

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ «УЭЦН-СТРУЙНЫЙ НАСОС»

*Макарова Т.Г.<sup>1</sup>, Уразаков К.Р.<sup>2</sup>, Шипилова О.А.<sup>1</sup>, Хасанишина Э.М.<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>*Альметьевский государственный нефтяной институт, Альметьевск;*

<sup>2</sup>*Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа;*

<sup>3</sup>*Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.Туполева, Альметьевск*

**Ключевые слова:** установка электроцентробежного насоса, струйный насос, насос-дозатор, динамический уровень, насосно-компрессорные трубы, асфальтосмолопарафиновые отложения.

**Аннотация.** Применение установок электроцентробежных насосов (УЭЦН) на обводненном или маловязком фонде средне- и высокодебитных скважин является достаточно эффективным способом. Однако, эффективность эксплуатации установок такого типа ограничена осложняющими факторами. В качестве одного из таких факторов выступает явление накопления асфальтосмолопарафиновых отложений (АСПО) в верхней части колонны насосно-компрессорных труб (НКТ). АСПО становится причиной возникновения дополнительных гидравлических сопротивлений в стволе скважины, вследствие чего снижается производительность насоса и суммарный дебит. Предотвращение асфальтосмолопарафиновых отложений при эксплуатации добывающих скважин является актуальной задачей. В статье предложен способ непрерывной подачи реагента в скважину с применением струйного насоса. Разработана методика расчета, позволяющая подобрать конструктивные параметры струйного аппарата, исходя из технологического режима УЭЦН и заданной дозы реагента, предотвращающего образование АСПО, основанная на математической модели системы «УЭЦН-струйный насос».

## PROCEDURE FOR DETERMINING SYSTEM PARAMETERS "UETSJ-PUMP"

*Makarova T.G.<sup>1</sup>, Urazakov K.R.<sup>2</sup>, Shipilova O.A.<sup>1</sup>, Khasanshina E.M.<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>*Almetyevsk state oil institute, Almetyevsk;*

<sup>2</sup>*Ufa state oil technical university, Ufa;*

<sup>3</sup>*Kazan National Research Technical University n.a. A.N. Tupolev, Almetyevsk*

**Keywords:** electric centrifugal pump installation, jet pump, dosing pump, dynamic level, tubing, asphalt-resin-paraffin deposits.

**Abstract.** The use of electric centrifugal pumps (ESP) on watered or low-viscosity well stock of medium and high-yield wells is quite effective. However, the efficiency of this type of plant is limited by complicating factors. One of these factors is the phenomenon of accumulation of asphalt-resin-paraffin deposits (ASF) in the upper part of the tubing string. ASF causes additional hydraulic resistances in the wellbore, as a result of which the pump capacity and total production rate are reduced. Prevention of asphalt-resin-paraffin deposits during operation of production wells is an urgent task. The article proposes a method for continuous feed of reagent into a well using a jet pump. A calculation method was developed that allows to select the design parameters of the jet apparatus based on the process mode of the ESP and the specified dose of the reagent that prevents the formation of AFAS, based on the mathematical model of the ESP-jet pump system.

### Введение

Явление образования асфальтосмолопарафиновых отложений в верхней части насосно-компрессорных труб является достаточно распространенным типом осложнений при эксплуатации механизированного фонда, в частности при эксплуатации скважин, оборудованных УЭЦН. Это приводит к снижению дебита при эксплуатации вследствие уменьшения проходного сечения насосных труб и повышению гидравлических потерь [1].

Наиболее эффективным способом борьбы с АСПО являются методы, предупреждающие их отложение. К таким методам следует отнести ингибирование – закачку специальных химических реагентов в скважину, предупреждающих образования АСПО [2, 3].

Известные методы подачи ингибиторов предполагают использование специальных дозирующих насосов, которые позволяют обеспечить требуемый расход реагента. Однако, в виду их конструкции и принципа действия таких насосов, фактическая подача не является непрерывной. Также существующие методы требуют установки дополнительного оборудования – различных агрегатов для закачки или подвода электроэнергии, что требует дополнительных экономических затрат в процессе эксплуатации скважины с УЭЦН. Недостатки известных методов по предотвращению и устранению АСПО привело к разработке более эффективного метода [4-7].

### Метод предотвращения АСПО

В качестве такого метода для предотвращения АСПО и повышения эффективности доставки реагента разработано новое техническое решение, которое представляет собой комбинацию из двух технических устройств – емкостью с реагентом, оборудованную патрубком для его подачи и струйный насос (рис. 1) [8]. Далее при рассмотрении всей установки в целом, часть конструкции, в которую включена устьевая емкость, а также вертикальный и горизонтальный участок трубопровода для транспорта реагента в камеру смешения струйного насоса условно принимается «насосом-дозатором».

Отличительная особенность разработанной конструкции и технологии заключается в том, что дозировка реагента непрерывна за счет принципа действия струйного насоса и насоса-дозатора в комбинации с УЭЦН, что позволяет обеспечить необходимый перепад давления для обеспечения расхода реагента, а также не требуется дополнительных экономических затрат.

Представленное техническое решение на рисунке 1, подразумевает высокую эффективность работы при условии корректного подбора конструктивных параметров всей установки. На текущий момент отсутствует адекватная методика расчета, позволяющая связать работу УЭЦН – подачу, давление на выходе и другие параметры электроцентробежного насоса, а также конструктивные параметры струйного насоса и насоса-дозатора. Методика должна учитывать характеристики устройства, функциональные особенности – работу струйного насоса и насоса-дозатора, насоса УЭЦН, что позволит обеспечить требуемый непрерывный расход реагента и повысить эффективность разработанной технологии.

### Методика расчета работы УЭЦН и струйного насоса

Известно множество методик расчета УЭЦН, связывающие развиваемый насосом напор и подачу жидкости [9, 10], однако, как отмечалось ранее, методика, позволяющая связать параметры УЭЦН и конструктивные параметры струйного насоса отсутствует, в связи с чем требуются дальнейшие исследования. Для реализации поставленной задачи необходима разработка расчетного алгоритма.

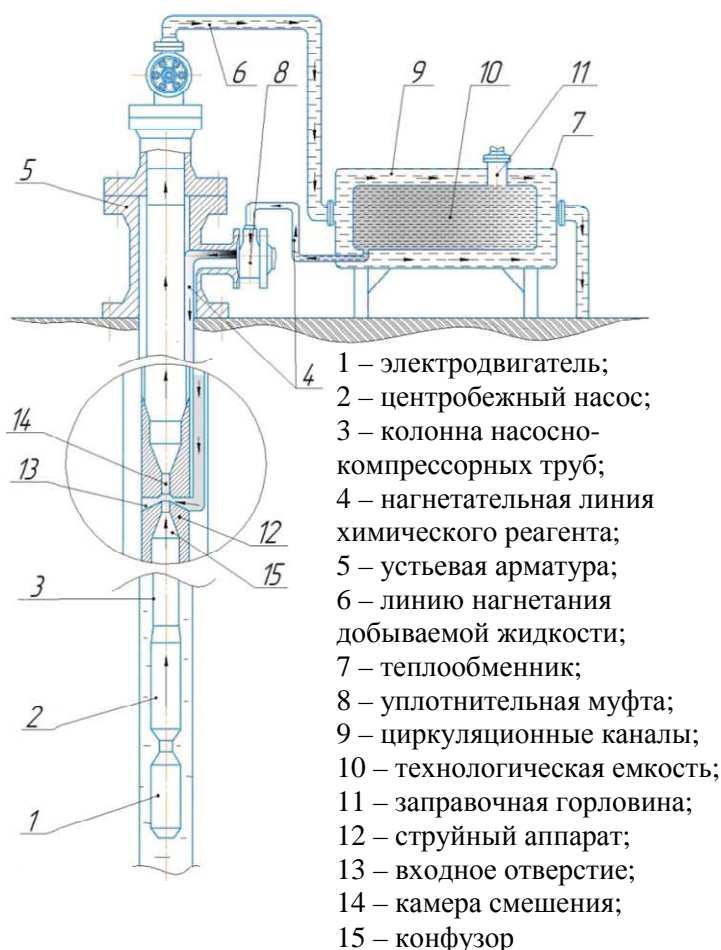


Рис. 1. Скважинная дозирующая насосная установка для предотвращения отложений

Для обеспечения эффективного функционирования струйного насоса и насоса-дозатора необходимо связать входные данные ЭЦН и параметры струйного насоса: давление на выходе, подачу УЭЦН, расстояние между УЭЦН и струйным насосом, а также расход реагента и диаметры на входе и выходе конфузора, камеры смешения и диаметр отверстия насоса-дозатора. При этом разработанная методика сводится к принятию некоторых произвольных параметров струйного насоса или насоса-дозатора (диаметр камеры смешения, диаметр насоса-дозатора, длина конфузора, длина камеры смешения). Такой подход позволит повысить экономическую эффективность при массовом внедрении разработанной установки (например, возможно снизить длину струйного насоса, при этом обеспечивая требуемый расход реагента, путем варьирования остальных параметров – диаметра камеры смешения, диаметра отверстия насоса-дозатора и т.д.).

Цель расчета – определение геометрических параметров струйного насоса, включая глубину установки, исходя из заданного объема требуемого расхода реагента для предотвращения АСПО.

Общий алгоритм разработанной методики представлен в виде блок-схемы на рисунке 2.

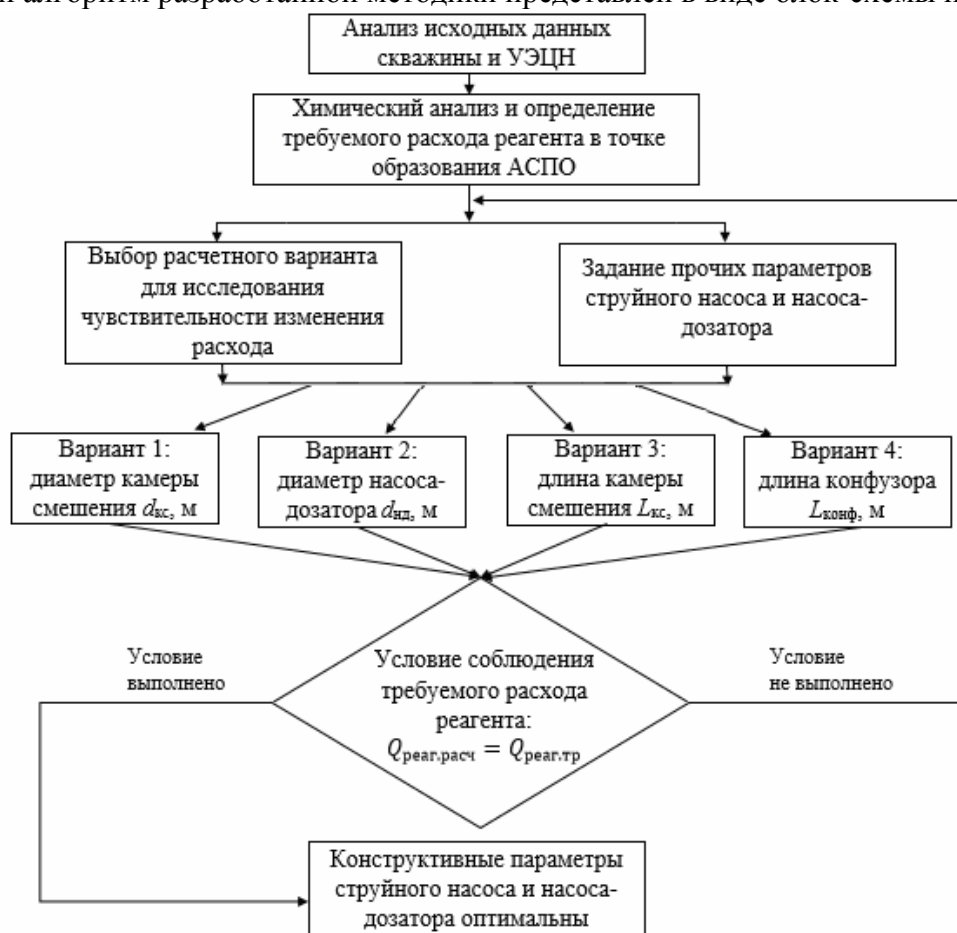


Рис. 2. Блок-схема методики расчета параметров струйного насоса

При моделировании работы УЭЦН и струйного насоса задаются параметры насосов и скважины. Расчет ведется в точке выхода камеры смешения (на рисунке 3 условно показана выноска в суженной части струйного насоса, с заданным расходом реагента и расходом, давлением на выходе камеры смешения), так как при этом аналитически заданы все геометрические параметры струйного насоса. В разработанной методике предложены 4 варианта обеспечения требуемого расхода реагента путем варьирования следующих параметров струйного насоса и насоса-дозатора: диаметра камеры смешения:  $d_{см}$ , м; диаметра отверстия насоса-дозатора:  $d_{нд}$ , м; длины камеры смешения:  $L_{кс}$ , м; длины конфузора:  $L_{конф}$ , м.

Алгоритм расчета следующий:

- 1) задаются параметры насоса (давление на выходе, подача, глубина установки);

2) задается требуемый расход реагента для предотвращения АСПО;

3) строятся расчетные зависимости расхода реагента от значения параметров струйного насоса и насоса-дозатора (при этом производится исследование влияния каждого отдельного параметра (изложенных в 4 вариантах) на подачу реагента, при постоянном значении других параметров струйного насоса или насоса-дозатора);

4) определяется точка пересечения графика расчетной зависимости  $Q_{реаг.расч}$  и требуемого значения расхода реагента  $Q_{реаг.тp}$  (рис. 2).

### Математическая модель системы «УЭЦН-струйный насос»

Для определения параметров струйного насоса и насоса-дозатора необходимо поэтапно описать движение жидкости по телу НКТ и струйного насоса. Подача на входе и выходе конфузора с учетом параметров УЭЦН может быть выражена на основе уравнений Бернулли:

$$P_{вых.эцн} - P_{вх.конф} = \frac{v_{вх.конф}^2 \rho_{ж}}{2} (1 + K_{нкт}) - \frac{v_{вых.эцн}^2 \rho_{ж}}{2}, \quad (1)$$

$$P_{вх.конф} - P_{вых.конф} = \frac{v_{вых.конф}^2 \rho_{ж}}{2} (1 + K_{конф}) - \frac{v_{вх.конф}^2 \rho_{ж}}{2}, \quad (2)$$

где  $P_{вых.эцн}$ ,  $P_{вх.конф}$ ,  $P_{вых.конф}$  – давление на выходе ЭЦН, давление на входе в конфузор, давление на выходе из конфузора, Па;  $v_{вх.конф}$ ,  $v_{вых.конф}$ ,  $v_{вых.эцн}$  – скорость на входе в конфузор, скорость на выходе из конфузора, скорость на выходе ЭЦН, м/с;  $K_{нкт} \frac{L_{нкт}}{D_{нкт}} \frac{64}{Re}$  – коэффициент

сопротивления при движении потока от УЭЦН к струйному насосу;  $K_{конф}$  – коэффициент сопротивления конфузора, определяемый по методике в работе [11];  $L_{нкт}$  – длина участка НКТ между струйным насосом и ЭЦН, м;  $D_{нкт}$  – диаметр НКТ, м.

Затем необходимо определить давление и подачу ЭЦН – рабочей жидкости в камере смешения. При движении жидкости в камере смешения струйного насоса будет происходить турбулизация потока, что требует учета сил трения жидкости о стенки, запишем уравнение движения жидкости без учета сил тяжести, а также, пренебрегая силами нормальной реакции участка насоса, по которому движется жидкость:

$$(P_{вх.кс} - P_{вых.кс}) f_{кс} + \rho_{реаг} u_{реаг} Q_{реаг} + \rho_{ж} u_{ж} Q_{ж} = \rho_{см} u_{см} Q_{см} + F_{тр}, \quad (3)$$

где  $F_{тр} = \Sigma \cdot f \frac{\rho_{см} u_{см}^2}{2}$  – сила трения жидкости, Н;  $\Sigma$  – периметр камеры смешивания, м<sup>2</sup>;

$f = \frac{0,316}{\sqrt[4]{Re}}$  – коэффициент сопротивления;  $f_{кс}$  – площадь поперечного сечения камеры

смешения, м<sup>2</sup>;  $Re = \frac{\rho_{см} u_{см} d_{см}}{\mu_{см}}$  – число Рейнольдса;  $\rho_{см} = w \rho_{ж} + (1 - w) \rho_{реаг}$  – плотность смеси,

кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{реаг}$  – плотность реагента, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{ж}$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $u_{реаг}$  – скорость реагента, м/с;  $u_{см}$  – скорость смеси, м/с;  $u_{ж}$  – скорость жидкости, м/с;  $Q_{ж}$  – расход жидкости, м<sup>3</sup>/с;  $Q_{реаг}$  – расход реагента, м<sup>3</sup>/с;  $Q_{см} = Q_{ж} + Q_{реаг}$  – расход смеси, м<sup>3</sup>/с;  $d_{см}$  – диаметр камеры смешивания, м;  $\mu_{см} = w \mu_{ж} + (1 - w) \mu_{реаг}$  – вязкость смеси, мПа·с;  $\mu_{ж}$  – вязкость жидкости,

мПа·с;  $\mu_{реаг}$  – вязкость реагента, мПа·с;  $w = \frac{Q_{ж}}{Q_{ж} + Q_{реаг}}$  – объемная доля реагента в жидкости.

На рисунке 3 схематично представлена общая гидравлическая схема системы «ЭЦН-струйный насос».

### Результаты

Разработанная математическая модель основана на законе сохранения масс и энергии, а также уравнении Бернулли, показывает протекание гидродинамических процессов с учетом сопротивлений в сужающихся (конфузор) частях струйного насоса, сопротивлений в камере смешения потока.

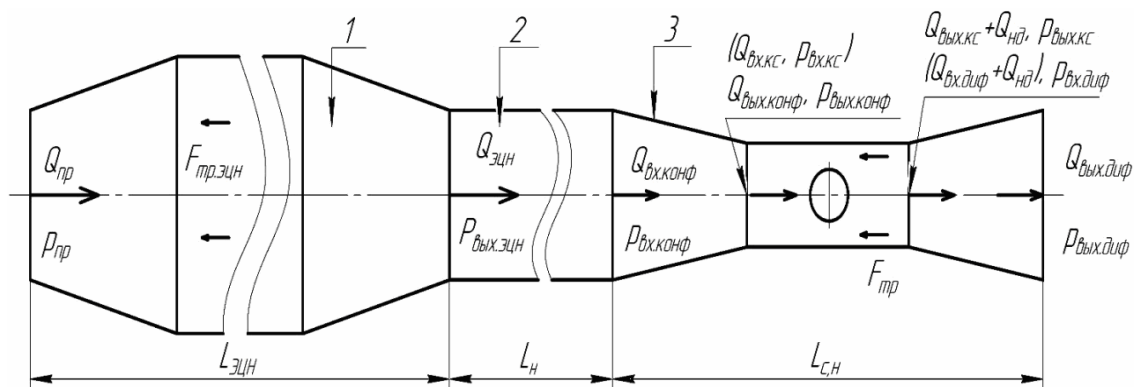


Рис. 3. Гидравлическая схема системы «УЭЦН-струйный насос»: 1 – УЭЦН; 2 – участок НКТ между УЭЦН и струйным насосом; 3 – струйный насос

Процесс расчета согласно представленной математической модели следующий. На основе уравнения (1) рассчитывается давление на входе в конфузор (уравнение Бернулли) с учетом сопротивлений, вызванных трением жидкости о стенки НКТ. Далее, согласно уравнению (2) рассчитывается давление на выходе из конфузора при сужении потока, что учитывается коэффициентом сопротивления конфузора. Следующее уравнение (3) системы является ключевым, так как аналитически связывает все конструктивные параметры струйного насоса и насоса-дозатора (диаметр камеры смешения, диаметр отверстия насоса-дозатора, длина камеры смешения, длина конфузора), а также расход реагента с учетом работы УЭЦН, что позволяет определить требуемые конструктивные параметры. Для этого вычисленные значения на основе уравнений (1), (2) и прочие параметры подставляются в уравнение (3). Прочие уравнения, включенные в формулы (1)-(3), определяют доли содержания реагента в поступившей в струйный насос жидкости, а также геометрические зависимости.

При этом коэффициенты сопротивления в конфузоре и камере смешения могут быть определены в зависимости от угла наклона согласно методике, представленной в работе [11].

### Вывод

Разработана методика расчета геометрических параметров струйного насоса и насоса, дозирующего реагент, позволяющая проектировать систему «УЭЦН-струйный насос» с учетом характера движения потока, гидравлических потерь по длине НКТ, исходя из заданной дозы реагента, отличающаяся от известных тем, что учитывает работу насоса, дозирующего реагент, позволяет определить местоположение струйного насоса относительно УЭЦН для обеспечения требуемого расхода реагента, а также непосредственно установить зависимость между подачей УЭЦН и расходом реагента. Разработанная методика предлагается к использованию при проектировании систем «УЭЦН-струйный насос», в осложненных условиях, вызванных асфальтосмолопарафиновыми отложениями в насосных трубах. Корректное и точное определение конструктивных параметров системы «УЭЦН-струйный насос» является основополагающим при проектировании системы.

### Список литературы

1. Шигабиев Д.Г., Думлер Е.Б., Вахитова Р.И. Причины снижения работоспособности центробежных насосных установок на нефтяных промыслах // Роль математики в становлении специалиста. Материалы Международной научно-практической конференции. – Уфа: Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2021. – С. 193-198.
2. Галикеев Р.М., Леонтьев С.А., Мисник В.В. Методика исследования химических реагентов для предупреждения и растворения парафиновых отложений нефтей ОАО "ГАЗПРОМНЕФТЬ-НОЯБРЬСКНЕФТЕГАЗ" // Нефтепромысловое дело. – 2010. – № 9. – С. 36-39.
3. Бакраев М.М., Булюкова Ф.З., Думлер Е.Б. Способы борьбы с АСПО при эксплуатации скважин ЭЦН в условиях гойт-кортовского месторождения // Современные проблемы нефтегазового оборудования-2021. Материалы Международной научно-технической конференции. – Уфа: Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2021. – С. 113-118.
4. Патент № 2517287 РФ. Струйный аппарат для перепуска затрубного газа / Уразаков К.Р., Вахитова Р.И., Сарачева Д.А., Абрамова Э.В. – №2012149306/03, заявл. 19.11.2012; опубл. 27.05.2014, Бюл. №15.

5. Дроздов А.Н. Опыт применения и перспективы развития погружных насосно-эжекторных систем // Территория Нефтегаз. – 2012. – № 2. – С. 86-89.
6. Дроздов А.Н., Вербицкий В.С., Деньгаев А.В., Ламбин Д.Н., Кочергин А.М., Курятников В.В. Применение насосно-эжекторных систем «Тандем» на нефтяных месторождениях Российской Федерации // Нефтепромысловое дело. – 2004. – № 3. – С. 31-46.
7. Патент № 2738147 РФ. Способ ингибирования скважины от асфальтосмолопарафиновых отложений / Денисламов И.З., Лысенков А.В., Никулин В.Ю., Лавренова А.С., Гильманова А.Р. – №2020114823, заявл. 14.04.2020; опубл. 08.12.2020, Бюл. №34.
8. Патент № 2752569 РФ. Скважинная дозирующая насосная установка для предотвращения отложений / Уразаков К.Р., Макарова Т.Г., Думлер Е.Б., Вахитова Р.И., Борисов А.О. – №2021104654, заявл. 25.02.2021; опубл. 29.07.2021; Бюл. №22.
9. Уразаков К. Р., Мухин И.А., Вахитова Р.И., Сарычева Д.А., Волков И.В. Исследование характеристик струйного насоса численным моделированием // Нефтегазовое дело. – 2015. – Т. 13, № 14. – С. 149-154.
10. Уразаков К.Р., Вахитова Р.И., Сарачева Д.А. Методика расчета параметров струйного насоса при совместной эксплуатации с ЭЦН // Нефтегазовое дело. – 2011. – № 3. – С. 134-146.
11. Макарова Т.Г., Уразаков К.Р., Думлер Е.Б. Методика расчета параметров скважинной насосной установки для предотвращения отложений // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – № 3. – С. 64-71.

### References

1. Shigabiev D.G., Dumler E.B., Vakhitova R.I. Reasons for the decrease in the efficiency of centrifugal pumping units in oil fields // The role of mathematics in the formation of a specialist. Materials of the International Scientific and Practical Conference. – Ufa: Ufa State Petroleum Technical University, 2021. – P. 193-198.
2. Galikeev R.M., Leontiev S.A., Misnik V.V. Procedure for Studying Chemicals for Prevention and Dissolution of Paraffin Oil Deposits of OAO Gazpromneft-Noyabrskneftegaz // Oil Field. 2010, no. 9, pp. 36-39.
3. Bakraev M.M., Bulyukova F.Z., Dumler E.B. Methods of ABAP control during operation of ESP wells in the conditions of the Goit-Kortov field // Modern problems of oil and gas equipment-2021. Materials of the International Scientific and Technical Conference. – Ufa: Ufa State Petroleum Technical University, 2021. – P. 113-118.
4. Patent No. 2517287 RU. Jet apparatus for bypass of annular gas / Urazakov K.R., Vakhitova R.I., Saracheva D.A., Abramova E.V. – No. 2012149306/03, application 19.11.2012; publ. 27.05.2014, Bul. No. 15.
5. Drozdov A.N. Experience in application and prospects of development of submersible pumping and ejector systems // Neftegaz Territory. 2012, no. 2, pp. 86-89.
6. Drozdov A.N., Verbitsky V.S., Dengaev A.V., Lambin D.N., Kochergin A.M., Kuryatnikov V.V. Application of Tandem pumping and ejector systems at oil fields of the Russian Federation // Oil Field. 2004, no. 3, pp. 31-46.
7. Patent No. 2738147 RU. Method of well inhibition from asphalt-resin-paraffin deposits / Denislamov I.Z., Lysenkov A.V., Nikulin V.Yu., Lavrenova A.S., Gilmanova A.R. – No. 2020114823, application 14.04.2020; publ. 08.12.2020, Bul. No. 34.
8. Patent No. 2752569 RU. Borehole metering pumping unit for the prevention of deposits / Urazakov K.R., Makarova T.G., Dumler E.B., Vakhitova R.I., Borisov A.O. – No. 2021104654, application 25.02.2021; publ. 29.07.2021; Bul. No. 22.
9. Urazakov K.R., Mukhin I.A., Vakhitova R.I., Sarycheva D.A., Volkov I.V. Study of jet pump characteristics by numerical modeling // Oil and gas business. 2015, vol. 13, no. 14, pp. 149-154.
10. Urazakov K.R., Vakhitova R.I., Saracheva D.A. Procedure for Calculating the Parameters of a Jet Pump during Joint Operation with ESP // Oil and Gas Business: Electron. scientific. journal. 2011, no. 3, pp. 134-146.
11. Makarova T.G., Urazakov K.R., Dumler E.B. Procedure for Calculating Parameters of a Well Pump Unit for Preventing Deposits // News of Tula State University. Technical sciences. 2022, no. 3, pp. 64-71.

### Сведения об авторах:

### Information about authors:

<b>Макарова Татьяна Георгиевна</b> – старший преподаватель кафедры «Нефтегазовое оборудование и технология машиностроения»	<b>Makarova Tatyana Georgiyevna</b> – senior teacher of "Oil and Gas Equipment and Technology of Mechanical Engineering" department
<b>Уразаков Камил Рахматулович</b> – доктор технических наук, профессор кафедры «Машины и оборудование нефтегазовых промыслов»	<b>Urazakov Kamil Rakhmatullovich</b> – doctor of technical sciences, professor of "Machines and Equipment of Oil and Gas Crafts" department
<b>Шипилова Ольга Александровна</b> – кандидат технических наук, доцент кафедры «Нефтегазовое оборудование и технология машиностроения»	<b>Shipilova Olga Aleksandrovna</b> – candidate of technical sciences associate professor of "Oil and Gas Equipment and Technology of Mechanical Engineering" department
<b>Хасаншина Эльвира Маратовна</b> – кандидат технических наук, доцент кафедры «Конструирование и машиностроительные технологии»	<b>Makarova Tatyana Georgiyevna</b> – senior teacher of "Oil and Gas Equipment and Technology of Mechanical Engineering" department
dtana@bk.ru	

Получена 06.06.2022