajstvo — Oil Industry*, 2015, No. 1, pp. 105–108. [in Russian].

10. Mishchenko I.T. *Skvazhinnaya dobycha nefii: Uchebnoe posobie dlya vuzov* [Downhole Oil Production: Textbook for Universities]. Moscow, Neft i gaz Publ. of Gubkin Russian State University of Oil and Gas, 2003. 816 p. [in Russian].

11. Ostrovskij V.G., Perelman M.O., Peshcherenko S.N. *Sposob ispytaniya gazoseparatorov na gazozhidkostnykh smesyakh i stend dlya ego osushchestvleniya* [The Method of Testing Gas Separators on Gas-Liquid Medium and Stand for its Implementation]. Patent RF, No. 2531090, 2013. [in Russian].

12. Dengaev A.V. *Povyshenie effektivnosti ekspluatatsii skvazhin pogruzhnymi tsentrobezhnymi nasosami pri otkachke gazozhidkostnykh smesei: dis. kand. tekhn. nauk* [Improving the Efficiency of Well Operation by Submersible Centrifugal Pumps: Cand. Engin. Sci. Diss.]. Moscow, 2005. 194 p. [in Russian].