



Оригинальная статья / Original article

УДК 622.245

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-2-125-133>



## Инновационные решения в строительстве глубоких скважин на промышленные рассолы, нефть и газ в деформируемых трещинных коллекторах

© А.Г. Вахромеев<sup>a</sup>, С.А. Сверкунов<sup>b</sup>, Р.Х. Акчурин<sup>c</sup>,  
В.М. Иванишин<sup>d</sup>, В.В. Ружич<sup>e</sup>, И.В. Ташкевич<sup>f</sup>, М.А. Лисицин<sup>g</sup>

<sup>a,b,e,f</sup>Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

<sup>a-d,f</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

<sup>c,d</sup>Иркутский филиал ООО «РН-Бурение», г. Иркутск, Россия

<sup>g</sup>ООО «Таас-Юрях Нефтегазодобыча», г. Ленск, Россия

**Резюме:** В работе обсуждаются методические особенности бурения и заканчивания скважин в трещинных природных резервуарах, вмещающих залежи с разным пластовым давлением флюидонапорных систем – от аномально низкого до аномально высокого. Исследования флюидонапорных систем промышленных бромолитиеносных рассолов, месторождений и залежей нефти и газа выполнены авторами на юге Сибирской платформы в период с 1983 по 2019 гг. В статье обобщены главные результаты, в том числе новые технические решения, которые защищены патентами Российской Федерации. Авторы предложили и запатентовали серию новых технических решений для закрепления естественных проницаемых трещин сразу, в процессе первичного вскрытия пласта-коллектора бурением применительно к трещинному резервуару. Главная задача исследования – сохранить проницаемость трещинной системы в области призабойной зоны пласта при воздействии сжимающих напряжений (массива горных пород), возрастающих с формированием воронок депрессии, в первую очередь в призабойной зоне пласта при росте депрессии  $\Delta P$  выше критических значений. Такой областью является призабойная зона пласта в радиусе первых метров вокруг скважины, вскрывшей трещинный пласт-коллектор. Практика показала, что с применением инновационных решений через опережающее закрепление проницаемых трещин в призабойной зоне пласта (флюидопроявляющего нефтегазоносного, рапоносного) в открытом (исходном природном) состоянии обеспечивается сохранение естественной проницаемости природных фильтрующих трещин пласта-коллектора с пластовым давлением флюидной системы от аномально низкого до аномально высокого. Это обеспечивает постоянство проницаемости трещинной фильтрационной системы на протяжении циклов очистки пород призабойной зоны пласта от бурового раствора, получение истинных расчетных гидродинамических параметров по результатам испытания скважины на режимах «методом установившихся отборов» и стабилизацию дебита (продуктивности) при дальнейшей эксплуатации скважины.

**Ключевые слова:** промышленные воды, трещинные природные резервуары, бурение и заканчивание скважин

**Для цитирования:** Вахромеев А.Г., Сверкунов С.А., Акчурин Р.Х., Иванишин В.М., Ружич В.В., Ташкевич И.В. [и др.]. Инновационные решения в строительстве глубоких скважин на промышленные рассолы, нефть и газ в деформируемых трещинных коллекторах. *Науки о Земле и недропользование*. 2021. Т. 44. № 2. С. 125–133. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-2-125-133>

## Innovative solutions in construction of deep industrial brine, oil and gas wells in deformable fractured reservoirs

Andrey G. Vakhromeev<sup>a</sup>, Sergey A. Sverkunov<sup>b</sup>, Renat Kh. Akchurin<sup>c</sup>,  
Vladimir M. Ivanishin<sup>d</sup>, Valery V. Ruzhich<sup>e</sup>, Ivan D. Tashkevich<sup>f</sup>, Maksim A. Lisitsyn<sup>g</sup>

<sup>a,b,e,f</sup>Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

<sup>a-d,f</sup>Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

<sup>c,d</sup>LLC "RN-Drilling", Irkutsk Branch, Irkutsk, Russia

<sup>g</sup>Taas-Yuryakh Neftegazodobycha LLC, Lensk, Russia

**Abstract:** The paper deals with the methodological features of drilling and completion of wells in the fractured natural reservoirs containing oil and gas accumulations with different reservoir pressures of fluid-pressure systems from abnormally high to abnormally low. The authors had studied the fluid-pressure systems of industrial lithium-bromine brines, oil and gas fields and accumulations in the south of the Siberian platform for the period from 1983 to 2019. The article summarizes the main results, including new technical solutions protected by the Russian Federation patents. The authors



proposed and patented a series of new technical solutions for the immediate consolidation of natural permeable fractures during the primary opening of the reservoir by drilling, as applied to a fractured reservoir. The main task of the study is to preserve the permeability of the fractured system in the bottomhole formation zone under the action of compressive stresses (rock mass) that increase with the formation of a drawdown cone, primarily in the bottomhole formation zone with the increase in the drawdown ( $\Delta P$ ) above critical values. Such an area is the bottomhole formation zone within a radius of the first meters around the well that penetrated the fractured reservoir. Practice has proved that the use of innovative solutions through the advanced consolidation of permeable fractures in the bottomhole formation zone (of fluid-producing oil- and gas-bearing, water-bearing reservoir) in the open (initial natural) state ensures the preservation of natural permeability of natural filtering fractures of the reservoir with the fluid system reservoir pressure from anomalously low to abnormally high. The solution ensures constant permeability of the fractured filtration system throughout the cleaning cycles of the bottomhole formation zone rocks from drilling mud, obtaining of the true calculated hydrodynamic parameters based on the results of well testing in the modes of the “steady-state production method” and well flow rate (productivity) stabilization under further well operation.

**Keywords:** commercial waters, fractured natural reservoirs, well drilling and completion

**For citation:** Vakhromeev AG, Sverkunov SA, Akchurin RKh, Ivanishin VM, Ruzhich VV, Tashkevich ID, et al. Innovative solutions in construction of deep industrial brine, oil and gas wells in deformable fractured reservoirs. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2021;44(2):125–133. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-2-125-133>

### Введение

Геологический разрез осадочного чехла Сибирской платформы, по которому бурится глубокая скважина, априори находится в напряженном состоянии. Исследования закономерностей развития обратимых и необратимых изменений, деформаций горных пород в призабойной зоне пласта (ПЗП) скважин и в продуктивном пласте с углеводородным или гидроминеральным насыщением крайне важны для решения вопросов корректной оценки гидродинамических параметров продуктивного пласта-коллектора (проницаемости, водопроводимости, продуктивности по промышленному рассолу, нефти, газоконденсатной смеси, а также извлекаемых запасов гидроминеральной или углеводородной системы; обоснования допустимого диапазона депрессии на систему «пласт – залежь» (флюидодинамическую систему); проектирования гидроразрыва пласта во всех его модификациях.

### Материалы и методы исследования

Важно учесть горно-геологические условия конкретного природного резервуара, свойства пластовых гидроминеральных или углеводородных систем. Это позволит обосновать технологические подходы к бурению,

испытанию на продуктивность (гидродинамическим исследованиям) и освоению залежей нефти, газа и металлоносных рассолов в деформируемых коллекторах<sup>1,2</sup> [1–16].

Залежи промышленных рассолов и углеводородов в терригенных природных резервуарах венда и трещинных массивных резервуарах рифея Сибирской платформы характеризуются аномально низким пластовым давлением флюидов с градиентом около 0,7–0,8 от гидростатического. Высоконапорные залежи в межсолевых карбонатных трещинных пластах (зонах) мегарезервуаров венда-кембрия содержат предельно насыщенные промышленные рассолы – рапу с концентрацией солей более 600 г/л и плотностью до 1,48 г/см<sup>3</sup>, нередко с газом, что существенно осложняет процесс их вскрытия бурением. Задokumentированы дебиты нефти до 1 тыс. м<sup>3</sup>/сут., газа – до 1 млн м<sup>3</sup>/сут., слабых рассолов – до 30 тыс. м<sup>3</sup>/сут., концентрированных рассолов (рапы) – до 7,5 тыс. м<sup>3</sup>/сут., которые связаны с трещинно-жильным типом коллектора. Значения коэффициента аномальности  $K_{ан}$  флюидной системы карбонатов кембрия – более 2,35.

Ранее показано, что для первичного вскрытия трещинных коллекторов диапазон текущих забойных давлений в ПЗП не ограничивается областью депрессии, а имеет волновой характер и находится в диапазоне от состояния

<sup>1</sup> Сверкунов С.А., Вахромеев А.Г. Бурение горизонтальных стволов скважин в сложных карбонатных коллекторах с низкими градиентами пластового давления углеводородных систем: учеб. пособие. М. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2020. 240 с.

<sup>2</sup> Усачев П.М. Гидравлический разрыв пласта: учеб. пособие. М.: Недра, 1986. 165 с.

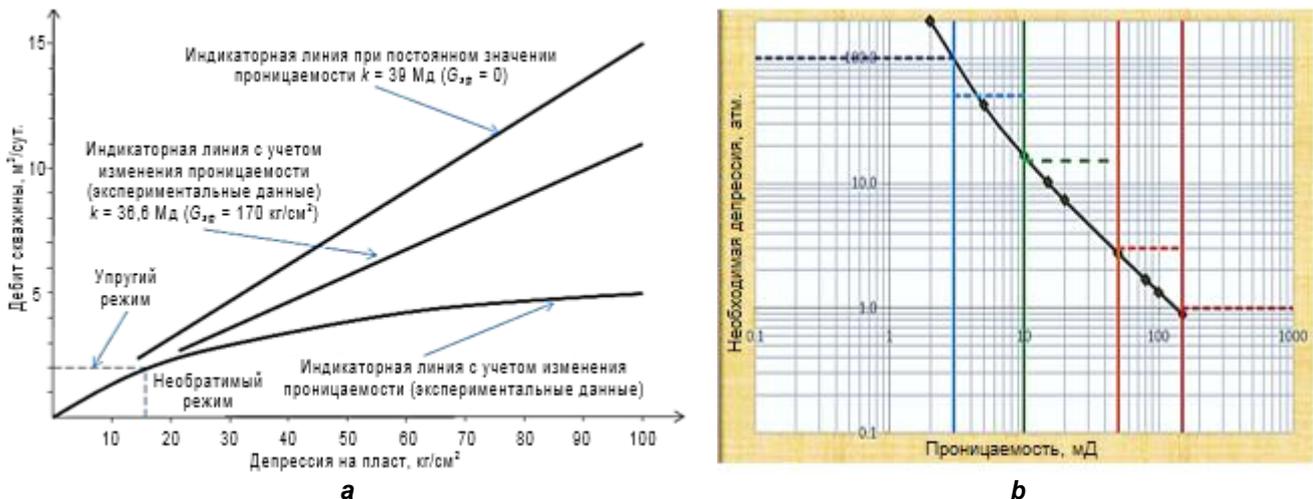
репрессии до депрессии относительно пластовых давлений флюидной системы. По сути, такой коллектор характеризуется равновесными условиями пластового давления флюида и горизонтальной составляющей горного давления на стенки фильтрующих трещин ПЗП, фильтрующих как буровой раствор в первичном вскрытии в условиях  $P_{тек} > P_{пл}$ , так и флюид из пласта (нефть, газ, промышленные рассолы) в условиях  $P_{тек} < P_{пл}$  (здесь  $P_{тек}$  – текущее давление;  $P_{пл}$  – пластовое давление).

Согласно Б.В. Боровскому, «наиболее очевидной реакцией коллекторов на воздействие приложения внешних сил является их деформация; обнаружение явления деформации коллекторов и заключенных в них жидкостей и газов послужило толчком к созданию теории упругого режима фильтрации, на которой базируются современные методы оценки эксплуатационных запасов флюидов в напорных пластах» [2]. К сходным выводам приходят исследователи в работах [1, 3, 5, 6]. Так, лабораторными экспериментами на керне из продуктивного трещинного коллектора рифея Юрубчено-Тохомского нефтегазоконденсатного месторождения установлено [5], что процесс деформации коллектора необратим. На основе данных по керну описывается, что

коллектор очень неоднороден. Это крайне осложняет эксплуатацию месторождения. При пористости всего до 1,2 % проницаемость микро- и макротрещин колеблется в пределах от 0,00001 до 3,6534 мкм<sup>2</sup>. Такая неоднородность по проницаемости приводит к большим ограничениям и очень узкому диапазону возможных депрессий в цикле добычи флюида – рассолов, нефти. Дело в том, что трещинные системы при определенных депрессиях смыкаются. Скелет коллектора испытывает напряжения, приводящие к «схлопыванию» фильтрующих пустотных пространств, а именно трещин. При восстановлении первичных условий (пластовых давлений) проницаемость трещин заметно снижается, в отдельных случаях до 90 %. Таким образом, скелет горной породы релаксирует и уже не может принять прежний исходный вид (рис. 1). Базовый вывод исследователей заключается в том, что при эксплуатации скважин на нефть и газ в условиях деформируемого карбонатного кверново-трещинного коллектора должны быть обозначены нижние предельные значения депрессии. При падении ниже нижнего уровня будет происходить безвозвратная потеря фильтрационных характеристик коллектора (рис. 2, а). Ограничение депрессии по величине неэффективно (рис. 2, б).



Рис. 1. Изменение зависимости дебита от депрессии по материалам М.Д. Белонина, 2005  
Fig. 1. Variation of well flow rate dependence on differential pressure drawdown based on M.D. Belonin's materials, 2005



**Рис. 2. Сопоставление параметров зависимости дебита от депрессии:**

*a – по материалам М.Д. Белонина, 2005;*

*b – по материалам А.Э. Конторовича, 2011*

**Fig. 2. Parameter comparison of well flow rate vs differential pressure drawdown:**

*a – based on M.D. Belonin's materials, 2005;*

*b – based on A.E. Kontorovich's materials, 2011*

Геопромысловыми исследованиями доказано: процесс неупругих деформаций трещинной системы в ПЗП может иметь место в определенном диапазоне депрессии (см. рис. 1) либо наблюдается уже непосредственно в рабочих циклах бурения и испытания / освоения скважины – при изменении гидравлической программы бурения. Причем при минимальных колебаниях текущего забойного давления<sup>3</sup> и более широком диапазоне динамических давлений на забое – от репрессии до депрессии. Тогда процесс бурения скважин по деформируемому коллектору в условиях минимальных градиентов динамического давления (относительно градиента пластового давления флюида на этой глубине) требует новых проектных и практических решений. Для цикла первичного вскрытия бурением нефтяного пласта сложно подобрать гидравлические условия «щадящего» вскрытия, когда перепад давления на пласт минимален или отсутствует. Если давление в залежи будет уменьшаться интенсивнее, чем это заложено в расчетной модели, то накопленная добыча нефти снижается на 20–28 % добычи, рассчитанной без учета деформаций. На основе данных бурения авторы пришли к выводу (сопоставимому с изложенными в работе [5] поло-

жениями), который подтверждает явление деформации трещинного коллектора, наблюдаемое как в области депрессии, так и в области репрессии, в процессе бурения [3, 4].

Таким образом, подчеркнем, что экспериментального развития требует именно область исследований деформируемых неустойчивых коллекторов. К неустойчивым следует отнести флюидонасыщенные трещинные коллектора в равновесном природном состоянии механической (коллектор, стенки фильтрующих трещин) и гидравлической (флюид) систем. Бурением это хрупкое равновесие нарушается, ПЗП меняет проницаемость под воздействием импульсных гидравлических колебаний потока промывочной жидкости.

В то же время область перепада давления, где в ПЗП (и в воронке депрессии / репрессии) трещинный коллектор деформируется – «узкое» место / область (см. рис. 2, а) на стыке геологии, гидрогеологии, бурения и разработки месторождения флюидов (промышленные воды, углеводороды). Это переходная область от нерентабельной скважины к рентабельной. Находя приемлемый технический подход и алгоритмы его реализации в практике бурового цикла по деформируемым

<sup>3</sup> Сверкунов С.А., Вахромеев А.Г. Бурение горизонтальных стволов скважин в сложных карбонатных коллекторах с низкими градиентами пластового давления углеводородных систем: учеб. пособие. М. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2020. 240 с.



пластам-коллекторам на этапе геологоразведочных работ, мы решаем проблему сохранения естественной (улучшенной) проницаемости ПЗП в области перепада давлений, приводящих к деформации. Так, в зону рентабельности возвращаются значительные запасы нефти и газа [5], а область некачественной (искаженной) кривой продуктивности переходит в область качественных результатов [1, 3, 4].

Одно из практических решений [1, 5] сегодня – бурение газонагнетательных скважин для поддержания пластового давления. Теоретически доказано, что нижний предел (оптимальная депрессия для добывающих скважин), после которого необходимо вводить систему поддержания пластового давления, составляет 0,3–0,5 МПа [5]. Другое известное решение – воздействие гидроразрыва пласта, когда решается комплекс задач кратного увеличения дебита пласта / скважины по нефти (флюиду), растет рентабельность разработки месторождения. Однако гидроразрыв пласта – это отдельный, самостоятельный цикл работ на нефтегазовой скважине с привлечением специальных подрядных организаций, техники, специалистов. Цикл его весьма затратный, алгоритмы и технологические решения в нем наработаны и постоянно модифицируются.

### Результаты исследования и их обсуждение

Авторы предложили и запатентовали серию новых технических решений для закрепления естественных проницаемых трещин сразу, в процессе первичного вскрытия пласта-коллектора бурением применительно к трещинному резервуару. Главная задача запатентованных решений состоит в сохранении проницаемости трещинной системы в области ПЗП при воздействии сжимающих напряжений (массива горных пород), возрастающих с формированием воронки депрессии, в первую очередь в ПЗП при росте

депрессии  $\Delta P$  выше критических значений. Такой областью является ПЗП в радиусе первых метров вокруг скважины, вскрывшей трещинный пласт-коллектор<sup>4</sup>.

Все решения опираются на опережающее (до создания депрессии на пласт) закрепление естественных фильтрующих трещин в проницаемой части пласта-коллектора природных резервуаров в ПЗП и «работают» для систем как с аномально низким, так и с аномально высоким пластовым давлением. Закрепления периодически выполняют проппантом по аналогии с технологией гидроразрыва пласта<sup>5</sup> до очистки ПЗП от фильтрата бурового раствора. Это позволяет исключить в дальнейшем необратимое смыкание фильтрующих трещин на этапах очистки пласта и испытания (разведочная скважина) или очистки и освоения (эксплуатационная скважина), то есть скважинной добычи жидкого или газообразного полезного ископаемого при создании первой и последующих депрессий на флюидную систему и продуктивный пласт-коллектор.

### Заключение

Практика показала, что посредством инновационных решений<sup>6</sup> [17–19, 20] через опережающее закрепление проницаемых трещин в ПЗП (флюидопроявляющего нефтегазонасного, рапоносного) в открытом (исходном природном) состоянии обеспечивается сохранение естественной проницаемости природных фильтрующих трещин пласта-коллектора с пластовым давлением флюидной системы от аномально низкого до аномально высокого. Это обеспечивает постоянство проницаемости трещинной фильтрационной системы на протяжении циклов очистки ПЗП от бурового раствора, получение истинных расчетных гидродинамических параметров по результатам испытания скважины на режимах «методом установившихся отборов» и стабилизацию дебита (продуктивности) при дальнейшей эксплуатации скважины.

<sup>4</sup> Мальцев Н.В. Разработка физико-математической модели процесса освоения скважин с помощью УЭЦН: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. М., 2013. 21 с.

<sup>5</sup> Усачев П.М. Гидравлический разрыв пласта: учеб. пособие. М.: Недра, 1986. 165 с.

<sup>6</sup> Мальцев Н.В. Разработка физико-математической модели процесса освоения скважин с помощью УЭЦН: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. М.: ИПНГ РАН, 2013. 21 с.

**Список литературы**

1. Белонин М.Д., Славин В.И., Чилингар Д.В. Аномально высокие пластовые давления. Происхождение, прогноз, проблемы освоения залежей углеводородов. СПб.: Недра, 2005. 324 с.
2. Бореvский Л.В. Анализ влияния физических деформаций коллекторов на оценку эксплуатационных запасов подземных вод в глубоких водоносных горизонтах // Методы изучения и оценка ресурсов глубоких подземных вод / ред. С.С. Бондаренко, Г.С. Вартанян. М.: Недра, 1986. С. 374–395.
3. Вахромеев А.Г., Иванишин В.М., Сверкунов С.А., Поляков В.Н., Разяпов Р.К. Глубокая скважина как стенд гидравлических «on-line» исследований напряженного состояния горного массива флюидонасыщенных трещинных коллекторов // Геодинамика и тектонофизика. 2019. Т. 10. № 3. С. 761–778. <https://doi.org/10.5800/GT-2019-10-3-0440>
4. Вахромеев А.Г., Сверкунов С.А., Иванишин В.М., Ильин А.И. Бурение скважин на нефть и газ в сложных горно-геологических условиях: трещинные природные резервуары, АНПД и АВПД пластовых флюидных систем: монография. Иркутск: Изд-во ИРННТУ, 2019. 420 с.
5. Кашников Ю.А., Гладышев С.В., Разяпов Р.К., Конторович А.А., Красильникова Н.Б. Гидродинамическое моделирование первоочередного участка разработки Юрубченко-Тохомского месторождения с учетом гидродинамического эффекта смыкания трещин // Нефтяное хозяйство. 2011. № 4. С. 104–107.
6. Фукс Б.А., Ващенко В.А., Москальц А.Г. Промысловая характеристика продуктивных пластов юга Сибирской платформы. М.: Недра, 1982. 184 с.
7. Aurton S. High fluid pressure, isothermal surfaces and initiation nappe movement // *Geology*. 1980. Vol. 8. Iss. 4. P. 172–174. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1980\)8<172:HFPISA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1980)8<172:HFPISA>2.0.CO;2)
8. Barton N.R., Bandis S., Bakhtar K. Strength, deformation and conductivity coupling of rock joints // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 1985. Vol. 22. Iss. 3. P. 121–140. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(85\)93227-9](https://doi.org/10.1016/0148-9062(85)93227-9)
9. Blanton T.L. Propagation of hydraulically and dynamically induced fractures in naturally fractured reservoirs // SPE 15261, Presented at the SPE/DOE Unconventional Gas Technology Symposium. Louisville, 1986.
10. Butts Ch. Fensters in the Cumberland overthrust block in Southwestern Virginia // *Virginia Geological Survey Bulletin*. 1927. Vol. 28. P. 1–12.
11. Chilingar G.V., Serebryakov V.A., Robertson Jr. J.O. Origin and prediction of abnormal formation pressures. Oxford: Elsevier: 2002. 391 p.
12. De Paor D.G. Balanced section in thrust belts. Part 1: Construction // *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*. 1988. Vol. 72. Iss. 1. P. 73–90. <https://doi.org/10.1306/703C81CD-1707-11D7-8645000102C1865D>
13. Fertl W.H., Chapman R.E., Hotz R.F. Studies in abnormal pressures // *Developments in Petroleum Science*. Vol. 38. Oxford: Elsevier, 1994. 454 p.
14. Hoek E., Carranza-Torres C., Corkum B. Hoek-Brown failure criterion // *Proceedings of the 5<sup>th</sup> North American Rock Mechanics Symposium*. Toronto, 2002. P. 267–273.
15. Hubbert M.K., Rubey W.W. Role of fluid pressure in mechanics of overthrust faulting: I. Mechanics of fluid-filled porous solids and its application to overthrust faulting // *Geological Society of America Bulletin*. 1959. Vol. 70. Iss. 2. P. 115–166. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1959\)70\[115:ROFPIM\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1959)70[115:ROFPIM]2.0.CO;2)
16. Jennings Jr. A.R. Hydraulic fracturing applications. PE Enhanced Well Stimulation, Inc., 2003. 168 p.
17. Пат. № 2602437, Российская Федерация, RU 2 602 437 С1. Способ первичного вскрытия бурением горизонтального ствола в трещинном типе нефтегазоносного карбонатного коллектора в условиях аномально низких пластовых давлений / А.Г. Вахромеев, С.А. Сверкунов, В.М. Иванишин, Р.У. Сираев, Р.К. Разяпов, А.К. Сотников [и др.]. Заявл.: 11.09.2015; опубл. 20.11.2016. Бюл. № 32.
18. Пат. № 2657052, Российская Федерация, RU 2 657 052 С1. Способ испытания и освоения флюидонасыщенного пласта-коллектора трещинного типа (варианты) / В.М. Иванишин, А.Г. Вахромеев, С.А. Сверкунов, Сираев Р.У., Горлов И.В., Ланкин Ю.К. Заявл. 21.04.2017; опубл. 08.06.2018. Бюл. № 16.
19. Пат. № 2740630, Российская Федерация, RU 2 740 630 С1. Способ снижения избыточной упругой энергии в глубинных сейсмоопасных сегментах разломов / В.В. Ружич, А.Г. Вахромеев, С.А. Сверкунов, Шилько Е.В., Иванишин В.М., Акчурин Р.Х. Заявл. 02.06.2020; опубл. 18.01.2021. Бюл. № 2.
20. Акчурин Р.Х., Бурмистров И.А., Вахромеев А.Г., Данилова Е.М., Иванишин В.М., Лебедев Л.С. [и др.]. Технология и геологическое сопровождение кустового горизонтального бурения нефтедобывающих скважин в сложных карбонатных коллекторах рифея Юрубченко-Тохомского нефтегазоконденсатного месторождения: монография. Иркутск: Изд-во ИРННТУ, 2016. 224 с.

**References**

1. Belonin MD, Slavin VI, Chilingar DV. *Abnormally high reservoir pressures. Origin, forecast, development problems of hydrocarbon deposits*. Saint Petersburg: Nedra; 2005. 324 p. (In Russ.)
2. Borevskii LV. Analysis of the effect of reservoir physical deformations on the assessment of operational groundwater reserves in deep aquifers. In: Bondarenko SS, Vartanyan GS (eds.). *Metody izucheniya i otsenka resursov glubokikh podzemnykh vod = Research methods and assessment of deep groundwater resources*. Moscow: Nedra; 1986. p.374–395. (In Russ.)
3. Vakhromeev AG, Ivanishin VM, Sverkunov SA, Polyakov VN, Razyapov RK. Deep well as a facility for on-line hydraulic studies of the stress state of the rock mass in fluid-saturated fractured reservoirs. *Geodinamika i tektonofizika = Geodynamics & Tectonophysics*. 2019;10(3):761–



778. (In Russ.) <https://doi.org/10.5800/GT-2019-10-3-0440>

4. Vakhromeev AG, Sverkunov SA, Ivanishin VM, Il'in AI. *Drilling of oil and gas wells in complex mining and geological conditions: fractured natural reservoirs, abnormally low and abnormally high pressure of reservoir fluid systems*. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2019. 420 p. (In Russ.)

5. Kashnikov YuA, Gladyshev SV, Ryazapov RK, Kontorovich AA, Krasilnikova NB. Hydrodynamical modeling of first-priority area in development of Yurubcheno-Tokhomskoye oilfield, with a glance of geomechanical effect of closing the fracture. *Neftyanoe khozyaistvo*. 2011;4:104–107. (In Russ.)

6. Fuks BA, Vashchenko VA, Moskal'ts AG. *Production characteristics of productive reservoirs in the south of the Siberian platform*. Moscow: Nedra; 1982. 184 p. (In Russ.)

7. Aurton S. High fluid pressure, isothermal surfaces and initiation nappe movement. *Geology*. 1980;8(4):172–174. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1980\)8<172:HFPISA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1980)8<172:HFPISA>2.0.CO;2)

8. Barton NR, Bandis S, Bakhtar K. Strength, deformation and conductivity coupling of rock joints. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 1985;22(3):121–140. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(85\)93227-9](https://doi.org/10.1016/0148-9062(85)93227-9)

9. Blanton TL. Propagation of hydraulically and dynamically induced fractures in naturally fractured reservoirs. *SPE 15261, Presented at the SPE/DOE Unconventional Gas Technology Symposium*. Louisville; 1986.

10. Butts Ch. Fensters in the Cumberland overthrust block in Southwestern Virginia. *Virginia Geological Survey Bulletin*. 1927;28:1–12.

11. Chilingar GV, Serebryakov VA, Robertson JO. *Origin and prediction of abnormal formation pressures*. Oxford: Elsevier; 2002. 391 p.

12. De Paor DG. Balanced section in thrust belts. Part 1: Construction. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*. 1988;72(1):73–90. <https://doi.org/>

10.1306/703C81CD-1707-11D7-8645000102C1865D

13. Fertl WH, Chapman RE, Hotz RF. Studies in abnormal pressures. In: *Developments in Petroleum Science*. Vol. 38. Oxford: Elsevier; 1994. 452 p.

14. Hoek E, Carranza-Torres C, Corkum B. Hoek-Brown failure criterion. In: *Proceedings of the 5<sup>th</sup> North American Rock Mechanics Symposium*. Toronto; 2002. p.267–273.

15. Hubbert MK, Rubey WW. Role of fluid pressure in mechanics of overthrust faulting: I. Mechanics of fluid-filled porous solids and its application to overthrust faulting. *Geological Society of America Bulletin*. 1959;70(2):115–166. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1959\)70\[115:ROFPIM\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1959)70[115:ROFPIM]2.0.CO;2)

16. Jennings AR. *Hydraulic fracturing applications*. PE Enhanced Well Stimulation, Inc.; 2003. 168 p.

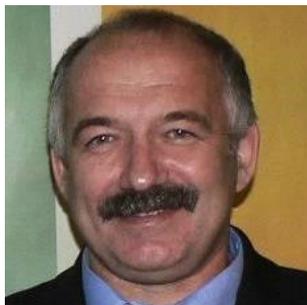
17. Vakhromeev AG, Sverkunov SA, Ivanishin VM, Si-raev RU, Razzapov RK, Sotnikov AK, et al. *Method for primary opening by drilling of horizontal shaft in fracture type of oil and gas saturated carbonate reservoir under conditions of abnormally low formation pressures*. Patent RF, no. 2602437; 2016. (In Russ.)

18. Ivanishin VM, Vakhromeev AG, Sverkunov SA, Si-raev RU, Gorlov IV, Lankin YK. *Method of testing and conversion of fluid-saturated fracture reservoir bed (variants)*. Patent RF, no. 2657052; 2018. (In Russ.)

19. Ruzhich VV, Vakhromeev AG, Sverkunov SA, Shilko EV, Ivanishin VM, Akchurin RKh. *Method for reduction of excessive elastic energy in deep seismic dangerous segments of fractures*. Patent RF, no. 2740630; 2021. (In Russ.)

20. Akchurin RKh, Burmistrov IA, Vakhromeev AG, Danilova EM, Ivanishin VM, Lebedev LS, et al. *Technology and geological commercial support of horizontal cluster drilling of oil producing wells in the complex carbonate reservoirs of the Riphean Yurubcheno-Tokhomskoye oil and gas condensate field*. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2016. 224 p. (In Russ.)

#### Сведения об авторах / Information about the authors



##### **Вахромеев Андрей Гелиевич,**

доктор геолого-минералогических наук,  
заведующий Лабораторией геологии нефти и газа,  
Институт земной коры СО РАН,  
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия,  
профессор кафедры нефтегазового дела,  
Институт недропользования,

Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,

✉ e-mail: andrey\_igp@mail.ru

##### **Andrey G. Vakhromeev,**

Dr. Sci. (Geol. & Mineral.),  
Head of the Laboratory of Oil and Gas Geology,  
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
128 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia,

Professor of the Department of Oil and Gas Production,  
Institute of Subsoil Use,

Irkutsk National Research Technical University,  
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,

✉ e-mail: andrey\_igp@mail.ru

**Сверкунов Сергей Александрович,**

кандидат технических наук,  
научный сотрудник Лаборатории геологии нефти и газа,  
Институт земной коры СО РАН,  
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия,  
доцент кафедры нефтегазового дела,  
Институт недропользования,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,

**Sergey A. Sverkunov,**

Cand. Sci. (Eng.),  
Researcher of the Laboratory of Oil and Gas Geology,  
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
128 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia,  
Associate Professor of the Department of Oil and Gas Production,  
Institute of Subsoil Use,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,  
e-mail: dobro\_75@mail.ru

**Акчурин Ренат Хасанович,**

аспирант,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,  
первый заместитель директора (технический директор),  
Иркутский филиал ООО «РН-Бурение»,  
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 257, Россия,  
e-mail: AkchurinRH@ifrnb.ru

**Renat Kh. Akchurin,**

Postgraduate Student,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,  
First Deputy Director (Technical Manager),  
LLC "RN-Drilling", Irkutsk Branch,  
257 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia,  
e-mail: AkchurinRH@ifrnb.ru

**Иванишин Владимир Мирославович,**

аспирант,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,  
директор,  
Иркутский филиал ООО «РН-Бурение»,  
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 257, Россия,  
e-mail: IvanishinVM@ifrnb.ru

**Vladimir M. Ivanishin,**

Postgraduate Student,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,  
Director,  
LLC "RN-Drilling", Irkutsk Branch,  
257 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia,  
e-mail: IvanishinVM@ifrnb.ru

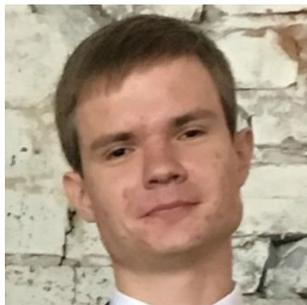


**Ружич Валерий Васильевич,**

доктор геолого-минералогических наук,  
главный научный сотрудник Лаборатории тектонофизики,  
Институт земной коры СО РАН,  
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия,  
e-mail: ruzhich@crust.irk.ru

**Valery V. Ruzhich,**

Dr. Sci. (Geol. & Mineral.),  
Chief Researcher of the Laboratory of Tectonophysics,  
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
128 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia,  
e-mail: ruzhich@crust.irk.ru



**Ташкевич Иван Дмитриевич,**

ведущий инженер Лаборатории геологии нефти и газа,  
Институт земной коры СО РАН,  
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия,  
аспирант,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,  
e-mail: Vantash@mail.ru

**Ivan D. Tashkevich,**

Leading Engineer of the Oil and Gas Laboratory,  
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
128 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia,  
Postgraduate Student,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,  
e-mail: Vantash@mail.ru



**Лисицин Максим Алексеевич,**

главный специалист отдела технологий,  
ООО «Таас-Юрях Нефтегазодобыча»,  
678144, г. Ленск, ул. Первомайская, 32, Россия,  
e-mail: maksimkaboxx@mail.ru

**Maksim A. Lisitsyn,**

Chief Specialist of the Technology Department,  
Taas-Yuryakh Neftegazodobycha LLC,  
32 Pervomaiskaya St., Lensk 678144, Russia,  
e-mail: maksimkaboxx@mail.ru

**Заявленный вклад авторов / Contribution of the authors**

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.  
The authors contributed equally to this article.

**Конфликт интересов / Conflict of interests**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.  
The authors declare no conflicts of interests.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.  
The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.*

**Информация о статье / Information about the article**

Статья поступила в редакцию 10.03.2021; одобрена после рецензирования 11.04.2021; принята к публикации 13.05.2021.

The article was submitted 10.03.2021; approved after reviewing 11.04.2021; accepted for publication 13.05.2021.