DOI: https://doi.org/10.25689/NP.2021.2.31-42

УДК 622.24.026.3

Определение величины максимального горизонтального напряжения для терригенных коллекторов Ромашкинского месторождения

Гирфанов И.И.

Институт «ТатНИПИнефть», Бугульма, Россия

Determination of maximum horizontal stress for terrigenous reservoirs of the Romashkinskoye field

I.I. Girfanov

TatNIPIneft Institute, Bugulma, Russia

E-mail: gii@tatnipi.ru

Аннотация. Напряженное состояние массива горных пород описывается тремя величинами – вертикальным горным и горизонтальными главными минимальным и максимальным напряжениями. Наиболее затруднительным является определение величины максимального горизонтального напряжения, являющегося промежуточным между минимальным горизонтальным и вертикальным горным напряжениями. Существующие методы определения величины максимального горизонтального напряжения не всегда подходят, так как зачастую нет необходимых исходных данных для расчётов, например, не проводятся дорогостоящие исследования в открытом стволе, которые даже при их проведении не дают гарантированного получения требуемого результата. В работе рассмотрена применимость существующих методик расчёта максимального горизонтального напряжения. Предложены методики расчёта максимального горизонтального напряжения при наличии данных о действующем вертикальном горном напряжении, минимальном горизонтальном напряжении и коэффициенте Пуассона. До настоящего времени не давалась систематизированная оценка действующих максимальных горизонтальных напряжений и не разработаны методы их расчёта для условий Ромашкинского месторождения.

Ключевые слова: *максимальное горизонтальное напряжение, расчёт горизонтального напряжения, напряженное состояние, минимальное горизонтальное напряжение, коэффициент Пуассона, соотношение горизонтальных напряжений, нормальный режим напряжений, контраст напряжений, Ромашкинское месторождение*

Для цитирования: Гирфанов И.И. Определение величины максимального горизонтального напряжения для терригенных коллекторов Ромашкинского месторождения//Нефтяная провинция.-2021.-№2(26).-С.31-42. DOI https://doi.org/10.25689/NP.2021.2.31-42

© Гирфанов И.И., 2021

Abstract. The in-situ stress state of rock mass is described via three principal stresses; particularly, the vertical overburden stress and minimum and maximum horizontal stresses. Determination of maximum horizontal stress which is the intermediate between minimum horizontal stress and vertical overburden stress is the most challenging. Available methods to determine the magnitude of maximum horizontal stress are not always applicable due to deficiency of initial data required for estimates. For example, expensive open hole tests are often eliminated. Even when conducted, these tests do not always yield appropriate results. The paper considers the applicability of existing methods for estimation of maximum horizontal stress. Methods for estimation of maximum horizontal stress based on available data on vertical overburden stress, minimum horizontal stress and Poisson's ratio are proposed. Thus far, a systematic assessment of maximum effective horizontal stresses has never been made and no methods of stress determination have been developed for the conditions of the Romashkinskoye field.

Key words: *maximum horizontal stress, methods for estimation of horizontal stress, stress state, minimum horizontal stress, Poisson ratio, horizontal stress ratio, normal faulting regime, stress contrast, Romashkinskoye field*

For citation: I.I. Girfanov Opredelenie velichiny maksimal'nogo gorizontal'nogo naprjazhenija dlja terrigennyh kollektorov Romashkinskogo mestorozhdenija [Determination of maximum horizontal stress for terrigenous reservoirs of the Romashkinskoye field]. Neftyanaya Provintsiya, No. 2(26), 2021. pp. 31-42. DOI https://doi.org/10.25689/NP.2021.2.31-42 (in Russian)

Терригенные отложения Ромашкинского месторождения, представленные кыновским и пашийским горизонтами, находятся на поздней стадии разработки. Дальнейшее поддержание рентабельности разработки объектов с высокой степенью выработки требует оптимизации затрат и повышения качества исходных данных, используемых при проектировании строительства скважин и проводимых геолого-технических мероприятий. В число современных технологий, применяемых для обеспечения эффективности процесса разработки, входит геомеханика.

Напряженное состояние массива горных пород описывается тремя величинами напряжений – вертикальным горным и горизонтальными главными минимальным и максимальным напряжениями. Горное напряжение S_V возможно оценить по данным плотности горных пород, минимальное горизонтальное напряжение S_h – по данным анализа давлений при гидроразрыве пласта и различным аналитическим решениям. Наиболее затруднительным является определение величины максимального горизон-

тального напряжения S_H, являющегося промежуточным между минимальным горизонтальным и вертикальным горным напряжениями при нормальном режиме напряжений ($S_V > S_H > S_h$). Построение качественных геомеханических моделей требует определения значений всех действующих напряжений. Точный расчёт окна бурового раствора необходим для снижения непроизводительного времени при бурении, возникающего по причине поглощений, обрушения стенок скважины и приводящего к удорожанию стоимости бурения скважин. Для снижения затрат при бурении скважин на Ромашкинском месторождении требуется определение зависимостей, позволяющих рассчитывать региональные напряжения наиболее доступным способом. Существующие методы не всегда подходят из-за того, что зачастую нет необходимых исходных данных для расчётов, например, не проводятся дорогостоящие исследования, в открытом стволе которые даже при их проведении не дают гарантированного получения требуемого результата. До настоящего времени не давалась систематизированная оценка действующих максимальных горизонтальных напряжений и не разработаны методы их расчёта для условий Ромашкинского месторождения.

Определение величины S_H [1, 2] возможно на основе данных, получаемых по результатам анализа записи давления в процессе ГРП и данных о пластовом давлении (Рис. 1):

$$S_H = 3S_h - P_b - P_p + T_0 \,, \qquad (1)$$

где S_h –минимальное горизонтальное напряжение, МПа;

P_b – давление разрыва породы, МПа;

P_p – пластовое давление, МПа;

T_0 – предел прочности породы на разрыв по данным лабораторных исследований, МПа.

Данный метод ограничен применением только для процессов ГРП, проводимых в открытом стволе скважины.

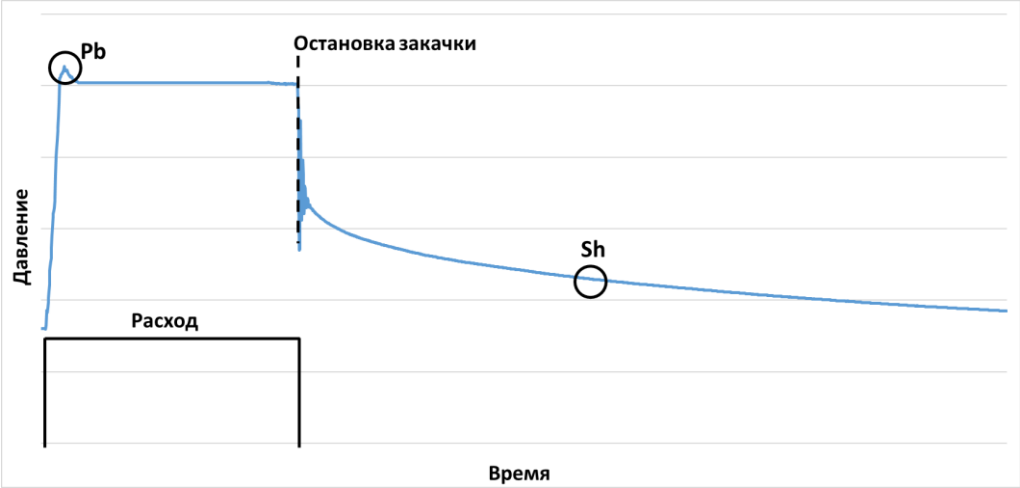

Рис. 1. Схематичное представление записи давления в процессе ГРП

При наличии внутрискважинных имиджеров с выявленными вывалами на стенках скважин, результатов керновых исследований по пределам прочности пород при одноосном сжатии и данных о минимальном горизонтальном напряжении возможно определение величины S_H [3]:

$$S_H = \frac{(C_0+\Delta P_W+2P_P)}{(1-2cos2\theta)} - S_h \frac{(1+2cos2\theta)}{(1-2cos2\theta)}, \quad (2)$$

где C_0 – предел прочности при одноосном сжатии по данным лабораторных исследований, МПа;

ΔP_W – разность давления бурового раствора и порового давления, МПа;

θ – угол от направления S_H до границы вывала, град.

На Ромашкинском месторождении ГРП проводится в обсаженных скважинах, имиджеры открытого ствола проведены в малом объеме и в основном выше интервалов терригенного девона, по имеющимся имиджерам вывалов не наблюдается. В связи с этим определение величины S_H прямыми измерениями невозможно и требуется разработка аналитических подходов.

В случаях отсутствия данных по результатам тестовых закачек для определения давления образования трещины и анализу имиджеров C.A. McPhee предлагает определять значение максимального горизонтального напряжения как среднее значение суммы вертикального и минималь-

ного горизонтального напряжений [4]:

$$S_H = \frac{S_V + S_h}{2}, \quad (3)$$

где S_V – вертикальное горное напряжение, МПа.

При наличии данных кросс-дипольного акустического каротажа возможно определение величины максимального горизонтального напряжения с применением скоростей продольных, поперечных волн и волны Стоунли [5]:

$$S_H = \left[\frac{C_{55} - C_{44}}{C_{55} - C_{66}}\right](S_V + S_h) + S_h, \quad (4)$$

$$C_{44} = \rho_b V_S^2, \quad (5)$$

$$C_{55} = \rho_b V_P^2, \quad (6)$$

$$C_{66} = \rho_b V_{St}^2, \quad (7)$$

где ρ_b – объемная плотность горной породы, кг/м^3;

V_S – скорость поперечной волны, м/с;

V_P – скорость продольной волны, м/с;

V_{St} – скорость волны Стоунли, м/с.

На основе статистики данных о действующих напряжениях в земной коре на глубине до 3 км (Рис. 2) Б.Г. Бреди и Е.Т. Браун [6] приводят соотношение напряжений по глубине залегания, определяющее граничные значения действующих напряжений:

$$k = \frac{p_{xx} + p_{yy}}{2p_{zz}}, \quad (8)$$

где P_{xx} – максимальное горизонтальное напряжение, МПа;

P_{yy} – минимальное горизонтальное напряжение, МПа;

P_{zz} – вертикальное горное напряжение, МПа.

Нижняя граница соотношения напряжений при k=0,3, а верхний предел определяется выражением:

$$k = 0{,}3 + \frac{1500}{Z}, \quad (9)$$

где Z – глубина залегания, м.

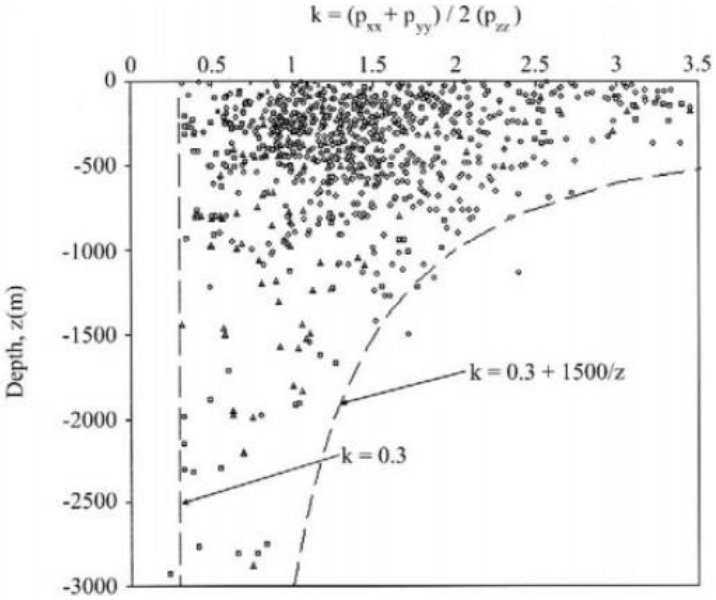

Рис. 2. Отношение среднего измеренного горизонтального напряжения к вертикальному напряжению [6]

Используя соотношение (8), автором предлагается методика оценки магнитуды действующего максимального горизонтального напряжения. Когда значение коэффициента k неизвестно и данные о S_H отсутствуют, а S_h и S_V оцениваются по промысловым данным или аналитическим решениям, то возможно определить диапазон значений k. Для определения минимального значения k_{min} приравниваем значение S_H к S_h, $S_H = S_h$, и получаем формулу (8) в следующем виде:

$$k_{min} = \frac{S_H + S_h}{2 \cdot S_V} = \frac{S_h + S_h}{2 \cdot S_V} = \frac{S_h}{S_V} \quad (10)$$

Для определения максимального значения k_{max} приравниваем значение S_H к S_V, $S_H = S_V$:

$$k_{max} = \frac{S_H + S_h}{2S_V} = \frac{S_V + S_h}{2S_V} \quad (11)$$

Среднее значение k_{cp} составит:

$$k_{\text{ср}} = \frac{k_{max} + k_{min}}{2} \quad (12)$$

Тогда из формулы (8) можно вычислить S_H:

$$S_H = k_{cp} 2S_V - S_h. \quad (13)$$

Так как S_h изменяется в зависимости от типа пород с учётом соответствующего коэффициента Пуассона ν, то для определения диапазона коэф-

фициента *k*, действующего в интервале продуктивных отложений рассмотрена зависимость *k*=f(ν) в диапазоне, охватывающем коэффициент Пуассона от 0,1 до 0,4, – для пород терригенного девона. Для расчёта были приняты следующие исходные данные: вертикальная глубина H_{TVD}=1650 м, для расчёта вертикального горного напряжения принята средняя плотность горных пород 2500 кг/м^3, пластовое давление принято гидростатическим для жидкости со средней плотностью 1100 кг/м^3 с учётом минерализации пластовых вод, минимальное горизонтальное напряжение S_h рассчитано по формуле Итона [7]:

$$S_h = \left(\frac{\nu}{1-\nu}\right) \cdot (S_V - P_P) + P_P \,, \qquad (14)$$

где ν – коэффициент Пуассона.

Расчёты произведены в программе «Stress ratio BB» [8], разработанной автором с применением языка программирования C#, пример графика с результатом приведен на рис. 3. Результаты расчёта представлены в таблице. По рассчитанному коэффициенту $k_{ср}$ определены значения максимального горизонтального напряжения S_H (формула 13) и соотношение максимального к минимальному напряжению S_H/S_h.

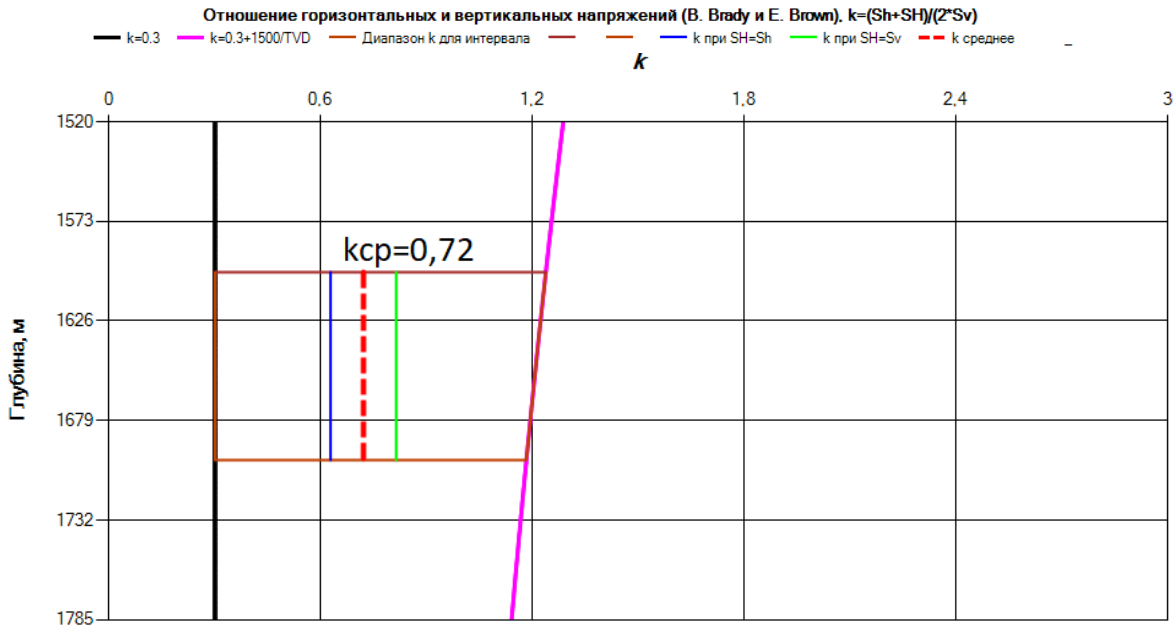

Рис. 3. Пример графика с отображением результатов расчёта в программе «Stress ratio BB» для условий H_{TVD}=1650 м и коэффициента Пуассона ν=0,25

Таблица

Результаты расчёта коэффициента соотношения напряжений k

TVD, м	P_P	S_V	ν	S_h	k_{min}	k_{max}	$k_{ср}$	S_H	S_H/S_h
1650	17,9	40,47	0,1	20,37	0,50	0,75	0,63	30,42	1,49
1650	17,9	40,47	0,15	21,95	0,54	0,77	0,66	31,21	1,42
1650	17,9	40,47	0,2	23,54	0,58	0,79	0,69	32	1,36
1650	17,9	40,47	0,25	25,34	0,63	0,81	0,72	32,91	1,30
1650	17,9	40,47	0,3	27,6	0,68	0,84	0,76	34,03	1,23
1650	17,9	40,47	0,35	30,08	0,74	0,87	0,81	35,28	1,17
1650	17,9	40,47	0,4	33,02	0,82	0,91	0,86	36,74	1,11

На основе данных в таблице соотношение горизонтальных напряжений S_H/S_h также можно представить, как зависимость от коэффициента Пуассона ν (Рис. 4):

$$\frac{S_H}{S_h} = 1{,}6491 \cdot e^{-0{,}979\nu} \qquad (15)$$

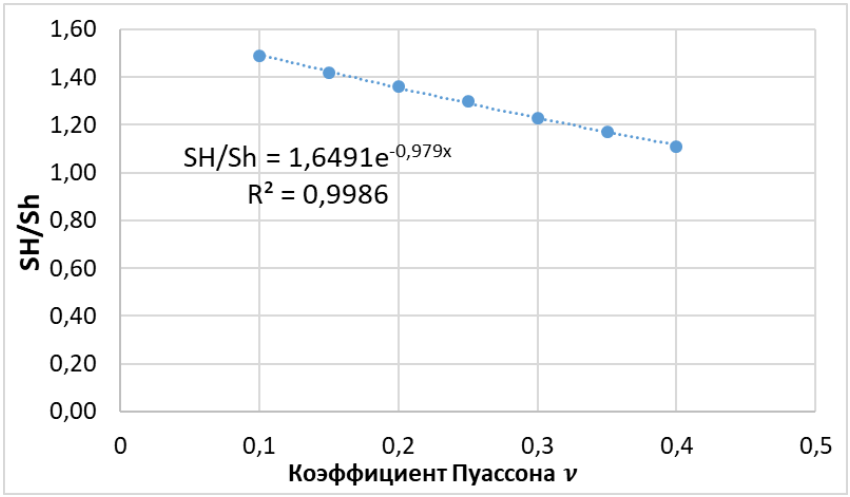

Рис. 4. Зависимость соотношения горизонтальных напряжений S_H/S_h от коэффициента Пуассона ν

С увеличением коэффициента Пуассона ν снижается контраст горизонтальных напряжений и при максимальном значении ν=0,5 соотношение S_H/S_h будет равным 1, что описывает распределение напряжений в жидкости, когда все действующие напряжения равны во всех направлениях.

По формуле (15) получаем возможность расчёта S_H для горных пород кыновского и пашийского горизонтов Ромашкинского месторождения:

$$S_H = S_h \cdot 1{,}6491 e^{-0{,}979\nu} \quad (16)$$

На Миннибаевской площади Ромашкинского месторождения в скважине № 32795 в интервале 1665-1692 м саргаевского горизонта, находящегося над кыновским, был проведен плотностной, кросс-дипольный акустический каротажи и получены данные по скоростям продольной, поперечной волн, волны Стоунли и коэффициенту Пуассона (Рис. 5).

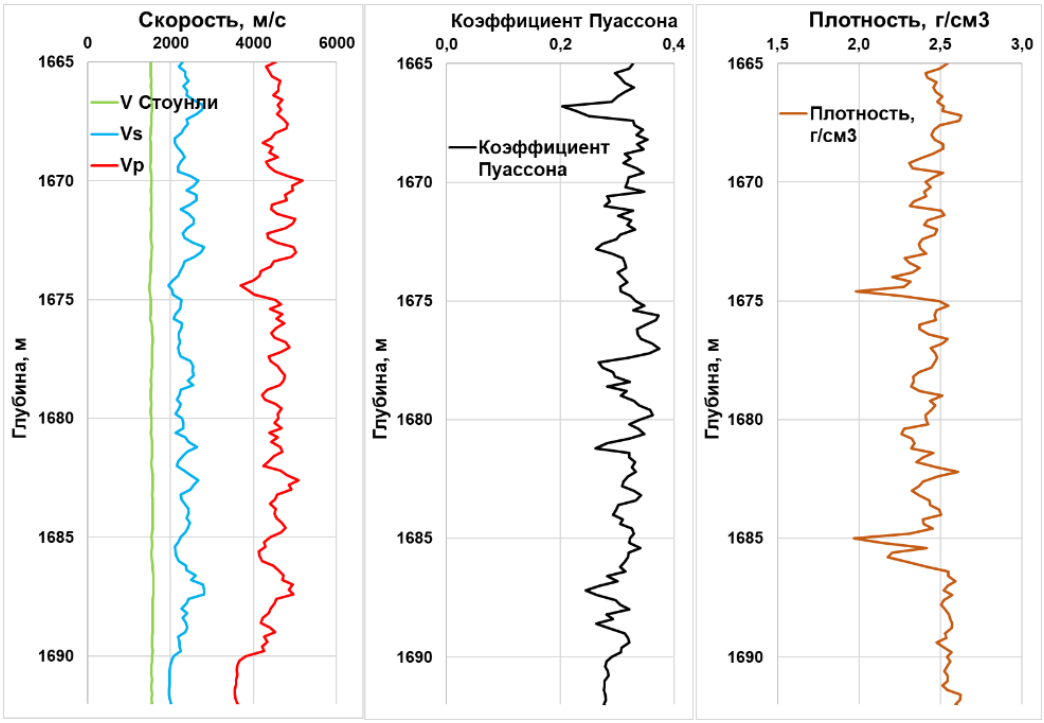

Рис. 5. Результаты кросс-дипольного каротажа в скважине 32795

Эти данные были использованы для расчёта S_H по формуле (4). Также для сравнения были рассчитаны значения S_H по формулам (3, 16). Результаты расчётов приведены на совмещенном графике (Рис. 6). На рис. 7 приведено распределение соотношения горизонтальных напряжений рассчитанных по формулам (14, 16).

По методике [5] значение S_H приближается к значению горного давления и даёт небольшую разницу между S_V и S_H, что подразумевает высокие горизонтальные напряжения. Спокойная тектоническая обстановка и низкий уровень сейсмической активности на территории Татарстана предпо-

лагают больший контраст между горизонтальными напряжениями и вертикальным горным. Методика C.A. McPhee [4] показывает завышение контраста между горизонтальными напряжениями при наличии значений коэффициента Пуассона более 0,3. Предлагаемая в рамках данной работы зависимость (16) позволяет определять величину действующего максимального горизонтального напряжения благодаря учёту коэффициента Пуассона во всём его диапазоне значений.

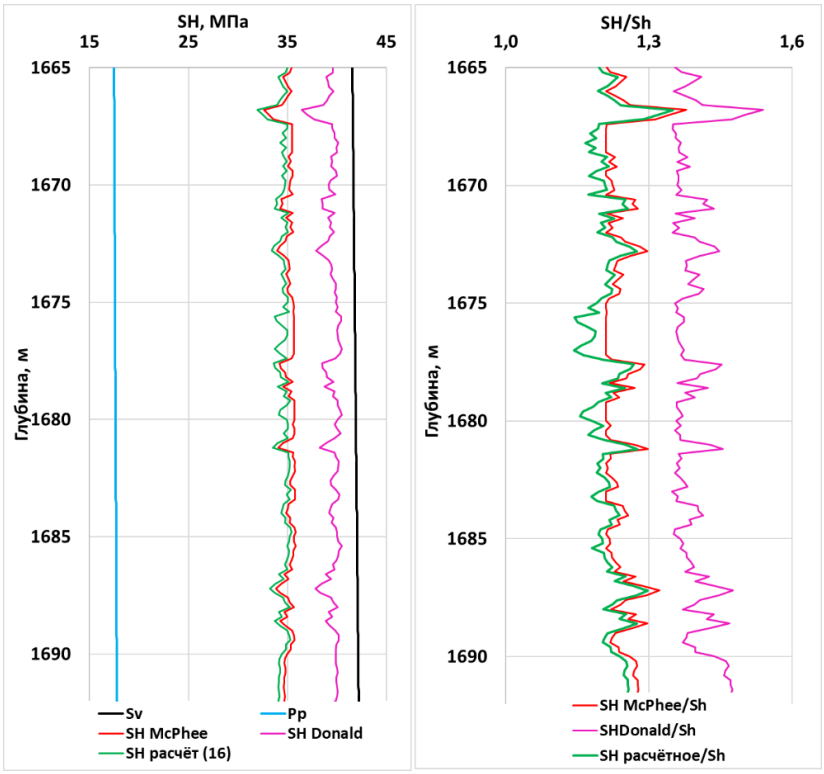

Рис. 6. Сравнение расчётных значений S_H, полученных по методикам McPhee (формула 3), Donald (формула 4) и собственной зависимости (формула 16)

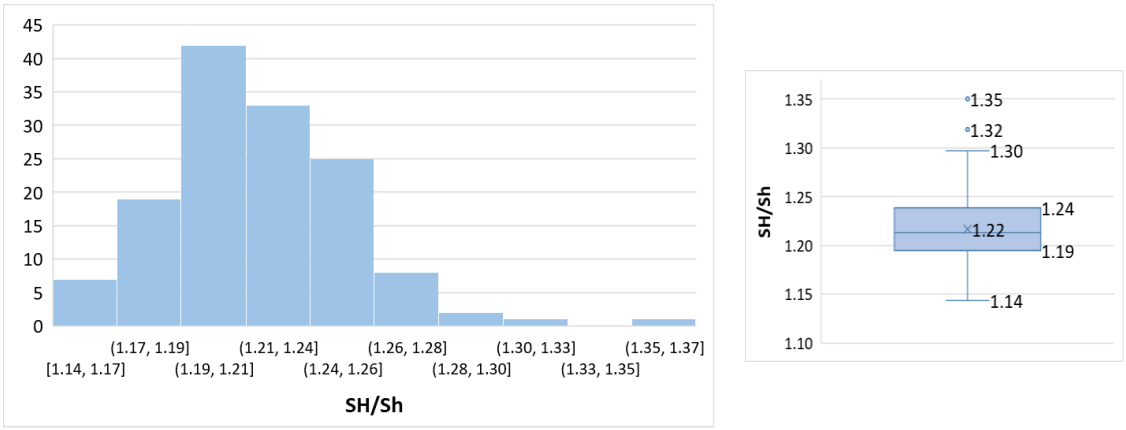

Рис. 7. Гистограмма распределения соотношения напряжений S_H/S_h в скв. 32795

Выводы

1. Впервые рассмотрена оценка величины действующего максимального горизонтального напряжения в продуктивных отложениях терригенного девона Ромашкинского месторождения.
2. Предложена методика расчёта максимального горизонтального напряжения S_H в отложениях кыновского и пашийского горизонтов Ромашкинского месторождения при наличии данных о действующих вертикального горного, минимального горизонтального напряжений и коэффициенте Пуассона горных пород.
3. Для диапазона коэффициента Пуассона 0,1-0,4 величина максимального горизонтального напряжения S_H находится в интервале 1,49-1,11S_h.
4. По данным кросс-дипольного каротажа, проведенного в скважине 32745 Ромашкинского месторождения, соотношение S_H/S_h составляет 1,19-1,24.

Список литературы

1. Amadei B., Stephansson O. Rock Stress and its Measurement. – London, Chapman& Hall, 1997. – 490 p.
2. Haimson B., Fairhurst C. In-Situ stress determination at great depth by means of hydraulic fracturing // The 11th U.S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS), 16-19 June 1969, Berkeley, California. – P. 559-584.
3. Barton C.A., Zoback M.D., Burns K.L. In-situ stress orientation and magnitude at the Fenton Geothermal Site, New Mexico, determined from wellbore breakouts // Geophysical Research Letter. – 1988. – Vol. 15, Issue 5 (May). – P. 467-470.
4. Sand management in Bongkot field, Gulf of Thailand: an integrated approach / C.A. McPhee, Z.R. Lemanczyk, P. Helderle, D. Thatchaichawalit, N. Gongsakdi // SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, 16-18 October 2000, Brisbane, Australia. – 10 p. – SPE-64467-MS.
5. Stress characterization in deep boreholes using acoustoelasticity / J.A. Donald, R. Prioul, T. Lei, B.Sinha // ISRM SINOROCK, 18-20 June 2013, Shanghai, China. – 6 p.
6. Brady B.H., Brown E.T. Rock Mechanics for Underground Mining. – New York (USA) : Kluwer Academic Publishers, 2005. – 628 p.
7. Eaton B.A. Fracture gradient prediction and its application in oilfield operations // Journal of Petroleum Technology. – 1969. – Vol. 21, № 10. – P. 1353-1360.
8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020619930. Stress change / И.И. Гирфанов ; правообладатель Публичное акционерное общество «Татнефть» имени В.Д. Шашина. – № 2020619206 ; заявл. 20.08.2020 ; опубл. 26.08.2020.

References

1. Amadei B., Stephansson O. Rock Stress and its Measurement. – London, Chapman& Hall, 1997. – 490 p. (in English)
2. Haimson B., Fairhurst C. In-Situ stress determination at great depth by means of hydraulic fracturing // The 11th U.S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS), 16-19 June 1969, Berkeley, California. – P. 559-584. (in English)
3. Barton C.A., Zoback M.D., Burns K.L. In-situ stress orientation and magnitude at the Fenton Geothermal Site, New Mexico, determined from wellbore breakouts // Geophysical Research Letter. – 1988. – Vol. 15, Issue 5 (May). – P. 467-470. (in English)
4. Sand management in Bongkot field, Gulf of Thailand: an integrated approach / C.A. McPhee, Z.R. Lemanczyk, P. Helderle, D. Thatchaichawalit, N. Gongsakdi // SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, 16-18 October 2000, Brisbane, Australia. – 10 p. – SPE-64467-MS. (in English)
5. Stress characterization in deep boreholes using acoustoelasticity / J.A. Donald, R. Prioul, T. Lei, B.Sinha // ISRM SINOROCK, 18-20 June 2013, Shanghai, China. – 6 p. (in English)
6. Brady B.H., Brown E.T. Rock Mechanics for Underground Mining. – New York (USA) : Kluwer Academic Publishers, 2005. – 628 p. (in English)
7. Eaton B.A. Fracture gradient prediction and its application in oilfield operations // Journal of Petroleum Technology. – 1969. – Vol. 21, № 10. – P. 1353-1360. (in English)
8. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlya EVM* № 2020619930. Stress change / I.I. Girfanov ; pravoobladatel' Publichnoe akcionernoe obshchestvo «Tatneft'» imeni V.D. Shashina. – [The Certificate on Official Registration of the Computer Program] № 2020619206 ; zayavl. 20.08.2020 ; opubl. 26.08.2020. (in Russian)

Сведения об авторах

Гирфанов Ильдар Ильясович, младший научный сотрудник отдела исследований скважин, коллекторов и углеводородов, институт «ТатНИПИнефть» ПАО «Татнефть» им. В.Д. Шашина
Россия, 423236, Бугульма, ул. Мусы Джалиля, 32
E-mail: gii@tatnipi.ru

Authors

I.I. Girfanov, Junior Research Engineer, Core Analysis, PVT and Well Testing Department, TatNIPIneft Institute–PJSC TATNEFT
32, Musa Jalil st., Bugulma, 423236, Russian Federation
E-mail: gii@tatnipi.ru

Статья поступила в редакцию 03.02.2021
Принята к публикации 17.06.2021
Опубликована 30.06.2021