

© А. В. КУСТЫШЕВ,¹ А. Н. КОРОТЧЕНКО,²
Э. Э. КОЛМАКОВ,³ Н. И. РАСАМАГИН,⁴
П. И. КРЮКОВ⁴

¹Тюменский государственный нефтегазовый университет

²ООО «ИнТех»

³Тюменский государственный университет

⁴ОАО «Газпромнефть-Ноябрьскнефтегаз»

in_tech@bk.ru, NNG@yamal.gazprom-neft.ru

УДК 622.279.7

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ЗАКАЧИВАНИЯ
РАСТВОРА В СКВАЖИНУ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ
ГЕОЛОГО-ТЕХНИЧЕСКИХ МЕРОПРИЯТИЙ**

**MATHEMATICAL SIMULATION
FOR TECHNOLOGICAL PROCESSES
OF FLUID INJECTION DURING GEOLOGICAL
AND ENGINEERING OPERATIONS**

Авторами статьи разработана компьютерная программа для вычисления избыточного давления на забое скважины и для оценки количества технологического раствора, закачанного в пласт в процессе глушения скважины. Приведено описание специального оборудования, позволяющего регистрировать основные параметры и осуществлять в реальном времени контроль за процессом закачивания раствора. Тестовые расчеты объемов раствора, поглощенного призабойной зоной пласта, согласуются с натурными измерениями. Разработанная методика пригодна для определения оптимальных параметров процесса глушения скважин как при прямом, так и при обратном способе закачки жидкости глушения в скважину.

The computer program for calculating excess bottom hole pressure, as well as for estimating the amount of the injected technological fluid during well-killing operation has been developed. The special equipment allowing basic parameters to be recorded and the process of fluid injection to be monitored in real time is described. The test calculations for the volumes of the absorbed fluid at the bottom hole formation zone are in good agreement with in situ measurements. The suggested method is suitable for determining the optimal parameters of well-killing operation both in direct and reverse well-killing fluid injections.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА. Глушение скважин, избыточное давление на забое, математическое моделирование.

KEY WORDS. Well-killing operation, excessive bottom hole pressure, mathematical simulation.

Введение

Сохранение фильтрационно-емкостных свойств призабойной зоны пласта при проведении геолого-технических мероприятий (ГТМ) внутри скважины (в частности, при ее глушении) является важным условием, определяющим качество выполненных работ. Порядок проведения ГТМ в скважинах и связанные с этим проблемы описаны в [6, 7, 8]. Глушение производится с помощью закачки в скважину жидкости глушения (ЖГ), основное назначение которой заключается в обеспечении необходимой репрессии на пласт, исключающей ее самопроизвольный выброс. В качестве ЖГ обычно используется раствор хлористого кальция, концентрация которого определяется необходимой плотностью. Применяется два способа закачки ЖГ: прямой и обратный. При прямом ЖГ закачивается в насосно-компрессорную трубу (НКТ), вытесняя нефть через затрубное пространство; при обратном ЖГ закачивается в затрубное пространство, а нефть вытесняется через НКТ. В обоих случаях создается превышение давления ЖГ на забое над внутрипластовым давлением, из-за чего часть ЖГ посредством фильтрации закачивается в пласт. Это приводит к ухудшению коллекторских свойств призабойной зоны скважины, снижению добычи до 15% и увеличению сроков вывода скважин на стабильный режим, а работы по восстановлению ее работоспособности ведут к увеличению эксплуатационных затрат и себестоимости продукции. Поэтому давление нагнетания не должно быть слишком большим, чтобы не закачать в пласт слишком большое количество ЖГ. На сегодняшний день данная проблема изучена недостаточно, и четких критериев по параметрам прямой и обратной закачки ЖГ в скважину не существует. Целью данной работы является создание алгоритма и компьютерной программы, с помощью которой можно определить оптимальные параметры как прямого, так и обратного способов закачки.

Физико-техническая постановка задачи

Схема прямого и обратного способа закачки приведена на рис. 1. Считается, что в начальный момент времени вся скважина (и НКТ, и затрубное пространство) полностью заполнены пластовой жидкостью (нефтью). При прямом способе, как сказано выше, ЖГ закачивается в НКТ, вытесняя нефть через затрубное пространство, при обратном она закачивается в затрубное пространство, а нефть вытесняется через НКТ. Для обоих способов требуется определить рабочее давление насоса, которое необходимо, чтобы обеспечить заданную скорость закачки (расход ЖГ), динамику избыточного давления на забое, а также количество ЖГ, поглощенной пластом в процессе закачки.

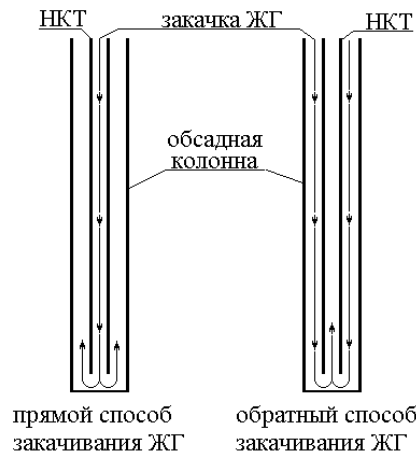


Рис. 1. Способы закачивания ЖГ

Алгоритм расчетов

Необходимая плотность ЖГ (кг/м³) рассчитывается по формуле:

$$\rho = \frac{P_{пл} (1 + \Pi)}{h \cdot g}, \tag{1}$$

где $P_{пл}$ — пластовое давление, Па; Π — коэффициент безопасности работ, учитывающий возможность повышения пластового давления в призабойной зоне скважины в период ремонта; h — глубина, на которой находится забой скважины, м, $g = 9.81 \text{ м/с}^2$ — ускорение свободного падения. Согласно регламенту [9], коэффициент безопасности Π полагается равным 0.05 (5%). Признаком окончания закачки является равенство плотности жидкости, выходящей из скважины, плотности ЖГ, при этом объем закачанной ЖГ должен быть не менее расчетной величины.

В качестве основной формулы, связывающей потери давления P (Па) с осредненной по сечению трубы скоростью v (м/с) потока жидкости, принимаем формулу Дарси-Вейсбаха [10]:

$$P = \lambda \frac{v^2 l \rho}{2d}, \tag{2}$$

где l — длина трубы; ρ — плотность жидкости; d — внутренний диаметр трубы для НКТ, или диаметральный зазор для кольцевого пространства между НКТ и обсадной колонной; λ — коэффициент гидравлического сопротивления, для определения которого принимаем формулу Альтшуля [10]:

$$\lambda = 0.11 \left(\frac{K}{d} + \frac{68.5}{\text{Re}} \right)^{1/4}, \tag{3}$$

где K — коэффициент эквивалентной шероховатости, Re — число Рейнольдса. Коэффициент потерь на трение при турбулентном потоке по трубе круглого сечения (в НКТ) рассчитывается по формуле:

$$\lambda = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{Re}}, \tag{4}$$

а по кольцевому пространству (в обсадной колонне) — по формуле:

$$\lambda = \frac{0,339}{\sqrt[4]{Re}}. \tag{5}$$

Обоснование выбора формулы Альтшуля из большого количества предлагаемых в литературе формул для определения гидравлического сопротивления приведено в статьях [1, 2].

Скорость фильтрации v_ϕ ЖГ в пласт в процессе глушения скважины можно оценить по формуле Дарси [3]:

$$v_\phi = - \frac{k}{\mu} gradP, \tag{6}$$

где P — избыточное давление на забое (Па), k — коэффициент проницаемости породы пласта, μ — динамическая вязкость ЖГ.

Таким образом можно проследить за динамикой избыточного давления на забое скважины и, меняя скорость закачки, регулировать его для того, чтобы не допустить слишком глубокой фильтрации ЖГ в пласт. Изложенный алгоритм реализован в виде компьютерной программы, позволяющей выполнять расчеты процессов закачивания ЖГ в скважину как при прямом способе, так и при обратном. Результатом расчетов по предлагаемой методике является определение избыточного давления на забое скважины, а также количества закачанной в пласт ЖГ в зависимости от расхода, создаваемого насосным агрегатом (рис. 2).

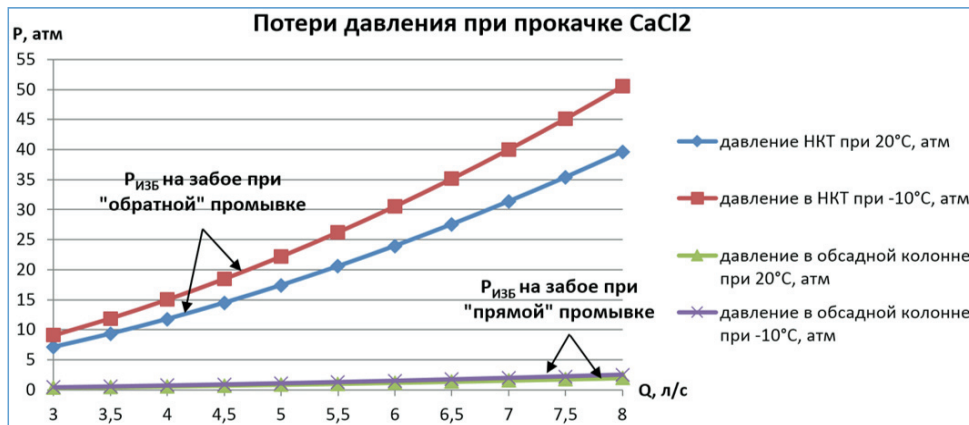


Рис. 2. Зависимость потерь давления от расхода ЖГ

Как видно из рис. 2, для минимизации эквивалентных давлений на забое по возможности следует применять прямой способ закачки. В тех случаях, когда по каким-то причинам приходится применять обратный способ, необходимо ограничить расход.

Натурные испытания

Наличие специального оборудования позволяет произвести более точные измерения и выполнить дальнейший анализ полученных результатов. Для проведения этих исследований применена система датчиков, позволяющая регистрировать основные параметры. Главными элементами системы регистрации параметров жидкостей АМК (аппаратно-методический комплекс), закачиваемых в скважину, являются плотномер вибрационный (ПВ) и расходомер электромагнитный (РЭМ), смонтированные на базе автомобиля УАЗ. Плотномер измеряет плотность, кроме того на нем расположены один датчик давления и два — температуры. Расходомер снимает показания расхода и объема проходящей жидкости. Также возможно применение дополнительных расходомера и плотномера для контроля обратного потока жидкости из скважины. Контроллер снимает сигналы с датчиков, аналого-цифровой преобразователь переводит эти сигналы в цифровые значения, после чего информация с датчиков поступает на компьютер, где обрабатывается специальной программой. Все элементы управления и питания системы установлены в кабине оператора на автомобиле УАЗ (рис. 3).

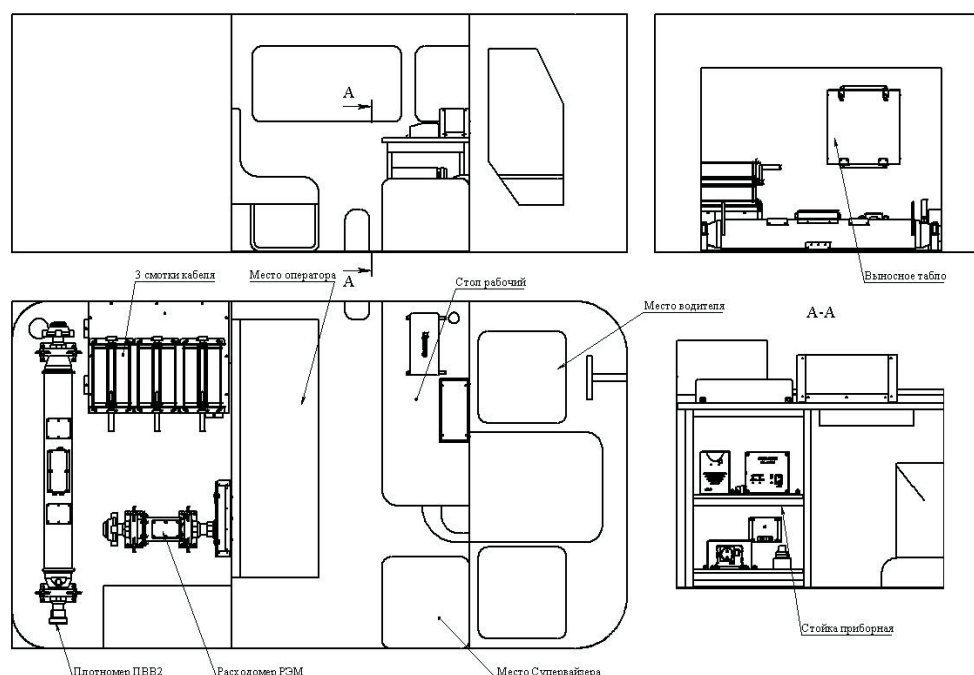


Рис. 3. Компоновка оборудования станции на базе автомобиля УАЗ

Также имеется возможность подключения к блоку питания выносного табло. На нем в реальном времени отображаются все параметры, которые замеряет оборудование. Другой возможностью системы является распечатка всего процесса работы измерительного оборудования в виде графика, на котором четко видно, как проходил процесс закачивания жидкости (рис. 4). Например, на приведенном рисунке можно увидеть, что на проведение технологической операции по глушению скважины было затрачено достаточно большое количество непроизводительного времени, что не соответствует плану работ. Оператор, управляющий системой, имеет возможность сформировать отчет, состоящий из таблицы, отражающей все измеренные параметры в динамике, графика, показывающего изменение во времени плотности, расхода, температуры, давления и объема закачиваемой жидкости, а также фотографий, содержащих информацию о расстановке оборудования или выявленных неисправностях непосредственно после окончания работы.

Таким образом, имеется возможность осуществлять в реальном времени контроль за технологическим процессом, связанным с закачиванием жидкостей в скважину, свести к минимуму ошибки, приводящие к возникновению различных осложнений и аварийных ситуаций, оценивать, на каком этапе работы (начиная от планирования ГТМ) были допущены ошибки, не позволившие качественно произвести ремонт скважины [4, 5].

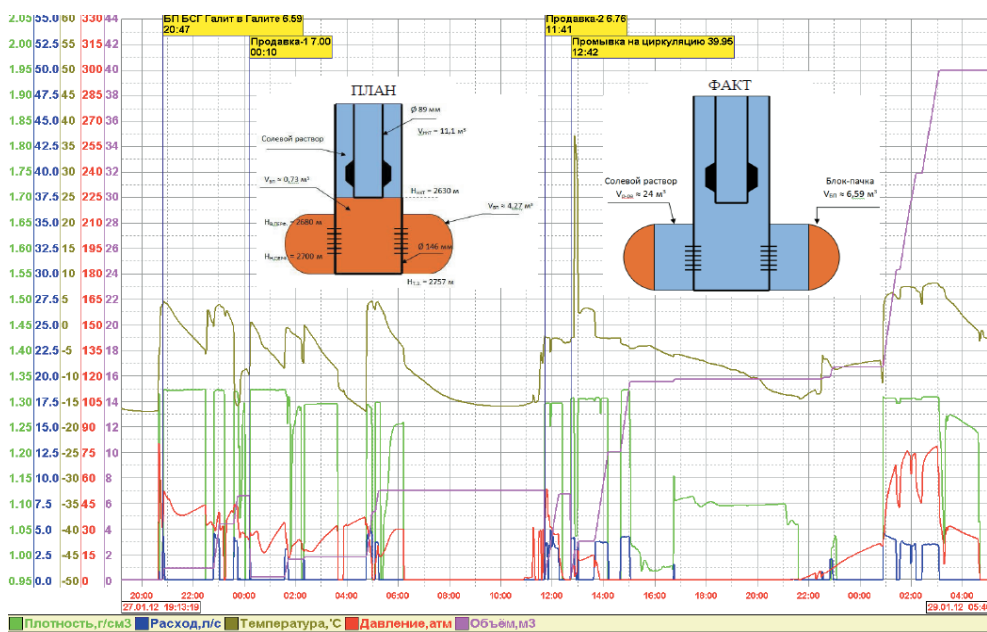


Рис. 4. График глушения скважины

Оценка глубины проникновения и объема закачки ЖГ в призабойную зону

В результате превышения давления ЖГ на забое над внутрислоевым давлением, ее часть, как отмечено выше, будет посредством фильтрации закачиваться в пласт. Обозначим зависимость глубины проникновения ЖГ в пласт от времени функцией $\delta(t)$. Скорость фильтрации v_ϕ ЖГ в пласт в процессе глушения скважины можно оценить по формуле Дарси [3]:

$$v_\phi = -\frac{k}{\mu} \text{grad}P \approx \frac{k}{\mu} \frac{P_{изб}}{\delta}, \quad (7)$$

где $P_{изб}$ — избыточное давление на забое (Па), k — коэффициент проницаемости породы пласта, μ — динамическая вязкость ЖГ. Тогда объем ЖГ, проникшей в пласт за время t , будет равен:

$$V = v_\phi H \pi d_3 \cdot t, \quad (8)$$

где H — толщина (“мощность”) пласта, d_3 — внешний диаметр обсадной колонны.

С другой стороны, тот же самый объем, пренебрегая величиной δ^2 по сравнению с $d_3 \delta$, можно записать в виде:

$$V = \pi H m \left[(d_3/2 + \delta)^2 - (d_3/2)^2 \right] \approx \pi H m d_3 \delta, \quad (9)$$

где m — пористость пласта. Приравнявая (8) и (9) и подставляя вместо v_ϕ формулу (7), получаем:

$$\delta \approx \sqrt{\frac{k P_{изб} t}{m \mu}}. \quad (10)$$

Для тестовых расчетов были использованы средние значения пористости и проницаемости пластов Вынгапурского месторождения: для пласта БВ₈ — $k = 25,5$ мД, $m = 0,1$; для пласта Ю₁¹ — $k = 315$ мД, $m = 0,155$. Толщина (“мощность”) пласта H принята равной 1 м, наружный диаметр обсадной колонны — $d_3 = 168$ мм. Плотность раствора — $\rho = 1,23$ г/см³, площадь сечения НКТ $S_1 = 0,00302$ м², площадь сечения заглубного пространства — $S_2 = 0,01443$ м². Время фильтрации t и избыточное давление было определено для расхода $Q = 3$ л/с. При прямой прокачке время фильтрации $t = 14433$ с, а избыточное давление меняется от 0,054 МПа до 0,033 МПа (среднее значение 0,0435 МПа).

По формуле (10) для пласта БВ₈ получаем $\delta = 0,242$ м; для пласта Ю₁¹ $\delta = 0,682$ м. Объем ЖГ, проникшей в пласт, определяем по формуле (9): для пласта БВ₈ $V = 0,0128$ м³, для пласта Ю₁¹ $V = 0,0558$ м³. При обратной прокачке время фильтрации $t = 3017$ с, а избыточное давление меняется от 1,166 МПа до 0,718 МПа (среднее значение 0,942 МПа).

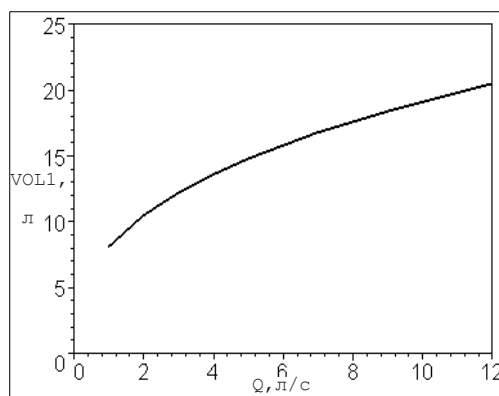


Рис. 5. Зависимость объема закачанной в пласт (мощность пласта = 1 м) жидкости (л) от расхода Q (л/сек) при прямой прокачке за время прокачки; пласт BV_8

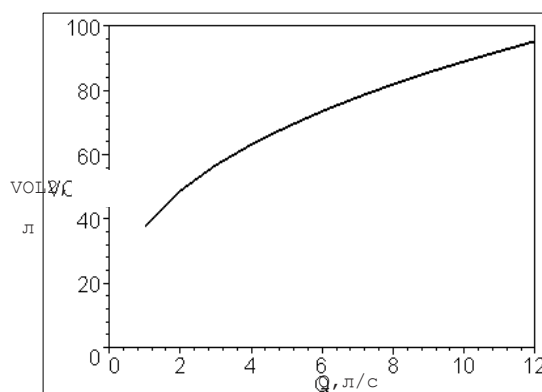


Рис. 6. Зависимость объема закачанной в пласт (мощность пласта = 1 м) жидкости (л) от расхода Q (л/сек) при обратной прокачке за время прокачки; пласт YU_1

По формуле (10) для пласта BV_8 $\delta = 0,514$ м; для пласта YU_1 $\delta = 1,45$ м. Объем ЖГ, проникшей в пласт, по формуле (9) для пласта BV_8 $V = 0,0272$ м³, для пласта YU_1 $V = 0,119$ м³. Результаты аналогичных расчетов для различных значений расхода приведены на рис. 5 и 6: они представляются вполне правдоподобными и качественно согласуются с результатами натуральных испытаний. Для количественного сравнения необходимо выполнить достаточно трудоемкую детальную обработку результатов натуральных экспериментов; это будет сделано в следующей статье.

Выводы

Предложенная физико-математическая модель процесса закачки ЖГ в скважину позволяет осуществлять в реальном времени контроль за технологическим

процессом глушения скважины. Тестовые расчеты зависимости объемов поглощения ЖГ призабойной зоной пласта при разных расходах качественно согласуются с натурными измерениями. Разработанная методика пригодна для определения оптимальных параметров процесса глушения скважин как при прямом, так и при обратном способах закачки ЖГ в скважину.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горбатилов В. А. Математическая модель технологии дискретных закачек в системах поддержания пластового давления / В. А. Горбатилов, М. В. Зубов, А. А. Кислицын // Вестник ТюмГУ. 2005. № 4. С. 76-81.
2. Горбатилов В. А. Системы поддержания пластового давления в новых условиях / В. А. Горбатилов, М. В. Зубов, А. А. Кислицын // Нефтяное хозяйство. 2006. № 1. С. 56-58.
3. Кислицын А. А. Основы теплофизики: учебное пособие / А. А. Кислицын. Тюмень: ТюмГУ, 2002. 152с.
4. Коротченко А. Н. Контроль и регистрация параметров закачиваемых жидкостей при ТКРС / А. Н. Коротченко, Н. И. Расамагин, В. Л. Ходосовский // Бурение и нефть, 2013. № 9. С. 52-53.
5. Коротченко А. Н. Система регистрации параметров, закачиваемых в скважину жидкостей / А. Н. Коротченко, А. А. Земляной // Бурение и нефть. 2013. № 1. С. 49-50
6. Кустышев А. В. Совершенствование и разработка новых методов, средств и технологий эксплуатации и ремонта скважин: авторефер. дисс. канд. техн. наук / А. В. Кустышев. Тюмень: ТюмГНГУ, 2000.
7. Основы супервайзерского контроля при ремонте и реконструкции нефтяных и газовых скважин: учебное пособие / Ю. В. Ваганов, А. В. Кустышев, В. П. Овчинников И. А. Кустышев. Тюмень: ТюмГНГУ, 2014. 160 с.
8. Осложнения и аварии при эксплуатации и ремонте скважин: учеб. пособ. / Г. П. Зозуля, А. В. Кустышев, В. П. Овчинников, Ю. В. Ваганов, В. В. Дмитрук, М. Г. Гейхман. Тюмень: ТюмГНГУ, 2012. 372 с.
9. Регламент по глушению скважин и проведению операций с технологическими жидкостями при добыче, бурении, освоении, капитальном и текущем ремонте скважин. Ноябрьск, 2011.
10. Справочник по расчетам гидравлических и вентиляционных систем / А. С. Юрьев, С. Ю. Пирогов, В. М. Низовцев. СПб.: АНО НПО «Мир и семья», 2001. 1154 с.

REFERENCES

1. Gorbatikov V. A., Zubov M. V., Kislitsyn A. A. Matematicheskaja model' tehnologii diskretnyh zakachek v sistemah podderzhanija plastovogo davlenija [Mathematic Model of Discrete Injections Technology in Reservoir Pressure Maintenance Systems] // Vestnik Tjumenskogo gosudarstvennogo universiteta [Tyumen State University Herald]. 2005. No 4. Pp. 76-81. (In Russian)
2. Gorbatikov V. A., Zubov M. V., Kislitsyn A. A. Sistemy podderzhanija plastovogo davlenija v novyh uslovijah [Reservoir Pressure Maintenance Systems in New

- Conditions] // Neftjanoe hozjajstvo [Oil Industry Journal]. 2006. No 1. Pp. 56-58. (In Russian)
3. Kislitsyn A. A. Osnovy teplofiziki [Fundamentals of Thermal Physics]: Textbook. Tyumen': Isdatel'stvo Tjumenskogo gosudarstvennogo universiteta [Tyumen State University Publishing House], 2002. 152 p. (In Russian)
 4. Korotchenko A. N., Rasamagin N. I., Khodosovscy V. L. Kontrol' i registracija parametrov zakachivaemyh zhidkostej pri TKRS [Control and Registration of Pumped Liquids' Parameters during Operating and Big Repairs of Wells] // Burenie i neft' [Drilling and Oil]. 2013. No 9. Pp. 52-53. (In Russian)
 5. Korotchenko A. N., Zemlyanoy A. A. Sistema registracii parametrov, zakachivaemyh v skvazhinu zhidkostej [Registering System of Parameters of Liquids Being Pumped into Well] // Burenie i neft' [Drilling and Oil]. 2013. No 1. Pp. 49-50. (In Russian)
 6. Kustyshev A. V. Sovershenstvovanie i razrabotka novyh metodov, sredstv i tehnologij jekspluatacii i remonta skvazhin [Perfection and Devising of New Methods, Means and Technologies for Operation and Repair of Wells]: Absract of the Diss. Cand. Sci. (Engin.). Tyumen': Isdatel'stvo Tjumenskogo gosudarstvennogo neftegazovogo universiteta [Tyumen State Oil and Gas University Publishing House], 2000. (In Russian)
 7. Vaganov Yu. V., Kustyshev A. V., Ovchinnikov V. P., Kustyshev I. A. Osnovy supervajzerskogo kontrolja pri remonte i rekonstrukcii neftjanyh i gazovyh skvazhin [Principles of the Supervisory Control when Repairing and Reconstructing Oil and Gas Wells]: Textbook. Tyumen': Isdatel'stvo Tjumenskogo gosudarstvennogo neftegazovogo universiteta [Tyumen State Oil and Gas University Publishing House], 2014. 160 p. (In Russian)
 8. Zozulja G. P., Kustyshev A. V., Ovchinnikov V. P., Vaganov Yu. V., Dmitruk V. V., Gejhman M. G. Oslozhenija i avarii pri jekspluatacii i remonte skvazhin [Complications and Emergencies during Operation and Repair of Wells]: Textbook. Tyumen': Isdatel'stvo Tjumenskogo gosudarstvennogo neftegazovogo universiteta [Tyumen State Oil and Gas University Publishing House], 2012. 372 p. (In Russian)
 9. Reglament po glusheniju skvazhin i provedeniju operacij s tehnologicheskimi zhidkostjami pri dobyche, burenii, osvoenii, kapital'nom i tekushhem remonte skvazhin [Regulations on Killing of Wells and Carry on Operations with Technological Fluids by Mining, Drilling and Repairing of Wells]. Noyabrsk, 2011. (In Russian)
 10. Yuriev A. S., Pirogov S. U., Nizovtsev V. M. Spravochnik po raschetam gidravlicheskih i ventiljacionnyh system [Reference Book for Calculation of Hydraulic and Ventilation Systems]. SPb.: ANO NPO "Mir i sem'ja", 2001. 1154 p. (In Russian).

Авторы публикации

Кустышев Александр Васильевич — доктор технических наук, профессор кафедры бурения нефтяных и газовых скважин Тюменского государственного нефтегазового университета

Коротченко Андрей Николаевич — директор ООО «ИнТех»

Колмаков Эдуард Эдуардович — кандидат физико-математических наук, старший преподаватель кафедры микро- и нанотехнологий Тюменского государственного университета

Расамагин Николай Иннокентьевич — начальник управления внутрискважинных работ ОАО «Газпромнефть-Ноябрьскнефтегаз»

Крюков Павел Иванович — генеральный директор ОАО «Газпромнефть-Ноябрьскнефтегаз»

Authors of the publication

Aleksander V. Kustushev — Dr. Sci. (Engin.), Professor of State Commission for Academic Degrees and Titles, Professor at the Department of Drilling of Oil and Gas Wells, Tyumen Oil and Gas University

Andrey N. Korotchenko — Director of OOO InTech

Eduard E. Kolmakov — Cand. Sci. (Phys. and Math.), Senior Lecturer at the Department of Micro- and Nanotechnologies, Tyumen State University

Nikolai I. Rasamagin — Head of the Downhole Treatment Department, ОАО Gaspromneft-Noyabrskneftegas

Pavel I. Kryukov — General Director of ОАО Gaspromneft-Noyabrskneftegas