бурением, уточнить модель формирования пласта, что повышает эффективность разведки и разработки залежей углеводородов.

Построение седиментационной модели может существенно помочь в решении важных промысловых задач: выбор оптимального способа разработки залежей с наиболее эффективным извлечением углеводородов, так как выявление обстановок осадконакопления позволяет определить фациальную неоднородность пласта, уточнить пространственное положение коллектора в зонах, где отсутствует бурение; осуществить подсчет запасов, а также извлечение трудноизвлекаемых запасов.

Список литературы

1. Еремеев Н. В., Еремеев В. В. Литология, фации и коллекторские свойства верхнеберриасских – нижневаланжинских отложений севера Западной Сибири и прогноз коллекторов нефти и газа // Бюллетень московского общества испытателей природы. отд. геол. 2010. – Т. 85, Вып. 3. – С. 29-44.
2. Бородкин В. Н., Курчиков А. Р. Геологическое строение и перспективы нефтегазоносности ачимовской толщи севера Западной Сибири. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2010. – 286 с.
3. Шишлов С. Б. Структурно-генетический анализ осадочных формаций. – СПб.: С.-Петерб. Горн. Ин-т., 2010. – 276 с.
4. Белозеров В. Б. Роль седиментационных моделей в электрофациальном анализе терригенных отложений // Известия Томского политехнического университета. 2011. – Т. 319. – № 1. – С. 116-123.
5. Муромцев В. С. Электрометрическая геология песчаных тел — литологических ловушек нефти и газа. – Л.: Недра, 1984. – 260 с.

Сведения об авторе

Хасанова Ксения Альфитовна, *аспирант кафедры «Историческая и динамическая геология», Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», г. Санкт-Петербург, e-mail: pinkyroller@mail.ru*

Khasanova K. A.*, post-graduate student of the chair «Historical and dynamic geology», National Mineral Resources University, Saint Petersburg, e-mail: pinkyroller@mail.ru*

Бурение скважин и разработка месторождений

УДК 622.276

ВЛИЯНИЕ ТЕЧЕНИЙ В ПЕРФОРАЦИОННЫХ КАНАЛАХ И В СКВАЖИНЕ НА ПРОДУКТИВНОСТЬ СИСТЕМЫ

INFLUENCE OF FLOWS IN THE PERFORATION CHANNELS AND IN THE WELL ON THE SYSTEM PRODUCTIVITY

О. Б. Бочаров, Д. Ю. Кушнир
O. B. Bocharov, D. Yu. Kushnir

Новосибирский национальный исследовательский государственный университет; компания «Бейкер Хьюз БВ», г. Новосибирск

Ключевые слова: ***численный алгоритм, фильтрация в пористых средах, скважинная добыча нефти, трубная гидравлика, продуктивность перфорационных систем***
Key words: ***numerical algorithm, filtration in porous medium, well oil production, pipe hydraulics, perforation system efficiency***

Одна из важнейших проблем нефтегазовой отрасли — установление эффективной связи между продуктивным пластом и стволом скважины. С этой целью обычно используют перфорацию обсадки скважины и прискважинной зоны [1]. Производительность системы перфорационных каналов и скважины в целом зависит от множества факторов, связанных со свойствами коллектора, типом используемой системы перфорирования, условиями эксплуатации и др. Значительное влияние на производительность системы в целом оказывает степень загрязнения каналов и скважины после проведения перфорационных работ и во время эксплуатации. Обломки зарядов и частицы породы могут оказывать дополнительное гидродинамическое сопротивление течению флюида и приводить к местным падениям давления. Для априорной оценки влияния режимов течения в каналах и скважине необходимо иметь численный алгоритм, который позволяет рассчитывать решение задачи совместного течения в пласте, перфорационных каналах и скважине. Исследования продуктивности систем перфорационных каналов проводились как приближенными методами, так и с использованием различных пакетов вычислительной гидродинамики [2–4]. Однако анализ в условиях учета совместного течения в пласте, перфорационных каналах и скважине в публикациях не описан.

В данной работе представлен экономичный численный алгоритм, обобщающий алгоритм [5] и учитывающий совместные течения в пласте, перфорационных каналах и скважине. С использованием разработанного алгоритма проведен анализ влияния течений в каналах и в скважине на продуктивность системы в целом.

Математическая формулировка задачи. Для описания полной совместной модели необходимы уравнения движения в пласте, перфорационных каналах и скважине, а также условия сопряжения между ними. Задача о фильтрации в пористой среде рассматривается в полной трехмерной постановке, а в каналах и скважине течение описывается в одномерном приближении трубной гидравлики.

Фильтрационное течение в пласте. Для описания течения в пористой среде используется модель фильтрации, основанная на законе Дарси [6]. Перфорационный канал реализован как сингулярный линейный сток, сосредоточенный внутри расчетных блоков. Уравнение сохранения массы в пористой среде с учетом массообмена с каналами принимает следующий вид:

$$\frac{\partial(\rho m)}{\partial t} + div(\rho \vec{v}_f) + \sum_{j=1}^{N_t} \rho q_{tj} \delta_{tj} = 0\,, \quad q_{tj} = C_{tj}(p_f - p_{tj})\,,$$

где ρ — плотность жидкости, m — пористость среды, t — время, $\vec{v}_f$ — скорость фильтрации в пористой среде, q_{tj} — приток жидкости на единицу длины j-го перфорационного канала в единицу времени, δ_{tj} — дельта-функция Дирака с носителем, сосредоточенным на оси j-го перфорационного канала, N_t — количество перфорационных каналов в рассматриваемой области, C_{tj} — коэффициент приемистости j-го канала, p_f — поровое давление, p_{tj} — давление в j-м канале.

Если пренебречь изменением плотности и вязкости флюида с изменением давления и предположить, что среда не деформируема ($\rho = const$, $\mu = const$, $m = const$), то задача сводится к стационарной. Подставив закон Дарси

$$\vec{v}_f = -\frac{K_f}{\mu}\left(\nabla p_f + \gamma z\right),$$

где K_f — тензор проницаемости пористой среды, μ — вязкость жидкости, γ — удельный вес флюида, в закон сохранения массы, получим уравнение

$$div\left(\frac{K_f}{\mu}\left(\nabla p_f + \gamma z\right)\right) - \sum_{j=1}^{N_t} q_{tj}\delta_{tj} = 0\,.$$

Уравнение решается в цилиндрической области

$$\Omega = \{r_b \le r \le r_e,\ 0 \le \varphi \le 2\pi, 0 \le z \le H\}\,,$$

где ось r направлена перпендикулярно оси скважины, совпадающей с координатной линией z; φ — угловая координата в плоскости, перпендикулярной оси скважины; r_b — радиус скважины; r_e — радиус влияния скважины; H — суммарная толщина пласта. На границе расчетной области заданы следующие граничные условия:

$$\left.\frac{\partial p_f}{\partial r}\right|_{r=r_b} = 0\,, \quad p_f\big|_{r=r_e} = p_e(z)\,.$$

На подошве и кровле пласта, при $z = 0$, $z = H$ соответственно, заданы условия непротекания:

$$\left. v_z \equiv -\frac{K_f}{\mu}\frac{\partial}{\partial z}(p_f + \gamma z)\right|_{z=0} = 0\,, \quad v_z\big|_{z=H} = 0\,.$$

Вдоль угловой координаты φ выполнены условия периодичности: $p_f\,|_{\varphi=0} = p_f\,|_{\varphi=2\pi}$. Предполагается, что давление вдали от скважины при $r = r_e$, распределено по гидростатическому закону: $p_e(z) = \gamma(H - z)$.

Модель течения в перфорационных каналах и скважине. Для расчета характеристик течения в перфорационных каналах и скважине используется одномерное приближение трубной гидравлики [7], а именно, для определения скорости и давления в каждом перфорационном канале и скважине предлагается решать следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial(v_t\omega_t\rho)}{\partial l} = F, \\ \dfrac{\partial}{\partial l}\left[\omega_t(p_t + \alpha\rho v_t{}^2)\right] = -f_t + p_t\dfrac{\partial\omega_t}{\partial l}, \end{cases} \qquad F = \begin{cases} \rho q_{tj}, & \text{в канале}, \\ \sum\limits_{j=1}^{N_t} \rho q_{hj}\delta_{htj} & \text{в скважине}. \end{cases}$$

Здесь v_t — осредненная по сечению скорость течения в трубе, $\omega_t(l)$ — площадь поперечного сечения трубы, l — линейная координата вдоль оси трубы, p_t — осредненное по сечению давление в трубе, f_t — удельная сила сопротивления на единицу длины трубы, α — коэффициент учета турбулентно-конвективного переноса (при ламинарном течении в гладких трубах $\alpha = 1$), δ_{htj} — дельта-функция Дирака, сосредоточенная в точке соединения *j*-го перфорационного канала и скважины. Величины q_{tj}, q_{hj} определяются из условия сохранения массы в местах контакта пористой среды с каналами и скважины с каналами.

На конце канала, в точке соединения со скважиной, задается равенство давлений $p_t\,|_{l=0} = p_h\,|_{z=z_t}$. На другом конце канала, находящемся в пласте, задается приток жидкости через носик канала из пористой среды при условии равенства давлений между каналом и пластом в этой точке $p_t\,|_{l=L_t} = p_f(r_t, \varphi_t, z_t)$. Здесь (r_t, φ_t, z_t) — координаты носика канала.

В скважине на концах интервала $[z_1, z_2]$, содержащего интервал $[0, H]$, задается либо расход, либо давление. Условия на разных концах могут быть различны.

Сила сопротивления f_t в общем случае зависит от числа Рейнольдса $\mathrm{Re} = v_t d_t \rho / \mu$, ($d_t$ — диаметр трубы) и относительной шероховатости стенок трубы Δ / d_t и записывается в виде

$$f_t = \lambda(\mathrm{Re}, \Delta / d_t)\rho v_t^2\,\omega_t / (2d_t)\,,$$

где λ — коэффициент гидравлического трения, зависящий от режима течения в трубе.

Режимы течений. Предполагается, что в пористой среде имеет место ламинарный режим фильтрации в соответствии с законом Дарси. В каналах и скважине может реализовываться как ламинарный режим течения, так и турбулентный, в зависимости от чисел Рейнольдса. Различие между ламинарным и турбулентным режимами задается зависимостью $\lambda(\mathrm{Re}, \Delta / d_t)$. Для ламинарного течения, в случае не загрязненного частицами канала, удельная сила трения вдоль канала вычисляется по формуле, соответствующей течению Пуазейля в канале круглого сечения, $f_t = 8\pi\mu v_t$, $\lambda = 64 / \mathrm{Re}$.

Если канал существенно загрязнен, забит частицами, то, проводя аналогию с трением в пористой среде, можно ввести проницаемость канала k_t. Тогда удельная сила трения имеет вид $f_t = \omega_t \mu v_t / k_t$, $k_t = 2d_t^2 /(\lambda\,\mathrm{Re})$. Значение $k_t = d_t^2 / 32$ соответствует течению Пуазейля в «чистом» канале.

Для ламинарно-турбулентного и турбулентного режимов течения в канале, которые возникают при $\mathrm{Re} \geq \mathrm{Re}^*$ $(600 \leq \mathrm{Re}^* \leq 1500)$, при вычислении коэффициента гидравлического трения используется формула Альтшуля

$$\lambda = 0{,}11(\Delta / d_t + 68/\mathrm{Re})^{0,25},$$

которая хорошо описывает экспериментальные данные [8]. Эквивалентная шероховатость Δ, например, для бетонных и цементных каналов варьируется в пределах от 0,3 до 9 мм [8].

Численный алгоритм. Как видно из постановки, задача достаточно объемная. Без учета течения в каналах и скважине численный алгоритм подробно описан в [5]. В указанной работе приводятся результаты моделирования фильтрационного течения в пласте с использованием модели постоянного давления в перфорационных каналах. В данной работе используется усовершенствованный алгоритм для расчета совместных течений в пласте, перфорационных каналах и скважине. Здесь мы не будем описывать детали численной реализации, а лишь выделим общие идеи построения алгоритма.

Мы рассматриваем стационарные режимы, поэтому для определения давления и расхода в каналах и скважине получаются системы нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений, связанных по правым частям и краевым условиям. При получении алгебраических уравнений мы использовали интегро-интерполяционный метод и противопотоковые аппроксимации, принятые в гидродинамике [9]. Линеаризация проводилась в ходе расчетов по методу простой итерации. Последовательное решение задач для пласта, каналов и скважины составляло шаг глобального итерационного процесса.

Отметим, что для ламинарного режима без учета конвективных членов модель течения в каналах и скважине сильно упрощается, и решение этих подзадач может быть включено в итерационный алгоритм решения фильтрационной задачи в пласте. Это позволяет существенно сэкономить вычислительные ресурсы.

Влияние течений в перфорационном канале и в скважине на продуктивность системы перфорационных каналов. Для исследования влияния течения в канале на коэффициент продуктивности рассмотрим модельную задачу с одним каналом, расположенным достаточно далеко от кровли и подошвы пласта. Это позволит исключить влияние интерференции каналов и размеров области.

Параметры базового варианта: радиус скважины $r_b = 8{,}9$ см, радиус влияния скважины $r_e = 254$ см, рабочий перепад давления $\Delta p = p_e - p_h = 0{,}1$ МПа, проницаемость пласта $k_f = 100$ мД, вязкость пластового флюида $\mu = 1$ сп, плотность пластового флюида $\rho = 1000$ кг/м^3. Рассматривается один перфорационный канал, расстояние до подошвы и до кровли пласта одинаковое и равно 122 см, длина перфорационного канала $L_t = 51$ см, диаметр перфорационного канала $d_t = 1{,}3$ см. Зона внедрения бурового раствора и зона уплотнения вокруг каналов не учитываются.

Влияние режимов течения в канале. Для оценки влияния течения в канале будем варьировать проницаемость канала k_t. Значению $k_t = d_t^2/32$ соответствует течение Пуазейля. При стремлении проницаемости канала к бесконечности получаем в пределе модель с постоянным давлением в канале. Для имитации загрязнения канала (канал может быть забит частицами: гравийная набивка, песок, проппант, остатки зарядного устройства) варьируем $k_t \div 100 - 1000$ Дарси [6].

Основным технологическим показателем при анализе перфорационных систем является коэффициент продуктивности Pr, равный отношению притока продукта через перфорационные каналы Q к притоку в необсаженную часть скважины Q_0, рассчитываемому по формуле Дюпюи [6].

На рис. 1 приведены расчетные зависимости коэффициента продуктивности от проницаемости канала. Сравниваются три подхода. Первый — без учета течения в канале, второй — с учетом течения в канале с конвективным переносом $(\alpha = 1)$, третий — с учетом течения в канале, но без конвективного переноса $(\alpha = 0)$. Точки 4, 5, 6 показывают, что, если проницаемость канала на 3 порядка больше, чем проницаемость пористой среды, то коэффициент продуктивности почти в 2 раза меньше по сравнению с чистым каналов, если же проницаемость канала 1000 Д — на 10 %. Из сравнения кривых 2 и 3 можно сделать вывод, что при ламинарном режиме течений учет конвективных членов не влияет на продуктивность.

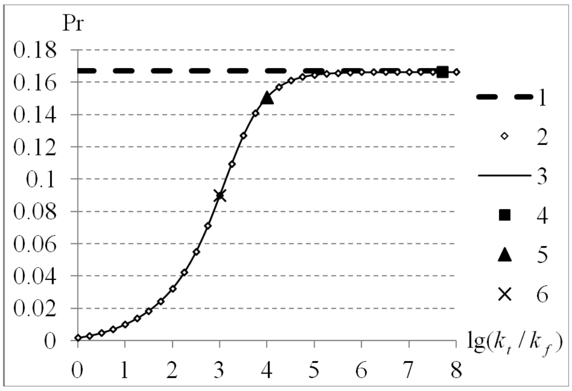
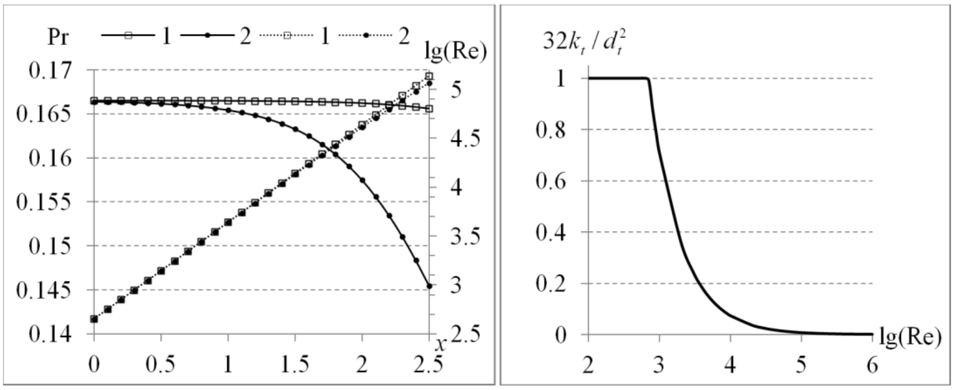


Рис. 1. ***Коэффициент продуктивности канала* Pr *в зависимости от проницаемости*** k_t**:**
1 — без учета течения в канале; 2 — с учетом течения в канале с конвективным переносом, α =1; 3 — с учетом течения в канале без конвективного переноса, α = 0; 4 – $k_t = 10^{6,71}$ *Д; 5 –* $k_t = 10^3$ *Д; 6 –* $k_t = 10^2$ *Д*

В расчетах, приведенных на рис. 1 числа Рейнольдса в канале не превышают 1 000. При увеличении чисел Рейнольдса возникает турбулентный режим течения в канале. В частности, турбулентный режим течения может возникнуть при увеличении рабочего перепада давления Δp. На рис. 2 приведены расчитанные зависимости коэффициента продуктивности (левая шкала, сплошные линии), проницаемости канала и числа Рейнольдса от перепада давления (правая шкала, точечные линии) в логарифмической шкале. При этом k_t рассчитывается с использованием формулы Альтшуля ($\Delta = 0{,}5$ см, $d_t = 1{,}3$ см, $x = \lg(\Delta p / \Delta p_0)$, $\Delta p_0 = 0{,}1$ МПа).



а) б)

Рис. 2. ***Зависимости коэффициентов:***

а) продуктивности и числа Рейнольдса в середине канала от перепада давления (1 — без учета конвективного переноса, α = 0; 2 — с учетом конвективного переноса, α =1); б) коэффициента сопротивления (проницаемости) канала от числа Рейнольдса ($Re^* = 700$)

С увеличением перепада давления растет среднее число Рейнольдса в канале. При этом падает проницаемость, то есть пропускная способность канала (см. рис. 2 б), что приводит к снижению продуктивности. При увеличении давления на два порядка коэффициент продуктивности канала падает примерно на 12 % (см. рис. 2 а).

Расчеты с $k_t = const$ представлены на рис. 3 ($k_t = 10^{7,71} k_f$ соответствует течению Пуазейля с $k_t = d_t^2 / 32$). Видно, что с увеличением проницаемости канала влияние конвективных членов усиливается (расхождение кривых становится существеннее). Для того чтобы конвективный перенос в канале повлиял на коэффициент продуктивности, необходимо увеличить числа Рейнольдса в канале. Зависимость числа Рейнольдса в канале от рабочего перепада давления указана на правой шкале (см. рис. 2 а). По графикам на рис. 3 и 2 а (левая шкала) можно заключить, что влияние конвективного переноса становится заметным лишь при $x = \lg(\Delta p / \Delta p_0) \geq 1$ или $\mathrm{Re} \geq 5 \cdot 10^3$.

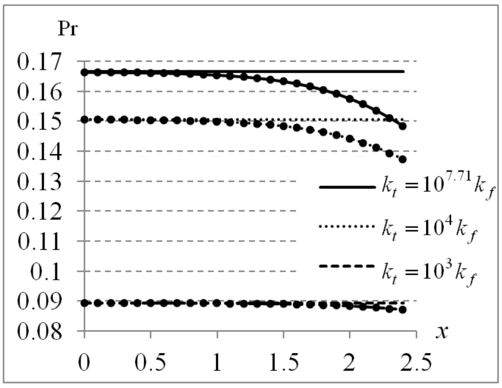


Рис. 3.
Зависимость коэффициента продуктивности от перепада давления при различных k_t:
линии с (●) — расчеты с учетом конвективного переноса, α =1; линии без (●) — расчеты без учета конвективного переноса, α = 0; $x = \lg(\Delta p / \Delta p_0)$

При варьировании эквивалентной шероховатости каналов Δ от $0{,}03$ до $0{,}9$ см коэффициент продуктивности практически не менялся для всех просчитанных значений Δp .

Влияние течения в скважине. Анализ влияния течения в скважине на продуктивность работы системы перфорационных каналов проведен для случая ламинарного течения в скважине без учета конвективного переноса, так как представленные выше численные эксперименты с течением в канале показали, что его влияние менее существенно по сравнению со степенью загрязнения канала.

В качестве модельной рассмотрена задача в слоистом пласте, состоящем из 9 слоев различной толщины и проницаемости. Использованы данные о пласте из работы [10]. Суммарная мощность пласта равна $30{,}8$ м. В каждом слое находится спиральная перфорационная система с фазовым углом 60^0 (угол между проекциями осей соседних каналов на плоскость, перпендикулярную оси скважины) и плотностью 18 выстрелов на метр вдоль оси скважины. Длина и диаметр каналов равны соответственно $65{,}7$ и $2{,}1$ см. В каналах рассматривается ламинарный режим течения. В скважине на подошве пласта задано условие непротекания $v_h|_{z=0} = 0$, а на кровле некоторое давление $p_h|_{z=H} = p_w$.

На рис. 4 показана зависимость продуктивности от коэффициента проницаемости канала при различных значениях проницаемости в скважине. Проницаемость скважины k_h варьируется от 100 до 10^9 Д, последнее значение соответствует течению Пуазейля с проницаемостью $k_h = d_h^2/32$. Падение значения k_h до 100 Д соответствует тому, что в скважине может образоваться малопроницаемая пробка, при этом коэффициент продуктивности системы существенно падает (до 10 раз), примерно во столько же раз падает и дебит скважины.

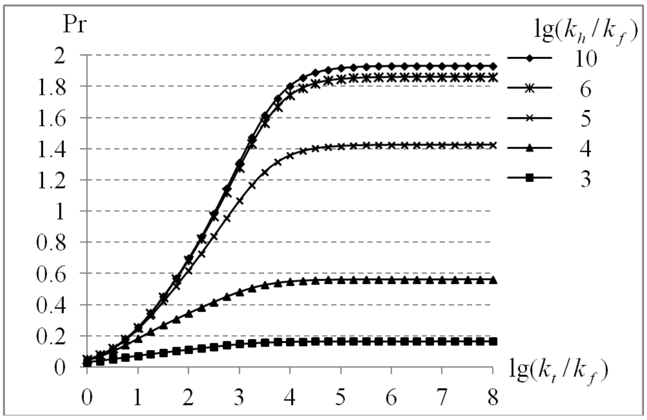


Рис. 4. ***Зависимость коэффициента продуктивности системы перфорационных каналов от проницаемости канала*** k_t ***и скважины*** k_h

Замечание. Систематические расчеты для различных параметров задачи, в частности, показали, что варьирование плотности и вязкости флюида в пределах 500–2 000 кг/м^3 и 0,5–40 сп изменяет коэффициент продуктивности в пределах 1 %, что сравнимо с точностью вычислений.

На основании проведенных численных экспериментов можно сделать определенные выводы.

- Чистота каналов и скважины существенно влияет на коэффициент продуктивности.

- Учет конвективного переноса в модели течения в канале-скважине при ламинарном режиме почти не влияет на изменения коэффициента продуктивности — разница при учете и без учета конвективного переноса менее 1 %.
- Если отношение коэффициентов проницаемости канала-скважины и пористой среды составляет 5 порядков и более, то течением в канале-скважине можно пренебречь.

Список литературы

1. Булатов А. И., Макаренко П. П., Будников В. Ф., Басарыгин Ю. М. Теория и практика заканчивания скважин: Под ред. А. И. Булатова. В 5 т. Т. 5. – М.: Недра, 1998.
2. Karakas M., Tariq S.M. Semianalytical Productivity Models for Perforated Completions // SPE Production Engineering. February, 1991. Vol. 6, № 1. p.73-82.
3. Sun D., Li B., Gladkikh M., Satti R., Evans R. Comparison of Skin Factors for Perforated Completions Calculated with Computational Fluid Dynamics Software and a Semi-Analytical Model // SPE 143663-MS presented at the SPE European Formation Damage Conference, Noordwijk. June, 2011. p.1-15.
4. Сохошко С. К. Развитие теории фильтрации к пологим и горизонтальным газовым и нефтяным скважинам и ее применение для решения прикладных задач: Дис. … докт. техн. наук. Тюмень: ТюмГНГУ, 2008. – 211 с.
5. Рудяк В. Я, Бочаров О. Б., Кушнир Д. Ю. Эффективный алгоритм расчета притока флюида в скважину через систему перфорационных каналов // Вычислительные технологии, 2013. т. 18, – № 2. – С. 72-83.
6. Маскет М. Течение однородных жидкостей в пористой среде. – Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2004. – 628 с.
7. Попов Д. Н. Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем. – М.: Машиностроение, 1977.
8. Курганов А. М., Федоров Н. Ф.Справочник по гидравлическим расчетам систем водоснабжения и канализации. – Л.: Стройиздат, 1973. – 408 с.
9. Андерсон Д., Таннехил Дж., Плетчер Р. Вычислительная гидродинамика и теплообмен. – М.: Мир, 1990.
10. Sinor A., Powers J., Ripp C., Lovin S., McEntire M. Unique Field Research Facility Designed to Accelerate New Technology Development and Enhance Tool Reliability // AADE 01-NC-HO-36 presented at the AADE 2001 National Drilling Conference, Houston, TX, March, 2001. P. 27-29.

Сведения об авторах

Бочаров Олег Борисович, *к. ф.-м. н., доцент, научный сотрудник Новосибирского технологического центра компании «Бейкер Хьюз Б.В.», г. Новосибирск, тел. 89231804288, e-mail: Oleg.Bocharov@bakerhughes.com*

Кушнир Дмитрий Юрьевич, *аспирант, Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, г. Новосибирск, тел. 89237096087, e-mail: kushnir.dmitriy@gmail.com*

Bocharov O. B.*, Candidate of Sciences in Physics and Mathematics, associate professor, scientific worker of the Novosibirsk Technology Center of the company «Baker Hughes B.V.», phone: 89231804288, e-mail: Oleg.Bocharov@bakerhughes.com*

Kushnir D. Yu.*, postgraduate of Novosibirsk National Research State University, phone: 89237096087, e-mail: kushnir.dmitriy@gmail.com*

УДК 620: 622.24.05

ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ БУРОВОГО ИНСТРУМЕНТА

ELECTROLYTIC TECHNOLOGIES OF DRILL TOOL COMPONENTS STRENGTHENING

Н. Н. Закиров
N. N. Zakirov

Тюменский государственный нефтегазовый университет, г. Тюмень

Ключевые слова: ***опора долота, износ, композиционные покрытия, технология упрочнения***
Key word: ***drill bit support, wear, composite coating, strengthening technology***

Повышение технико-экономических показателей бурения нефтегазовых скважин в значительной степени можно обеспечить сокращением больших потерь времени на смену изношенного породоразрушающего инструмента, работоспособность которого определяется долговечностью отдельных его узлов и вооруже-