

Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2023. Вып. 2 (142). С. 40-51. ISSN 1998-8443 (print)
Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products. 2023. Issue 2 (142). P. 40-51. ISSN 1998-8443 (print)

Научная статья

УДК 622.276.432

doi: 10.17122/ntj-oil-2023-2-40-51

EDN: XVZVPR

МЕТОД ОЦЕНКИ ДЛИНЫ ТЕХНОГЕННОЙ ТРЕЩИНЫ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЗАБОЙНОГО ДАВЛЕНИЯ НАГНЕТАНИЯ

Александр Викторович Сюндюков¹, Дамир Камбирович Сагитов²

^{1,2}Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

¹axaleiger@mail.ru

²sagitovdk@inbox.ru

Автор, ответственный за переписку: Александр Викторович Сюндюков,
axaleiger@mail.ru

Аннотация. Большая часть извлекаемых запасов нефти России представлена трудноизвлекаемыми запасами. Одной из ключевых технологий разработки данных коллекторов является применение системы поддержания пластового давления. Эволюция развития методов управления заводнением не стоит на месте. Сегодня вопрос изучения распространения трещин автоматического гидроразрыва пласта (авто-ГРП) является одним из наиболее важных вызовов. Со временем, по мере перехода к разработке зон с низкими значениями проницаемости и увеличением забойного давления в нагнетательных скважинах, проявление эффекта авто-ГРП стало носить массовый характер. Это подтверждалось не только динамикой обводненности продукции при увеличении приемистости соседних нагнетательных скважин, но и гидродинамическими исследованиями скважин (ГДИС), трассерными исследованиями, адаптацией гидродинамической модели с учетом трещин авто-ГРП.

По результатам исследований геомеханических свойств на месторождениях Западной Сибири было установлено направление регионально напряженного состояния, которое совпадает с азимутальным направлением развития трещин авто-ГРП. Современные системы разработки учитывают направление регионально напряженного состояния. Данные системы преимущественно расположены параллельно трещинам авто-ГРП для исключения прорывов от нагнетательных скважин к добывающим скважинам.

Оценка параметров трещин авто-ГРП в зависимости от режимов нагнетания является актуальной задачей, требующей создания соответствующих методик расчета. Контроль режима заводнения по группе нагнетательных скважин в условиях критических забойных давлений, превышающих величину давления разрыва горной породы, является целью данной работы. Предложен метод оценки параметров техногенных трещин авто-ГРП от заданных исходных параметров.

Ключевые слова: трещина авто-ГРП, низкопроницаемый коллектор, заводнение, система поддержания пластового давления, горизонтальная скважина, забойное давление, пластовое давление, полудлина трещины

Для цитирования: Сюндюков А. В., Сагитов Д. К. Метод оценки длины техногенной трещины в зависимости от забойного давления нагнетания // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2023. Вып. 2 (142). С. 40-51. <http://doi.10.17122/ntj-oil-2023-2-40-51>.

Original article

METHOD FOR ESTIMATING THE LENGTH OF MAN-CAUSED FRACTURE DEPENDING ON BOTTOMHOLE INJECTION PRESSURE

Alexander V. Syundyukov¹, Damir K. Sagitov²

^{1, 2}Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

¹axaleiger@mail.ru

²sagitovdk@inbox.ru

Corresponding author: Alexander V. Syundyukov, axaleiger@mail.ru

Abstract. Most of Russia's recoverable oil reserves are hard-to-recover reserves. One of the key technologies for the development of these reservoirs is the use of a reservoir pressure maintenance system. The evolution of the development of flood control methods does not stand still. Today, the issue of studying the propagation of self-induced hydraulic fracturing cracks is one of the most important challenges. Over time, as the transition to the development of zones with low permeability values and an increase in down hole pressure in injection wells, the manifestation of the self-induced hy-

draulic fracturing effect began to be widespread. This was confirmed not only by the dynamics of the water content of products with an increase in the pick-up of neighboring injection wells, but also by hydrodynamic studies of wells, tracer studies, adaptation of the hydrodynamic model taking into account the cracks of the self-induced hydraulic fracturing. Over time, according to the results of studies of geomechanical properties in the deposits of Western Siberia, the direction of the regionally stressed state was established, which coincides with the azimuthal direction of the development of self-induced hy-

draulic fracturing cracks. Modern development systems take into account the direction of the regional stress state. These systems are mainly located parallel to the cracks of the self-induced hydraulic fracturing to exclude breakthroughs from injection wells to producing wells.

Estimation of the parameters of auto-fracturing fractures depending on the injection

modes is an urgent task that requires the creation of appropriate calculation methods. Control of the waterflood modes for a group of injection wells under conditions of critical bottomhole pressures exceeding the value of the rock fracture pressure is the purpose of this work. A method for estimating the parameters of man-caused fracture from given initial parameters is proposed.

Keywords: induced fracture, low-permeability reservoir, waterflood, water injection system, horizontal well, bottom hole pressure, reservoir pressure, fracture half-length

For citation: Syundyukov A. V., Sagitov D. K. Metod otsenki dliny tekhnogennoy treshchiny v zavisimosti ot zaboynogo davleniya nagnetaniya [Method for Estimating the Length of Man-Caused Fracture Depending on Bottomhole Injection Pressure]. *Problemy sbora, podgotovki i transporta nefi i nefteproduktov - Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products*, 2023, Issue 2 (142), pp. 40-51. <http://doi.10.17122/ntj-oil-2023-2-40-51>.

Подтверждение эффекта автоматического гидроразрыва пласта (авто-ГРП) стало возможным благодаря гидродинамическим исследованиям скважин (ГДИС), адаптации гидродинамической модели с учетом трещин авто-ГРП и анализу динамики обводненности продукции при увеличении приемистости соседних нагнетательных скважин в комплексе с гидропрослушиванием [1].

Обобщение результатов геофизических исследований залежей нескольких соседствующих месторождений позволило определить направление преимущественного регионального напряжения, которое совпадает с направлением азимутального распространения техногенных трещин для месторождений

Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции [2].

Назначение координат проектных точек бурения в настоящее время осуществляется таким образом, чтобы в случае рядной системы размещения скважин галереи скважин располагались вдоль направления распространения регионального стресса. Расположение рядов скважин параллельно развитию трещин авто-ГРП позволяет исключить появление и развитие трещин авто-ГРП от нагнетательных скважин к добывающим скважинам. Задача размещения горизонтальных и наклонно-направленных скважин решается исходя из тех же предположений. При этом учитывается возможность применения в по-

следующем технологии гидроразрыва пласта (рисунок 1).

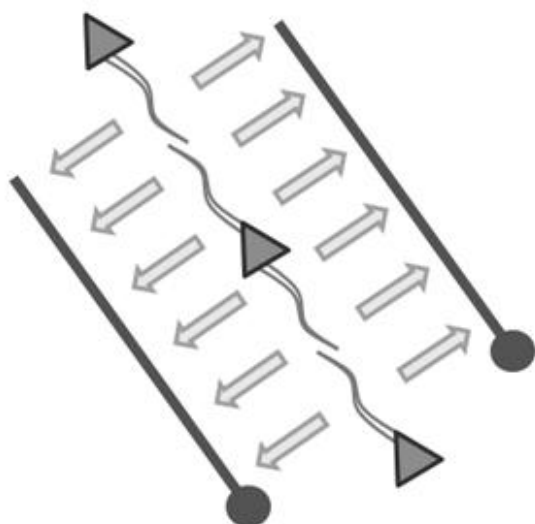


Рисунок 1. Пример ориентации рядов добывающих и нагнетательных скважин с учетом направления регионального стресса

Figure 1. An example of the orientation of rows of production and injection wells, taking into account the direction of regional stress

Эффективность процесса заводнения в искусственно организованных условиях зависит от оптимизации геометрии трещины авто-ГРП, а именно от поддержания заданной полудлины трещины авто-ГРП (X_f), в свою очередь зависящей от забойного давления в нагнетательной скважине ($P_{\text{заб.наг.}}$) [3].

Целью регулирования является образование галереи из взаимосменяющих трещин авто-ГРП, способной обеспечить равномерный охват вытеснением вдоль всего ис-

кусственно сопряженного ряда нагнетательных скважин.

Нарушение баланса полудлин встречающихся трещин может привести как к возникновению застойных зон (нейтрализация потоков), так и к локальному усилению взаимодействия нагнетательных и добывающих скважин по сети дополнительных ответвлений трещин авто-ГРП [4].

Одним из определяющих факторов, влияющим на геометрию создаваемых трещин авто-ГРП, является давление смыкания ($P_{\text{см.}}$). Это – минимальное давление, при котором трещина находится в закрытом состоянии [5]. Давление смыкания трещины авто-ГРП является одним из ключевых факторов, так как оказывает влияние на распространение трещины по коллектору. Данный параметр зависит от текущего пластового давления, при этом распределение поля давления в пласте зачастую носит неравномерный характер, что обуславливает значительные изменения геометрии при развитии техногенной трещины в пласте [6].

Перепад между забойным давлением в нагнетательной скважине и давлением смыкания определяет величину чистого давления (P_{net}) [7]. Трещина авто-ГРП развивается при увеличении чистого давления [8]. Этот процесс фиксируется при интерпретации результатов гидродинамических исследований нагнетательных скважин на установившихся режимах работы.

По части установившихся режимов с ростом забойного давления выше критического значения отмечается отклонение коэффициента приемистости ($K_{\text{пр}}$) в большую сторону (рисунок 2).

Рост приемистости скважины интерпретируется, как появление и увеличение трещины авто-ГРП [9].

Прибегнув к теории Пратса, можно условить, что трещина имеет бесконечную проводимость, а изменение скин-фактора соответствует изменению полудлины трещины (X_f) [10].

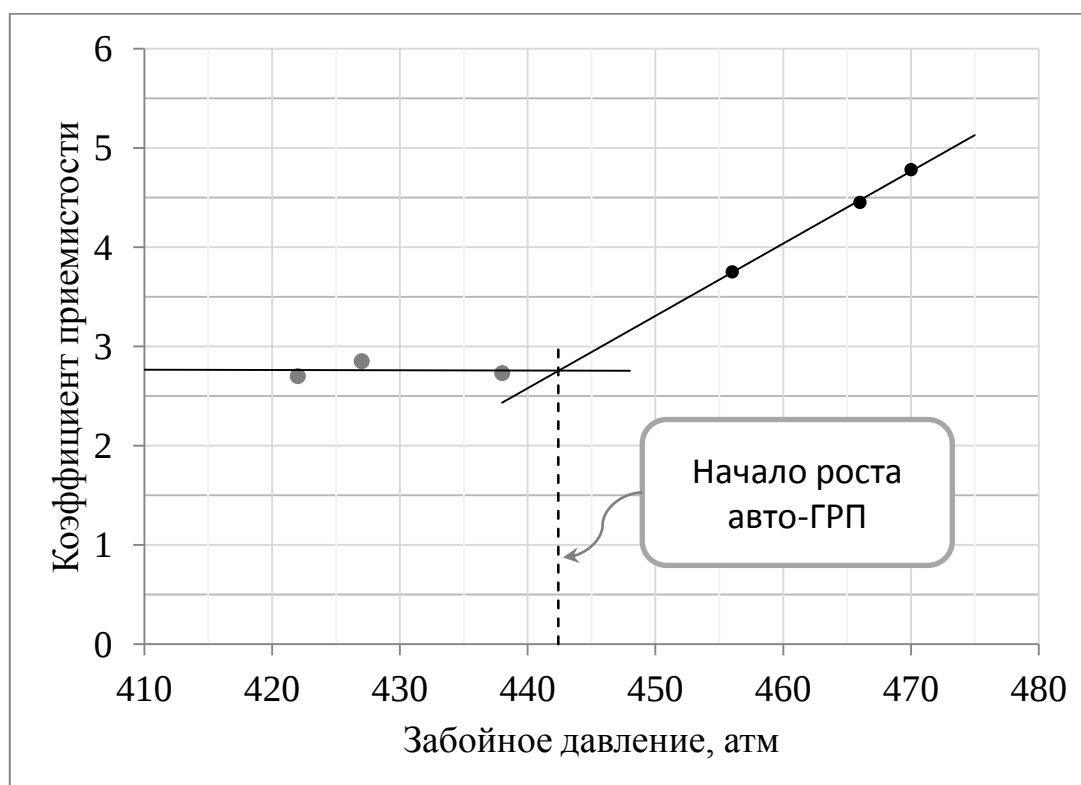


Рисунок 2. График зависимости коэффициента приемистости от забойного давления нагнетания

Figure 2. Graph of dependence of injectivity factor on bottomhole injection pressure

Изменение скин-фактора можно учесть параметром ID, являющимся отношением приемистостей до и после авто-ГРП:

$$ID = \frac{K_{\text{до ГРП}}}{K_{\text{ГРП}}} = \frac{\ln \frac{r_e}{r_w} + S^{\text{ГРП}}}{\ln \frac{r_e}{r_w} + S^{\text{до ГРП}}} ; \quad (1)$$

$$K_{\text{до ГРП}} = \frac{2\pi kh}{\mu} \frac{1}{\ln \frac{r_e}{r_w} + S^{\text{до ГРП}}} ; \quad (2)$$

$$K_{\text{ГРП}} = \frac{2\pi kh}{\mu} \frac{1}{\ln \frac{r_e}{r_w} + S^{\text{ГРП}}} ; \quad (3)$$

$$S^{\text{ГРП}} = -\ln \frac{X_f}{2r_w} ; \quad (4)$$

$$S^{\text{до ГРП}} = -\ln \frac{X_o}{2r_w} , \quad (5)$$

где r_e - радиус контура питания;

r_w - радиус скважины;

$S^{\text{до ГРП}}$ - скин-фактор до момента образования трещины авто-ГРП;

$S^{\text{ГРП}}$ - скин-фактор после образования трещины авто-ГРП;

X_o - параметр, характеризующий величину начальной полудлины трещины нагнетательной скважины;

X_f - полудлина трещины авто-ГРП.

Параметр ID отражает нормированную количественную характеристику роста приемистости при увеличении чистого давления, что позволяет перейти к безразмерному коэффициенту приемистости трещинной системы [11], графическое представление которого представлено рисунке 3.

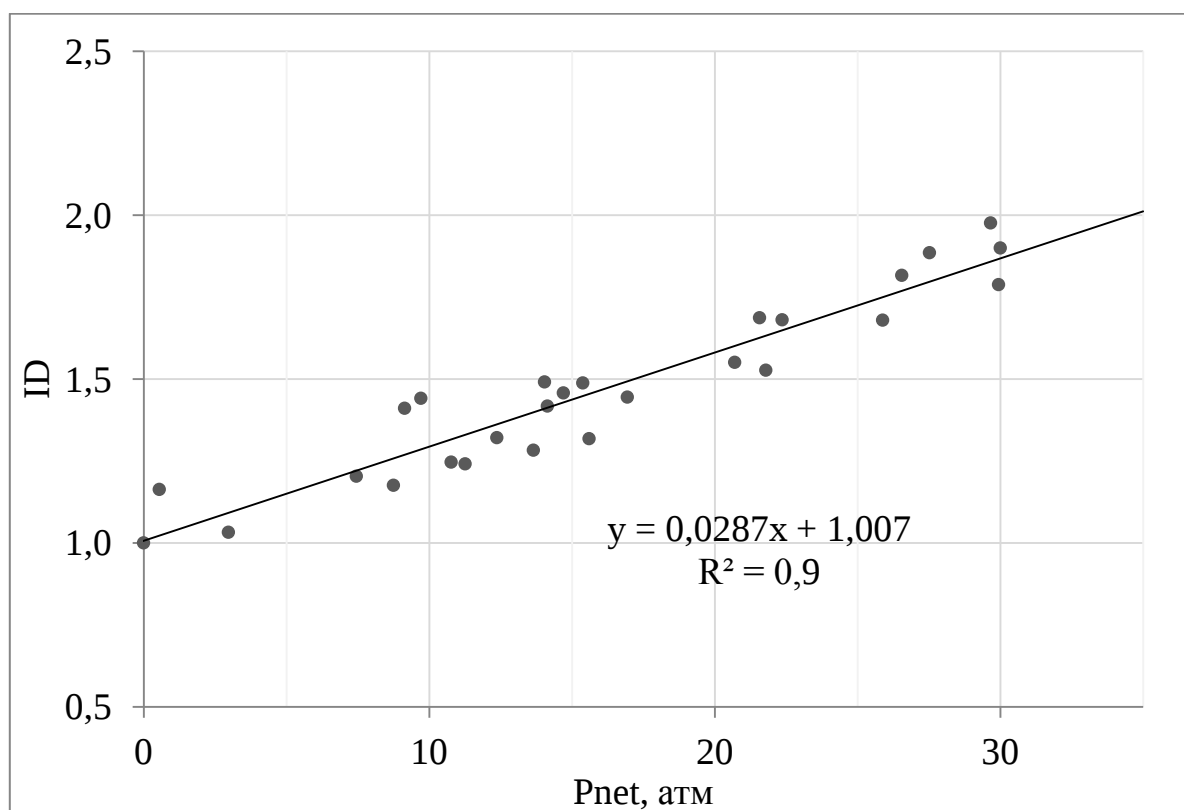


Рисунок 3. Зависимость параметра ID от чистого давления

Figure 3. Dependence of parameter ID on net pressure

Зависимость ID от чистого давления имеет прямо пропорциональный линейный тренд (с постепенным ростом забойного давления линейно увеличивается кратность коэффициента приемистости) [11].

Для перехода к зависимости $X_f = f(P_{net})$ выведем полудлину трещины авто-ГРП (X_f):

$$ID = \frac{\ln \frac{r_e}{r_w} - \ln \frac{x_f}{2r_w}}{\ln \frac{r_e}{r_w} - \ln \frac{x_0}{2r_w}} = \frac{\ln \frac{2r_e}{x_f}}{\ln \frac{2r_e}{x_0}} \quad (6)$$

$$x_f = \frac{2r_e}{e^{\left(\frac{1}{ID} \ln \frac{2r_e}{x_0}\right)}}, \quad (7)$$

где $ID = f(P_{net})$;

$$P_{net} = P_{заб.наг.} - P_{см.}$$

Необходимо отметить, что представленная зависимость применима в случае описания притока в круговом контуре питания, тем не менее, в промысловых реалиях фактический контур питания у эксплуатационных скважин деформирован в соответствии с применяемой расстановкой скважин.

В случае рядной системы разработки с горизонтальными и наклонно-направленными скважинами контур питания имеет не концентричную, а вытянутую деформированную форму, поэтому для расчета зависимостей по

приведенным формулам вводится допущение и используется «эквивалентный» контур питания.

Данное допущение предполагает равенство площадей притока фактической (сложной) и приведённой (круговой) областей дренирования.

В дальнейших выводах используется приведенный (эквивалентный) радиус кругового контура питания.

На образование трещины влияют две составляющие: давление, которое мы создаем на забое скважины (изменяемый параметр), и общая геомеханическая обстановка пласта (совокупность predetermined факторов). Так как образование трещины авто-ГРП в пласте является сложным физическим процессом, зависящим от множества факторов, а по мере распространения техногенная трещина может менять свою геометрию и направление, то аналитическое описание притока к скважине с трещиной авто-ГРП в определенный момент времени является сложной математической задачей.

Одним из допущений определения полудлины трещины авто-ГРП, согласно зависимости (7), является определение эквивалентного радиуса контура питания, в данном случае величина R_k является константной величиной.

Тем не менее, в условиях распространения трещины авто-ГРП в нагнетательной скважине радиус контура питания является динамической величиной (рисунок 4).

На рисунке 4 представлена принципиальная схема динамики деформации эллиптического контура питания скважины при развитии трещины авто-ГРП, где a_1, a_2, a_3, a_4 – большая полуось эллиптического контура питания для случаев с различной полудлиной трещины авто-ГРП $X_{f1}, X_{f2}, X_{f3}, X_{f4}$ соответственно.

Параметр r_e в уравнении (7) характеризует эквивалентный радиус контура питания, который рассчитывается, исходя из допущения о подобии фактической площади притока и «эквивалентной» круговой площади притока (рисунок 5).

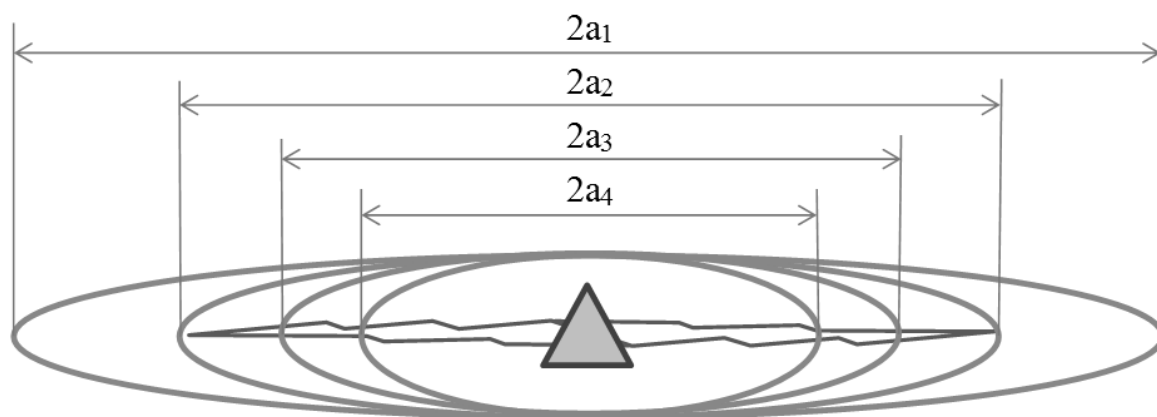


Рисунок 4. Принципиальная схема динамики деформации эллиптического контура питания скважины при развитии трещины авто-ГРП

Figure 4. Schematic diagram of the deformation dynamics of the elliptical well feed contour during the development of an auto-hydraulic fracture

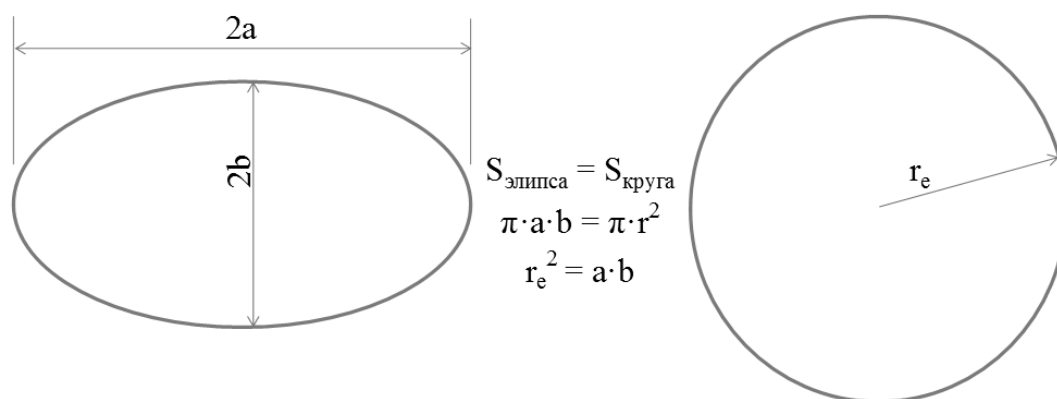


Рисунок 5. Сопоставление эллиптического и радиального контура питания

Figure 5. Comparison of elliptical and radial power circuit

Таким образом, радиус контура питания можно выразить через малую и большую ось эллипса:

$$r_e = \sqrt{ab},$$

где a - большая ось эллиптического контура питания;

b - малая ось эллиптического контура питания (рисунок 5).

При развитии трещины в горной породе наиболее отдаленная часть трещины имеет низкое значение раскрытости и значительно меньшую высоту в сравнении с высотой вблизи точки инициации, поэтому большую полуось эллиптического контура питания можно приравнять полудлине трещины авто-ГРП:

$$r_e = \sqrt{X_f b}. \quad (8)$$

Подставив (8) в выражение (7), получаем:

$$X_f = \frac{2r_e}{e^{\left(\frac{1}{ID} \ln \frac{2r_e}{x_0}\right)}} = \frac{2r_e}{e^{\left(\frac{1}{ID} \ln \frac{2\sqrt{X_f b}}{x_0}\right)}}. \quad (9)$$

Выразим параметр X_f , который находится одновременно в левой и правой частях уравнения. Итоговая авторская формула имеет вид:

$$X_f = \frac{4b}{\left(\frac{4b}{X_0}\right)^{\frac{1}{ID}}}. \quad (10)$$

Описание притока у наклонно-направленной скважины с трещиной можно сравнить с притоком горизонтальной скважины. Одной из наиболее точных и лаконичных формул является формула Борисова [12]. Подставив вместо длины горизонтальной скважины две полудлины трещины авто-ГРП, получим:

$$\frac{p-p_w}{q} = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{\mu}{kh} \right) \left[\ln \left(\frac{4Re}{2X_f} \right) + \frac{h}{2X_f} \cdot \ln \left(\frac{h}{2\pi r_w} \right) \right], \quad (11)$$

где $p-p_w$ - репрессия на пласт, Па;

q - приёмистость скважины, м³;

kh/μ - пьезопроводность, м²/с;

Re - эквивалентный радиус контура питания, м;

h - толщина пласта, м;

r_w - радиус скважины, м.

Радиус контура питания в данной формуле является константой, подставив в формулу (11) вместо R_e значение $\sqrt{X_f b}$, получим модифицированную формулу Борисова для случая переменного размера радиуса контура питания (распространение трещины авто-ГРП):

$$\frac{p-p_w}{q} = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{\mu}{kh} \right) \left[\ln \left(\frac{2\sqrt{X_f b}}{X_f} \right) + \frac{h}{2X_f} \cdot \ln \left(\frac{h}{2\pi r_w} \right) \right], \quad (12)$$

где $X_f = f(P_{net})$ - функция, зависящая от величины чистого давления.

Результаты графического сравнения вычислений по полученным формулам представлены на рисунке 6.

Расчет зависимостей произведен методом множественных итераций.

Анализ зависимостей показал различие базового варианта от авторской формулы менее 1 % (при интегральном сравнении зависимостей).

Величина ошибки в оценке полудлины трещины авто-ГРП при одинаковом P_{net} в 80 атм составляет 0,6 м в абсолютном значении, что является несущественным отличием при прогнозе геометрии техногенной трещины.

Отличие функции, построенной на базе формулы Борисова от базовой функции обусловлено наличием в формуле Борисова составляющей описывающей потери давления на внутреннее фильтрационное сопротивление.

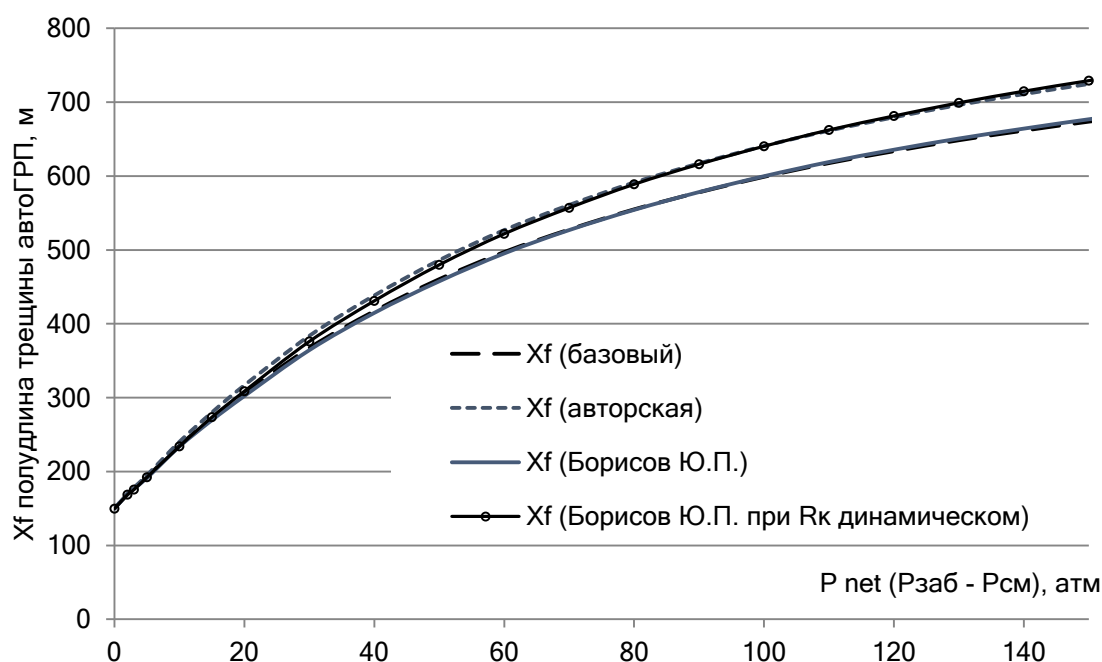


Рисунок 6. Динамика распространения трещины авто-ГРП с использованием различных аналитических зависимостей

Figure 6. Dynamics of auto-fracturing fracture propagation using various analytical dependencies

Выводы

1. Эффективность процесса заводнения в искусственно организованных с учетом распространения регионального стресса условиях зависит от оптимизации геометрии трещины авто-ГРП.

2. Образование галереи из взаимосменяющих трещин авто-ГРП позволяет выравнивать охват вытеснением вдоль всего искусственно сопряженного ряда нагнетательных скважин.

3. Нарушение баланса полудлин встречных трещин может привести как к возникновению застойных зон (нейтрализация потоков), так и к локальному усилению взаимодействия нагнетательных и добывающих скважин по сети дополнительных ответвлений трещин авто-ГРП.

4. Основным инструментом изучения условий появления и закономерностей роста трещины авто-ГРП является гидродинамическое исследование скважин на установившихся режимах закачки.

5. Безразмерный коэффициент приемистости трещинной системы можно учесть через параметр ID, отражающий нормированную количественную характеристику рос-

та приемистости при увеличении чистого давления раскрытия трещины.

6. С постепенным ростом забойного давления линейно увеличивается кратность коэффициента приемистости до и после авто-ГРП.

7. В случае рядной системы разработки с горизонтальными и наклонно-направленными скважинами их контур питания имеет не концентричную, а вытянутую деформированную форму, поэтому вводится параметр - «эквивалентный» контур питания, вычисляемый исходя из равенства площадей областей дренирования.

8. При развитии трещины в горной породе наиболее отдаленная часть трещины имеет низкое значение раскрытости и значительно меньшую высоту в сравнении с высотой вблизи точки инициации, поэтому большую полуось эллиптического контура питания можно приравнять полудлине трещины авто-ГРП.

9. Предложена и сопоставлена с ранее известными выражениями авторская формула расчёта длины техногенной трещины по величине забойного давления с учетом особенностей области дренирования скважины при авто-ГРП.

Список источников

1. Байков В.А., Давлетбаев А.Я., Асмандияров Р.Н., Усманов Т.С., Степанова З.Ю. Специальные гидродинамические исследования для мониторинга за развитием трещин ГРП в нагнетательных скважинах // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2011. № 1. С. 65-75. URL: http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/Baikov/Baikov_1.pdf. (дата обращения: 30.01.2023). EDN: OOVKTБ.

2. Байков В.А., Жданов Р.М., Муллагалиев Т.И., Усманов Т.С. Выбор оптимальной системы разработки для месторождений с низкопроницаемыми коллекторами // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2011. № 1. С. 84-98. URL: http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/Baikov/Baikov_2.pdf. (дата обращения: 30.01.2023). EDN: OOVKTВ.

3. Сюндюков А.В., Хабибуллин Г.И., Трофим-

References

1. Baikov V.A., Davletbaev A.Ya., Asmandiyarov R.N., Usmanov T.S., Stepanova Z.Yu. Spetsial'nye gidrodinamicheskie issledovaniya dlya monitoringa za razvitiem treshchin GRP v nagnetatel'nykh skvazhinakh [Special Well Tests to Fractured Water Injection Wells]. *Elektronnyi nauchnyi zhurnal «Neftegazovoe delo» - Electronic Scientific Journal «Oil and Gas Business»*, 2011, No. 1, pp. 65-75. URL: http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/Baikov/Baikov_1.pdf. (accessed 30.01.2023). EDN: OOVKTБ. [in Russian].

2. Baikov V.A., Zhdanov R.M., Mullagaliev T.I., Usmanov T.S. Vybor optimal'noi sistemy razrabotki dlya mestorozhdenii s nizkopronitsaemymi kollektorami [Selecting the Optimal System Design for the Fields with Low-Permeability Reservoirs]. *Elektronnyi nauchnyi zhurnal «Neftegazovoe delo» - Electronic Scientific Journal «Oil and Gas Business»*,

чук А.С., Сагитов Д.К. Методика поддержания оптимальной геометрии техногенной трещины путем регулирования закачки в низкопроницаемые коллекторы // Нефтяное хозяйство. 2022. № 9. С. 96-99. DOI: 10.24887/0028-2448-2022-9-96-99. EDN: VAURWI.

4. Астафьев В.И., Федорченко Г.Д. Моделирование фильтрации жидкости при наличии трещины гидравлического разрыва пласта // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физико-математические науки. 2007. Вып. 2 (15). С. 128-132. EDN: INTMHZ.

5. Зазовский А.Ф., Тодуа Г.Т. О стационарном притоке жидкости к скважине с вертикальной трещиной гидроразрыва большой протяженности // Известия АН СССР. Механика жидкости и газа. 1990. Вып. 4. С. 107-116.

6. Santarelli F.J., Havmoller O., Naumann M. Geomechanical Aspects of 15 Years Water Injection on a Field Complex: An Analysis of the Past to Plan the Future // Materials of SPE North Africa Technical Conference and Exhibition. Marrakech, Morocco. 2008. Paper No. SPE-112944-MS. DOI: 10.2118/112944-MS.

7. Давлетбаев А.Я., Асалхузина Г.Ф., Иващенко Д.С., Федоров А.И., Фурсов Г.А., Назаргалин Э.Р., Слабейский А.А., Сергейчев А.В., Ямалов И.Р., Валева Э.З. Гидродинамические методы контроля за развитием трещин авто-ГРП при заводнении в низкопроницаемых коллекторах // Materials of SPE Russian Petroleum Technology Conference. Moscow, Russia. 2015. Paper No. SPE-176562-MS. DOI: 10.2118/176562-MS.

8. Borges M.F., Antunes F.V., Prates P.A., Branco R., Vojtek T. Effect of Young's Modulus on Fatigue Crack Growth // International Journal of Fatigue. 2020. Vol. 132. Article No. 105375. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2019.105375.

9. Тримонова М.А., Дубиня Н.В. Основные закономерности развития трещины авто-ГРП // Materials of SPE Russian Petroleum Technology Conference, Moscow, Russia. 2015. Paper No. SPE-176638-MS. DOI: 10.2118/176638-MS.

10. Prats M. Effect of Vertical Fractures on Reservoir Behavior-Incompressible Fluid Case // Society of Petroleum Engineers Journal. 1961. Vol. 1. Issue 2. P. 105-118. DOI: 10.2118/1575-G.

11. Сюндюков А.В., Хабибуллин Г.И., Трофимчук А.С., Шайхатдаров Д.Р., Сагитов Д.К. Методика управления заводнением на месторождениях с ТПИЗ // Materials of SPE Russian Petroleum Technology Conference. Virtual. 2021. Paper No. SPE-206408-MS. DOI: 10.2118/206408-MS.

12. Борисов Ю.П., Пилатовский В.П., Табачков В.П. Разработка нефтяных месторождений горизонтальными и многозабойными скважинами. М.: Недра, 1964. 154 с.

2011, No. 1, pp. 84-98. URL: http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/Baikov/Baikov_2.pdf. (accessed 30.01.2023). EDN: OOVKTV. [in Russian].

3. Syundyukov A.V., Khabibullin G.I., Trofimchuk A.S., Sagitov D.K. Metodika podderzhaniya optimal'noi geometrii tekhnogennoi treshchiny putem regulirovaniya zakachki v nizkopronitsaemye kollektory [A Method for Maintaining the Optimal Geometry of Induced Fracture by Regulating the Injection Mode on Low-Permeability Reservoirs]. *Neftyanoe khozyaistvo - Petroleum Engineering*, 2022, No. 9, pp. 96-99. DOI: 10.24887/0028-2448-2022-9-96-99. EDN: VAURWI. [in Russian].

4. Astafev V.I., Fedorchenko G.D. Modelirovanie fil'tratsii zhidkosti pri nalichii treshchiny gidravlicheskogo razryva plasta [Modeling Fluid Filtration in the Presence of a Hydraulic Fracture]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Fiziko-matematicheskie nauki - Journal of Samara State Technical University. Ser. Physical and Mathematical Sciences*, 2007, Issue 2 (15), pp. 128-132. EDN: INTMHZ. [in Russian].

5. Zazovskii A.F., Todua G.T. O statsionarnom pritoke zhidkosti k skvazhine s vertikal'noi treshchinoi gidrorazryva bol'shoi protyazhennosti [On stationary Fluid Inflow to a Well with a Long Vertical Hydraulic Fracture]. *Izvestiya AN SSSR. Mekhanika zhidkosti i gaza - Proceedings of the Academy of Sciences of the USSR. Fluid and gas mechanics*, 1990, Issue 4, pp. 107-116. [in Russian].

6. Santarelli F.J., Havmoller O., Naumann M. Geomechanical Aspects of 15 Years Water Injection on a Field Complex: An Analysis of the Past to Plan the Future. *Materials of SPE North Africa Technical Conference and Exhibition*. Marrakech, Morocco, 2008, Paper No. SPE-112944-MS. DOI: 10.2118/112944-MS.

7. Davletbaev A.Ya., Asalkhuzina G.F., Ivashchenko D.S., Fedorov A.I., Fursov G.A., Nazargalin E.R., Slabetskii A.A., Sergeichev A.V., Yamalov I.R., Valeeva E.Z. Gidrodinamicheskie metody kontrolya za razvitiem treshchin avto-GRP pri zavodnenii v nizkopronitsaemykh kollektorakh [Methods of Research for the Development of Spontaneous Growth of Induced Fractures During Flooding in Low Permeability Reservoirs]. *Materials of SPE Russian Petroleum Technology Conference*. Moscow, Russia, 2015, Paper No. SPE-176562-MS. DOI: 10.2118/176562-MS. [in Russian].

8. Borges M.F., Antunes F.V., Prates P.A., Branco R., Vojtek T. Effect of Young's Modulus on Fatigue Crack Growth. *International Journal of Fatigue*, 2020, Vol. 132, Article No. 105375. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2019.105375.

9. Trimonova M.A., Dubinya N.V. Osnovnye zakonomernosti razvitiya treshchiny avto-GRP [The Main Tendencies of Water-Induced Hydraulic Fracture Propagation]. *Materials of SPE Russian Petroleum Technology Conference*, Moscow, Russia. 2015. Paper No. SPE-176638-MS. DOI: 10.2118/176638-

MS. [in Russian].

10. Prats M. Effect of Vertical Fractures on Reservoir Behavior-Incompressible Fluid Case. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1961, Vol. 1, Issue 2, pp. 105-118. DOI: 10.2118/1575-G.

11. Syundyukov A.V., Khabibullin G.I., Trofimchuk A.S., Shaikhatdarov D.R., Sagitov D.K. Metodika upravleniya zavodneniem na mestorozhdeniyakh s TRIZ [Flood Control Method in Fields with Hard-To-Recover Reserves]. *Materials of SPE Russian Petroleum Technology Conference*, Virtual, 2021, Paper No. SPE-206408-MS. DOI: 10.2118/206408-MS. [in Russian].

12. Borisov Yu.P., Pilatovskii V.P., Tabakov V.P. *Razrabotka neftyanykh mestorozhdenii gorizont'al'nykh i mnogoazobnykh skvazhinami* [Development of Oil Fields by Horizontal and Multilateral Wells]. Moscow, Nedra Publ., 1964. 154 p. [in Russian].

Информация об авторах

• Сюндыков Александр Викторович
Уфимский государственный нефтяной
технический университет
Аспирант кафедры «Разработка и эксплуатация
нефтяных и газонефтяных месторождений»
Россия, 450064, Уфа, ул. Космонавтов, 1
e-mail: axaleiger@mail.ru

• Сагитов Дамир Камбирович, доктор технических
наук, доцент
Уфимский государственный нефтяной
технический университет
Профессор кафедры «Разработка и эксплуатация
нефтяных и газонефтяных месторождений»
Россия, 450064, Уфа, ул. Космонавтов, 1
e-mail: sagitovdk@inbox.ru

Information about the authors

• Syundyukov Aleksandr V.
Ufa State Petroleum Technological University
Post-graduate Student of Oil and Gas & Oil Fields
Development and Operation Department
1, Kosmonavtov str., Ufa, 450064, Russia
e-mail: axaleiger@mail.ru

• Sagitov Damir K., Doctor of Engineering Sciences,
Associated Professor
Ufa State Petroleum Technological University
Professor of Oil and Gas & Oil Fields
Development and Operation Department
1, Kosmonavtov str., Ufa, 450064, Russia
e-mail: sagitovdk@inbox.ru

Статья поступила в редакцию 09.01.2023; одобрена после рецензирования 26.01.2023; принята к публикации 01.03.2023.

The article was submitted 09.01.2023; approved after reviewing 26.01.2023; accepted for publication 01.03.2023.