Нефтегазовое дело. 2021. Т. 19, № 5. С. 67–74. ISSN 2073-0128 (print)

Petroleum Engineering. 2021. Vol. 19, No. 5, P. 67–74. ISSN 2073-0128 (print)

Научная статья

УДК 620.193.13, 004.942

doi: 10.17122/ngdelo-2021-5-67-74

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОАБРАЗИВНОГО ИЗНОСА ЭЛЕМЕНТОВ ГАЗОПРОМЫСЛОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Марина Ильшатовна Насырова¹, Вадим Дмитриевич Липатов¹,
Рамиль Наилевич Имашев¹, Владимир Иванович Савичев¹,
Владимир Владимирович Жонин¹, Константин Владимирович Литвиненко¹,
Вадим Николаевич Абрашов², Михаил Александрович Скоробогач²

¹ ООО «РН-БашНИПИнефть», Уфа, Россия

² АО «Сибнефтегаз», Новый Уренгой, Россия

Автор, ответственный за переписку

Марина Ильшатовна Насырова, NasyrovaMI@bnpi.rosneft.ru

Аннотация. При эксплуатации газовых и газоконденсатных скважин с пескопроявлением высок риск эрозионного износа элементов газосборных систем, фонтанной арматуры и внутрискважинного оборудования в результате воздействия абразивных частиц. В связи с этим есть необходимость в непрерывном мониторинге работы промышленного оборудования и прогнозировании технического состояния элементов промыслового оборудования для своевременного выявления неисправностей и предотвращения аварийных ситуаций, связанных с механическим износом оборудования.

Одним из наиболее перспективных методов прогнозирования скорости эрозии материалов является численное моделирование с помощью методов конечных элементов, дискретных элементов и контрольных объёмов. Интегрированное моделирование позволяет учитывать множество особенностей физических явлений и с достаточной точностью производить расчёт скорости эрозии в широком диапазоне условий эксплуатации промышленного оборудования.

Разработана альтернативная модель эрозии, которая легла в основу численного моделирования эрозионного износа элементов газопромыслового оборудования в широком диапазоне рабочих параметров. В данной работе представлены результаты имитационного моделирования газоабразивного износа таких элементов газопромыслового оборудования, как отводы, тройники, переходы, крестовины, задвижки и другие. Разработаны геометрические, сеточные и численные модели ряда элементов газопромыслового оборудования в программе ANSYS Fluent. Выполнена качественная и количественная оценка скорости эрозии для каждого из элементов оборудования. Определены элементы оборудования, наиболее подверженные газоабразивному износу, а также основные эрозионные параметры, влияющие на интенсивность эрозионного износа.

Предложен способ визуализации результатов моделирования с помощью номограмм для определения скорости эрозии для различных элементов газопромыслового оборудования.

Для цитирования

Насырова М.И., Липатов В.Д., Имашев Р.Н., Савичев В.И., Жонин В.В., Литвиненко К.В., Абрашов В.Н., Скоробогач М.А. Численное моделирование газоабразивного износа элементов газопромыслового оборудования // Нефтегазовое дело. 2021. Т. 19, № 5. С. 67-74. <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2021-5-67-74>.

© Насырова М.И., Липатов В.Д., Имашев Р.Н., Савичев В.И., Жонин В.В., Литвиненко К.В., Абрашов В.Н., Скоробогач М.А., 2021

Ключевые слова

эрозия, газопромысловое оборудование, газоабразивный износ, численное моделирование, механические примеси

Original article

NUMERICAL SIMULATION OF GAS-ABRASIVE WEAR OF INDUSTRIAL EQUIPMENT ELEMENTS

Marina I. Nasyrova¹, Vadim D. Lipatov¹, Ramil N. Imashev¹,
Vladimir I. Savichev¹, Vladimir V. Zhonin¹, Konstantin V. Litvinenko¹,
Vadim N. Abrashov², Mikhail A. Skorobogach²

¹ BashNIPIneft LLC, Ufa, Russia

² Sibneftegaz JSC, Novy Urengoy, Russia

Corresponding author

Marina I. Nasyrova, NasyrovaMI@bnipi.rosneft.ru

Abstract. There is a huge risk of erosion wear by solid particles of gas-gathering, pipeline systems and production equipment elements while gas and gas-condensate wells exploitation complicated by the presence of sand. Thereby, it's necessary to provide industrial equipment elements operational permanent control and prediction of their technical condition in order to detect disrepairs and prevent failures occurring due to abrasive wear of equipment.

Numerical simulation involving finite elements method, discrete elements method and finite volume method is considered to be one of the most promising approaches to predict erosion rate of different materials. Integrated modelling makes it possible to take various physical processes into consideration and calculate erosion rate in a wide range of industrial equipment operational conditions at high level of accuracy.

In this study an alternative erosion model is developed and used as the basis of numerical simulation of erosion wear of industrial equipment elements in a wide range of operational parameters.

In this paper results of numerical simulation of gas-abrasive wear of various elements of industrial equipment, such as elbows, tees, reducers, crosses, valves etc. are represented. Industrial equipment elements' geometric, meshed and numerical models are developed in ANSYS Fluent. Erosion rate of each element is qualitatively and quantitatively assessed. Most wearable equipment elements and most significant erosion parameters influencing on the erosion wear intensity are determined.

A new numerical results visualization method is suggested, it represents a range of nomograms to predict erosion rate for different industrial equipment elements.

Keywords

erosion, industrial equipment, gas-abrasive wear, numerical simulation, mechanical impurities

For citation

Nasyrova M.I., Lipatov V.D., Imashev R.N., Savichev V.I., Zhonin V.V., Litvinenko K.V., Abrashov V.N., Skorobogach M.A. Chislennoe modelirovanie gazoabrazivnogo iznosa elementov gazopromyslovogo oborudovaniya [Numerical Simulation of Gas-Abrasive Wear of Industrial Equipment Elements]. *Neftegazovoe delo — Petroleum Engineering*, 2021, Vol. 19, No. 5, pp. 67-74 [in Russian]. <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2021-5-67-74>.

Введение

Эксплуатация газовых и газоконденсатных скважин осложнена выносом в скважину из пласта механических примесей вследствие разрушения породы пласта, а также материалов, использованных в процессе гидроразрыва пласта (ГРП). Снижение эффективности эксплуатации оборудования при добыче, транспорте и подготовке газа и газоконденсата связано с его эрозионным разрушением. При этом предприятие вынуждено нести значительные затраты на его восстановление.

При интенсивном выносе твёрдых частиц из пласта происходят эрозионные процессы в элементах и узлах газопромыслового оборудования. Износ деталей оборудования происходит за счёт повторяющихся ударных воздействий абразивных частиц о стенки элементов оборудования, с образованием характерных локальных дефектов, способствующих развитию газоабразивного износа, а именно утонению стенки в областях контакта с абразивом, тем самым снижая эксплуатационные свойства оборудования и остаточный ресурс.

Для обеспечения надёжности и безопасности эксплуатации систем сбора и транспорта газа в условиях выноса механических примесей необходима разработка решений, направленных на организацию системы мониторинга и прогнозирования скорости эрозии для ряда элементов газопромыслового оборудования. Поэтому разработка физико-математической модели эрозионного износа является важным этапом на пути создания системы прогнозирования рисков развития газоабразивного износа материалов и предельного состояния промысловых объектов.

В статье представлены результаты численного моделирования процессов эрозии, по которым выполняется расчёт скорости газоабразивного износа элементов газопромыслового оборудования.

Обзор известных моделей и методик

В настоящее время известен ряд математических моделей эрозионного износа, в том числе, вошедших в основу различных рекомендаций по обеспечению безопасности при эксплуатации скважинного оборудования и трубопроводных систем. Среди них можно выделить рекомендации Американского института нефти [1], позволяющие рассчитывать критическую скорость потока и скорость эрозии трубопроводной обвязки и арматуры в многофазных системах. Широкое применение в промышленной практике получил стандарт, разработанный норвежскими специалистами [2]. В нём методика расчёта скорости эрозии основана на комбинации результатов моделирования и экспериментальных данных для ряда стандартных элементов трубопроводных систем: участков труб, отводов, переходов и др.

Имеются научные публикации, посвящённые практическим исследованиям эрозионного износа материалов. К ним можно отнести работы I. Finnie [3], J.G.A. Bitter [4, 5], G.P. Tilly [6] и других, чьи исследования легли в основу современных модернизированных моделей эрозии. Идеи ударно-контактного взаимодействия пар материалов, являющиеся фундаментальными в плане исследования эрозионных процессов, представлены в работе [7].

К развитию расчётных методов, лежащих в основе современных математических программных комплексов, можно отнести работы Y.I. Oka [8, 9], W. Tabakoff и G. Grant [10], S. A. Shirazi и B. S. McLauri [11]. Модели эрозии, представленные в данных научных иссле-

дованиях, являются эмпирическими, и каждая из моделей имеет свою область применимости; в частности, модель Табакова-Гранта используется для расчёта скорости эрозии узлов турбомашин, модель Ока справедлива для ограниченного круга испытанных пар материалов. Отдельно стоит отметить современную модель Ширази-Маклори, позиционирующуюся как полумеханистическая модель и представляющую собой альтернативу устаревшей методике расчёта скорости эрозии по API RP.

Однако несмотря на огромное множество известных методов, моделей и рекомендаций по расчёту эрозии, нельзя однозначно руководствоваться только одной из них при расчёте скорости эрозии элементов газопромыслового оборудования в силу узких границ их применимости. Универсальной модели эрозии на настоящий момент не существует, и для расчёта скорости эрозии промышленного оборудования необходимо прибегнуть к разработке альтернативной модели, применимой для выполнения расчёта скорости эрозии элементов оборудования в рамках поставленных задач.

Концепция альтернативной модели эрозии

Альтернативная модель эрозии представляет собой зависимость вида:

$$ER = K \cdot \frac{m_{\text{общ}}}{F \cdot \rho_{\text{мат}}} \sum_{i=1}^N v_i^n \cdot f(\alpha_i) \cdot \frac{1}{N_{\text{общ}}}, \quad (1)$$

где ER — скорость эрозии, м/год;

K — материальная константа. Характеризует характер взаимодействия пары материалов сталь-абразив;

$m_{\text{общ}}$ — дифференциальный массовый расход абразивных частиц, кг/с. Характеризует количество частиц, попавших в область максимального износа;

F — характерная площадь ударного контакта абразива и мишени, м²;

$\rho_{\text{мат}}$ — плотность мишени (стали), кг/м³;

v — скорость потока несущей среды, м/с;

n — экспонента скорости. Характеризует степень влияния скорости потока на скорость эрозии;

$f(\alpha_i)$ — функция угла атаки. Характеризует степень влияния угла атаки на скорость эрозии;

$N_{\text{общ}}$ — общее количество абразивных частиц в исследуемой области.

Представленная модель является модификацией общеизвестных моделей и участвует в качестве одной из основных расчётных фор-

мул в численной модели для определения глубины поражения деталей газопромыслового оборудования от воздействия абразива. Функция угла атаки рассчитывается по следующей формуле [12]:

$$f(\alpha) = \sin \alpha \cdot (\sin^2 \alpha + B \cdot \cos^2 \alpha), \quad (2)$$

где B — эмпирическая константа.

Эмпирические константы K и B , а также экспонента скорости n определяются, исходя из результатов лабораторных экспериментов пар материалов на газоабразивный износ. Методика проведения лабораторных испытаний подробно описана в работе [13]. Значения экспериментальных констант, а также марки сталей, участвовавшие в лабораторных испытаниях, представлены в таблице 1.

В качестве механических примесей использовался кварцевый песок, выбранный в качестве абразивного агента по результатам гранулометрического и минералогического анализов проб, отобранных со скважин (сепараторов). Это наиболее распространенный и твердый минерал всего спектра компонентов проб механических примесей с твердостью 7 единиц по шкале Мооса.

Таблица 1. Значения эмпирических констант по результатам лабораторных испытаний пар материалов

Table 1. Values of empirical constants based on laboratory tests results of pairs of materials

Параметр	Марка стали	
	09Г2С	30ХМА
K	$3,7 \cdot 10^{-10}$	$2,65 \cdot 10^{-11}$
n	3,2	3,94
B	4,2	

Основные уравнения

Физико-математической модели эрозии

Численное моделирование газоабразивного износа элементов газопромыслового оборудования методом вычислительной гидрогазодинамики проведено в три основных этапа: моделирование поля потока несущей среды; отслеживание траекторий движения дискретной фазы (механических примесей); расчёт скорости эрозии.

Несущей средой является природный газ, рассматривающийся в качестве сплошной среды. Решение задачи моделирования потока газа сводится к описанию замкнутой математической модели, включающей осреднённые

по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса. В качестве модели турбулентности на данном этапе моделирования использовалась гибридная двухпараметрическая модель Ментера SST (Shear-Stress Model) [14], с достаточной точностью решающая турбулентный пограничный слой.

Общие уравнения математической модели представлены уравнениями неразрывности и моментов соответственно:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot \vec{u}) = 0, \quad (3)$$

где ρ — плотность несущей среды (газа), кг/м³;

$\vec{u}$ — вектор мгновенной скорости потока газа, м/с;

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \cdot (\rho \cdot \vec{u}) + \nabla \cdot (\rho \cdot \vec{u} \cdot \vec{u}) = \\ = -\nabla \cdot P + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \cdot \vec{g} + \vec{S}_M, \end{aligned} \quad (4)$$

где P — статическое давление, атм;

$\bar{\tau}$ — тензор напряжений;

$\vec{g}$ — вектор ускорения свободного падения, м/с²;

$\rho \cdot \vec{g}$ — массовые силы, действующие по всему объёму газа;

$\vec{S}_M$ — дополнительный момент, создаваемый дискретной фазой.

Отслеживание траекторий движения частиц дискретной фазы сводится к описанию движения частиц в лагранжевых координатах согласно второму закону Ньютона:

$$m_p \cdot \frac{d\vec{u}_p}{dt} = \vec{F}_D + \vec{F}_P + \vec{F}_{VM} + \vec{F}_G, \quad (5)$$

где $\vec{u}_p$ — вектор мгновенной скорости движения частиц, м/с;

$\vec{F}_D$ — совокупность удельных сил сопротивления частиц потоку несущей среды, Н;

$\vec{F}_P$ — совокупность сил градиентов давления, Н;

$\vec{F}_{VM}$ — совокупность инерционных сил, Н;

$\vec{F}_G$ — совокупность выталкивающих сил несущей среды, Н.

Следует отметить, что для рабочих параметров газа, наблюдаемых в газопромысловом оборудовании, значительное влияние на характер движения частиц песка оказывают только силы сопротивления. Остальными силами в этом случае можно пренебречь, что позволяет ускорить процесс моделирования.

Расчёт скорости эрозии производится по формуле (1).

Моделирование и результаты

Численное моделирование выполнено в программном комплексе ANSYS Fluent с использованием пользовательских функций для интеграции решателя с альтернативной моделью эрозии.

В качестве объектов для моделирования выступают элементы трубопроводной системы и устьевой арматуры: отводы, тройник, переход и крестовина.

Построение сеточных моделей элементов с характерным размером ячеек, равным 2 мм, выполнено в модуле ANSYS ICEM-CFD. Для качественного решения пристеночной области сетка разбита на пакет слоёв (рисунок 1). С целью экономии времени расчета конечно-элементная сетка на тех участках оборудования, которые не оказывают существенного влияния на процесс эрозии, была сделана крупнее, чем в основной зоне.

По результатам моделирования выполнялась качественная оценка параметров эрозионного процесса; в частности, оценивались особенности расположения эрозионных пятен на стенках элементов с целью идентификации наиболее опасных зон. Результаты моделирования элементов газопромыслового оборудования представлены на рисунке 2. Градиентные поля характеризуют степень утонения стенки элемента вследствие эрозионного поражения, где красный цвет соответствует максимальному значению скорости эрозии.

С уменьшением угла поворота отвода не происходит качественных изменений в зоне наиболее интенсивного износа, при этом скорость эрозии имеет тенденцию к уменьшению. Это объясняется тем, что углы удара частиц о поверхность приближаются к минимальным возможным значениям, а количество самих контактов частиц с поверхностью также падает за счет более пологих траекторий частиц в пристеночной области. Для всех остальных исследуемых элементов был выполнен аналогичный анализ и определены наиболее опасные зоны оборудования, которые подвержены наиболее интенсивному износу.

Для наиболее наглядного отображения количественных характеристик процесса эрозии были сформированы номограммы, которые показывают зависимость скорости эрозии от давления и дебита. Также на этих номограммах нанесены линии постоянной скорости и зоны безопасной, кратковременной и недопустимой эксплуатации. Анализ результатов показал, что наиболее опасным элементом является «отвод 90°». Наибольшее влияние на скорость эрозии в этом случае оказывает «концентрация» ударов частиц о поверхность. Очевидно, что для «отвода 90°» большинство ударов частиц будет приходиться в некую небольшую площадь в области поворота (рисунок 3). Аналогично «отводу 90°» разработаны номограммы для других элементов.

Рисунок 1. Сеточные модели элементов трубопроводной системы и устьевой арматуры

Figure 1. Mesh models of pipeline system elements and wellhead equipment

Рисунок 2. Эрозионные поля элементов трубопроводной системы и устьевой аппаратуры

Figure 2. Erosion fields of pipeline system elements and wellhead equipment

Номограммы выступают в качестве наглядных графических материалов, предназначенных для прогнозирования скорости эрозии для различных технологических режимов работы скважины без необходимости громоздких вычислений по определению параметров

износа. Зная скорость эрозии для того или иного элемента трубопроводной обвязки или устьевой аппаратуры, можно рассчитать остаточный ресурс эксплуатируемого оборудования, тем самым обеспечивая его безопасную эксплуатацию.

Рисунок 3. Номограмма определения скорости эрозии для «отвода 90°»

Figure 3. Nomogram for determining the erosion rate for «90° elbow»

Выводы

Разработана альтернативная модель эрозии, позволяющая выполнять оценку скорости эрозии для ряда элементов газосборных систем и устьевой аппаратуры в широком диапазоне рабочих параметров.

Разработаны численные модели газоабразивного износа элементов газопромыслового

оборудования на базе модернизированной модели эрозии.

По результатам моделирования предложен способ визуализации результатов моделирования — номограммы для определения скорости эрозии для различных элементов газопромыслового оборудования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. API Recommended Practice for Design and Installation of Offshore Production Platform Piping Systems / 14 Edition. Washington D.C.: American Petroleum Institute, 1991. 62 p.
2. DVNGL-RP-O501-2015. Managing Sand Production and Erosion. Det Norske Veritas — Germanischer Lloyd, 2015. 80 p.
3. Finnie I. Erosion of Surfaces by Solid Particles // *Wear*. 1960. Vol. 3. Issue 2. P. 87-103. DOI: 10.1016/0043-1648(60)90055-7.
4. Bitter J.G.A. A Study of Erosion Phenomena: Part I // *Wear*. 1963. Vol. 6. Issue 1. P. 5-21. DOI: 10.1016/0043-1648(63)90003-6.
5. Bitter J.G.A. A Study of Erosion Phenomena: Part II // *Wear*. 1963. Vol. 6. Issue 3. P. 169-190. DOI: 10.1016/0043-1648(63)90073-5.
6. Goodwin J.E., Sage W., Tilly G.P. Study of Erosion by Solid Particles // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*. 1969. Vol. 184. P. 279-292.
7. Tabor D. *The Hardness of Metals*. Oxford: Clarendon Press, 1951. 175 p. DOI: 10.1299/jsmemag.56.414_592_5.
8. Oka Y.I., Okamura K., Yoshida T. Practical Estimation of Erosion Damage Caused by Solid Particle Impact Part 1: Effects of Impact Parameters on a Predictive Equation // *Wear*. 2005. Vol. 259. Issue 1-6. P. 95-101. DOI: 10.1016/j.wear.2005.01.039.
9. Oka Y.I., Yoshida T. Practical Estimation of Erosion Damage Caused by Solid Particle Impact Part 2: Mechanical Properties of Materials Directly Associated with Erosion Damage // *Wear*. 2005. Vol. 259. Issue 1-6. P. 102-109. DOI: 10.1016/j.wear.2005.01.040.
10. Grant G., Ball R., Tabakoff W. Report. Department of Aerospace Engineering, University of Cincinnati. 1973. P. 73-36.
11. Shirazi S.A., McLaury B.S., Arabnejad H. A Semi-Mechanistic Model for Predicting Sand Erosion Threshold Velocities in Gas and Multiphase Flow Production // *Materials of SPE Annular Technical Conference and Exhibition*. Dubai, UAE, 2016. SPE-181487-MS. DOI: 10.2118/181487-MS.
12. Ben-Ami Y., Uzi A., Levy A. Modelling the Particles Impingement Angle to Produce Maximum Erosion // *Powder Technology*. 2016. Vol. 301. P. 1032-1043. DOI: 10.1016/j.powtec.2016.07.041.
13. Абрашов В.Н., Жонин В.В., Имашев Р.Н., Литвиненко К.В., Михайлов А.Г., Насырова М.И., Скоробогач М.А., Фаритов А.Т. Методика проведения испытаний материалов промышленного оборудования на газоабразивный износ // *Нефтяное хозяйство*. 2020. № 3. С. 78-82. DOI: 10.24887/0028-2448-2020-3-78-82.
14. Menter F.R. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications // *AIAA Journal*. 1994. Vol. 32. No. 8. P. 1598-1605. DOI: 10.2514/3.12149.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Марина Ильшатовна Насырова, ведущий специалист отдела оптимизации технологий мехдобычи, ООО «РН-БашНИПИнефть», Уфа, Россия

Marina I. Nasyrova, Leading Specialist, Artificial Lift Technologies Optimization Department, RN-BashNIPIneft LLC, Ufa, Russia

NasyrovaMI@bnpi.rosneft.ru

REFERENCES

1. *API Recommended Practice for Design and Installation of Offshore Production Platform Piping Systems*. 14 Edition. Washington D.C., American Petroleum Institute, 1991. 62 p.
2. *DVNGL-RP-O501-2015. Managing Sand Production and Erosion*. Det Norske Veritas — Germanischer Lloyd, 2015. 80 p.
3. Finnie I. Erosion of Surfaces by Solid Particles. *Wear*, 1960, Vol. 3, Issue 2, pp. 87-103. DOI: 10.1016/0043-1648(60)90055-7.
4. Bitter J.G.A. A Study of Erosion Phenomena: Part I. *Wear*, 1963, Vol. 6, Issue 1, pp. 5-21. DOI: 10.1016/0043-1648(63)90003-6.
5. Bitter J.G.A. A Study of Erosion Phenomena: Part II. *Wear*, 1963, Vol. 6, Issue 3, pp. 169-190. DOI: 10.1016/0043-1648(63)90073-5.
6. Goodwin J.E., Sage W., Tilly G.P. Study of Erosion by Solid Particles. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 1969, Vol. 184, pp. 279-292.
7. Tabor D. *The Hardness of Metals*. Oxford, Clarendon Press, 1951. 175 p. DOI: 10.1299/jsmemag.56.414_592_5.
8. Oka Y.I., Okamura K., Yoshida T. Practical Estimation of Erosion Damage Caused by Solid Particle Impact Part 1: Effects of Impact Parameters on a Predictive Equation. *Wear*, 2005, Vol. 259, Issue 1-6, pp. 95-101. DOI: 10.1016/j.wear.2005.01.039.
9. Oka Y.I., Yoshida T. Practical Estimation of Erosion Damage Caused by Solid Particle Impact Part 2: Mechanical Properties of Materials Directly Associated with Erosion Damage. *Wear*, 2005, Vol. 259, Issue 1-6, pp. 102-109. DOI: 10.1016/j.wear.2005.01.040.
10. Grant G., Ball R., Tabakoff W. Report. Department of Aerospace Engineering, University of Cincinnati. 1973. pp. 73-36.
11. Shirazi S.A., McLaury B.S., Arabnejad H. A Semi-Mechanistic Model for Predicting Sand Erosion Threshold Velocities in Gas and Multiphase Flow Production. *Materials of SPE Annular Technical Conference and Exhibition*. Dubai, UAE, 2016. SPE-181487-MS. DOI: 10.2118/181487-MS.
12. Ben-Ami Y., Uzi A., Levy A. Modelling the Particles Impingement Angle to Produce Maximum Erosion. *Powder Technology*, 2016, Vol. 301, pp. 1032-1043. DOI: 10.1016/j.powtec.2016.07.041.
13. Abrashov V.N., Zhonin V.V., Imashev R.N., Litvinenko K.V., Mikhailov A.G., Nasyrova M.I., Skorobogach M.A., Faritov A.T. Metodika provedeniya ispytaniy materialov promyslovogo oborudovaniya na gazoabrazivnyi iznos [Experimental Methodology for Determining Gas-Abrasive Wear of Field Equipment Elements]. *Neftyanoe khozyaistvo — Oil Industry*, 2020, No. 3, pp. 78-82. DOI: 10.24887/0028-2448-2020-3-78-82. [in Russian].
14. Menter F.R. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications. *AIAA Journal*, 1994, Vol. 32, No. 8, pp. 1598-1605. DOI: 10.2514/3.12149.

Вадим Дмитриевич Липатов, ведущий специалист отдела оптимизации технологий мехдобычи, ООО «РН-БашНИПИНефть», Уфа, Россия

Vadim D. Lipatov, Leading Specialist, Artificial Lift Technologies Optimization Department, RN-BashNIPIneft LLC, Ufa, Russia

LipatovVD@bnipi.rosneft.ru

Рамиль Наилевич Имашев, кандидат физико-математических наук, эксперт отдела оптимизации технологий мехдобычи, ООО «РН-БашНИПИНефть», Уфа, Россия

Ramil N. Imashev, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Expert of Artificial Lift Technologies Optimization Department, RN-BashNIPIneft LLC, Ufa, Russia

ImashevRN@bnipi.rosneft.ru

Владимир Иванович Савичев, кандидат физико-математических наук, эксперт отдела оптимизации технологий мехдобычи, ООО «РН-БашНИПИНефть», Уфа, Россия

Vladimir I. Savichev, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Expert of Artificial Lift Technologies Optimization Department, RN-BashNIPIneft LLC, Ufa, Russia

SavichevVI@bnipi.rosneft.ru

Владимир Владимирович Жонин, начальник отдела оптимизации технологий мехдобычи, ООО «РН-БашНИПИНефть», Уфа, Россия

Vladimir V. Zhonin, Head of Artificial Lift Technologies Optimization Department, RN-BashNIPIneft LLC, Ufa, Russia

ZhoninVV@bnipi.rosneft.ru

Константин Владимирович Литвиненко, кандидат технических наук, начальник управления скважинных технологий и работ, ООО «РН-БашНИПИНефть», Уфа, Россия

Konstantin V. Litvinenko, Candidate of Engineering Sciences, Head of Downhole Technologies and Operations Directorate, RN-BashNIPIneft LLC, Ufa, Russia

LitvinenkoKV@bnipi.rosneft.ru

Вадим Николаевич Абрашов, заместитель генерального директора — главный геолог, АО «Сибнефтегаз», Новый Уренгой, Россия

Vadim N. Abrashov, Deputy General Director – Chief Geologist, Sibneftegaz JSC, Novy Urengoy, Russia

vnabrashov@sibng.rosneft.ru

Михаил Александрович Скоробогач, кандидат технических наук, заместитель главного геолога — начальник отдела планирования уровней добычи, геолого-гидродинамического моделирования, АО «Сибнефтегаз», Новый Уренгой, Россия

Mikhail A. Skorobogach, Candidate of Engineering Sciences, Deputy Head of Chief Geologist — Head of Production Levels Planning, Geological and Hydrodynamic Modelling Department, Sibneftegaz JSC, Novy Urengoy, Russia

maskorobogach@sibng.rosneft.ru

Статья поступила в редакцию 27.08.2021; одобрена после рецензирования 01.09.2021; принята к публикации 03.09.2021.

The article was submitted 27.08.2021; approved after reviewing 01.09.2021; accepted for publication 03.09.2021.