ISSN 0135-3500. Записки Санкт-Петербургского государственного горного института. 1994. Том 139

УДК 622.78.35:235:255

Ю.Д.ДЯДЬКИН

ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ГИДРОРАЗРЫВА ПОРОДНОГО МАССИВА[x]

Изложены теоретические основы определения давления жидкости, необходимого для гидроразрыва массива скальных пород блочной структуры. Обоснован критерий прочности такого массива при объемном характере развития деформаций в анизотропном поле гравитационно-тектонических напряжений. Приведены результаты Тырныаузского опытного гидроразрыва горячих гранитов на глубине около 4 км, а также сравнение расчетных данных с результатами гидроразрыва, проведенного Лос-Аламосской лабораторией США.

Под гидроразрывом горных пород обычно понимают их хрупкое разрушение с развитием трещин растяжения или сдвига. В условиях, когда преобладающим механизмом разрушения массива является раскрытие существующих в нем закрытых или залеченных тектонических трещин, его часто называют гидрорасчленением. В любом случае образованию и росту магистральных трещин предшествует развитие деформаций массива в их берегах, нагруженных давлением нагнетаемой рабочей жидкости $P_{тр}$. Часть этого давления, соответствующая нормальным к растущей трещине "захлопывающим" ее напряжениям $\sigma_{\perp}$, а также "пластовому" давлению $P_{пл}$ природной жидкости, заполняющей поры и трещины массива, обеспечивает условие равновесия трещины. Деформации пород развиваются под влиянием активной нагрузки $\Delta P_{a}=P_{тр}-P_{пл}-\sigma_{\perp}$. Абсолютная деформация сжатия породного массива, вмещающего трещину, представляет собой ее раскрытие δ. На границе растущей трещины активная нагрузка на ее смыкающиеся берега должна соответствовать ΔP_{p} – механической сопротивляемости породного элемента разрушению от растяжения или сдвига.

В условиях нефтегазоносных пластов, гидроразрыв которых с начала 50-х годов получил широкое распространение, авторы первых расчетных методов считали возможным пренебречь величиной ΔP_{p} [4]. Действительно,

[x] Работа выполнена по проекту № 17835а Российского фонда фундаментальных исследований.

сопротивление разрыву трещиноватых, пористых пластов-коллекторов, обычно представленных сравнительно слабыми терригенными или карбонатными породами, даже на умеренных глубинах составляет небольшую долю от напряжений $\sigma_\perp$, преодолеваемых давлением рабочей жидкости. Гидроразрыв стал одной из классических задач теории упругости. Теоретические основы решения этой сложной задачи разработаны в известных работах С.А.Христиановича, Г.И.Баренблатта, Ю.П.Желтова, Ч.Файрхорста, Б.Хаймсона, А.Ингленза, Т.Перкинса и др. [2,4,7]. В первых теоретических работах массив горных пород рассматривался как однородная изотропная линейно-упругая среда, не обладающая прочностью.

За последние 10-15 лет проблема гидроразрыва пород приобрела особую актуальность в связи с созданием искусственных коллекторов в горячем массиве глубоких горизонтов для добычи его геотермальной энергии, ресурсы которой можно считать практически не ограниченными [2,6,11]. Идеализированные теоретические модели гидроразрыва сохраняют определенное методологическое значение и при таком его приложении, но требуют серьезного "заземления", особенно если учесть количественные и качественные отличия "геотермального" гидроразрыва от "нефтегазового".

Прежде всего, речь идет о весьма крупных масштабах разрушения пород, не привычных даже для горняков. В достаточно характерных условиях (глубина 3 км, температура пород 100 °С) для обеспечения каждых 10 МВт тепловой мощности геотермальной циркуляционной системы (ГЦС) площадь теплообменной поверхности трещин ее искусственного коллектора должна составлять 2-3 млн.м^2, а объем охваченных активной фильтрацией горячих пород на каждые 10 лет срока службы ГЦС такой мощности должен быть не менее 50 млн.м^3 [3,12]. Таким образом, для достаточно крупной геотермальной системы мощностью в 100 МВт, рассчитанной на 30 лет работы, объем зоны гидроразрыва должен достигать 1,5-2 км^3 при общей площади трещин 20-30 км^2. Такие объемы разрушения были получены разве что при известном американском взрыве на о.Амчитка в 1972 г., когда было взорвано ядерное устройство с тротиловым эквивалентом в 7,5 Мт [2]. Следует подчеркнуть, что зоны субвертикальных трещин протяженностью от нескольких десятков метров до 1-2,5 км на глубинах до 2-4 км при температуре гранитного или гранодиоритного массива до 300 °С уже получены в опытных геотермальных гидроразрывах США, Великобритании, Японии, Франции, Германии, России и Швеции [2, 3,5,6,11,12]. При этом необходимые масштабы разрушения достигнуты без существенных сейсмических или иных вредных воздействий на окружающую среду, но при весьма значительных затратах, сопоставимых со стоимостью бурения глубоких скважин [12]. Эти дорогостоящие эксперименты вполне оправданы тем, что направлены на освоение новой экологически безопасной энерготехнологии, которая, по мнению их организаторов, будет играть ведущую роль в энергетике будущего [2,6,11], но совершенно очевидно, что такие гидроразрывы требуют надежного расчетного обоснования.

Качественные особенности геотермального гидроразрыва связаны с низкой проницаемостью и высокой прочностью скальных пород, исключающих эк-

тивное растворение и загрязнение фильтрующейся по трещинам рабочей жидкости – воды, ее низкой вязкостью, оправданной минимальной стоимостью, а также характерными для больших глубин структурными неоднородностями, анизотропностью поля гравитационно-тектонических напряжений и, наконец, многосторонними слиянием температурного фактора. Разрабатываемая в последние годы в СПГГИ расчетная методика [2,3] представляет собой попытку приближенного учета этих особенностей и их основных следствий.

Очевидно, что пренебрегать прочностью таких пород, как граниты, нельзя. Для монолитного гранитного образца можно было бы оценить значения ΔP_p, исходя из "микродефектной" теории трещинообразования, основы которой заложены А.Гриффитсом, развиты Е.Орованом, Г.Ирвином и др., изложены, например, в работе [I] и успешно применяются в расчетах различных конструкций. Исходя из структуры коэффициента интенсивности растягивающих напряжений в вершине трещины K_I, следует записать

$$\Delta P_p = \frac{K_{I.кр}}{\sqrt{\pi \Delta l}}, \qquad (I)$$

где $K_{I.кр}$ – критическое значение коэффициента интенсивности, определяемое экспериментально как свойство данного материала, данной горной породы; Δl – линейный параметр, выбор которого в данном случае вызывает затруднения.

Изначально в теории трещин под параметром Δl понимали полуширину замкнутой микротрещины – дефекта в растягиваемой линейно-упругой пластине: с увеличением Δl интенсивность напряжений в вершинах этой микротрещины растет, а разрывающее пластину усилие уменьшается. Формальная подстановка в уравнение (I) значений параметра Δl, соответствующих полуширине или радиусу растущей трещины гидроразрыва, ведет к абсурдному выводу: по мере расширения обширной зоны гидроразрыва необходимое давление рабочей жидкости должно падать, чего, конечно, не происходит в действительности.

Японские ученые из университета Тахоку в результате тщательных исследований механизма гидроразрыва гранитных образцов различных размеров пришли к однозначному выводу: параметр Δl для каждой породы нужно также определять экспериментально. Для исследованных разновидностей гранита его значение изменяется от I,54 до 3,39 мм, тогда как во всех случаях давление жидкости, необходимое для гидроразрыва образцов, определенно соответствовало "традиционному" экспериментальному показателю $[\sigma_p]$ – пределу прочности при одноосном растяжении [I0]. Таким образом, даже для ограниченных и монолитных образцов два экспериментальных показателя $K_{I.кр}$ и Δl для условия (I) не дают никаких преимуществ перед вполне пригодным для таких образцов традиционным показателем $[\sigma_p]$. Но, разумеется, ни один из этих показателей не позволяет определить механическую сопротивляемость гидроразрыву реального породного массива с присущими только ему структурными неоднородностями и анизотропией напряжений.

При характерной для скальных пород блочной структуре массива его проницаемость определяется в основном раскрытием и густотой главной системы фильтрующих тектонических трещин, простирающихся под углом α_n к направлению максимальных сжимающих напряжений $\sigma_y = \sigma_{max}$ при угле падения β_n. В случае развития гидроразрыва вдоль этих поверхностей раздела давление рабочей жидкости должно полностью разгрузить их от нормальных сжимающих напряжений σ_n и преодолеть механическое сопротивление трещинного контакта $\Delta p_{p.n}$. Заметим, что разрывная прочность этого контакта в условиях одноосного растяжения (для извлеченного из недр образца!) можно выразить как $\varphi_n [\sigma_p]$, где $\varphi_n \approx 0{,}1$ – коэффициент структурного ослабления пород при отрыве по поверхности раздела $\alpha_n \beta_n$, значение которого можно выбрать приближенно, ориентируясь на экспериментальные данные, обобщенные ВНИМИ и приведенные, например, в работе [1].

Обширные материалы измерений естественного поля напряжений в породном массиве, проанализированные в работах Б.Хаймсона [8,-], показывают, что сильное влияние тектонических сил, не только корректирующих, но и превосходящих гравитационные силы, на глубоких горизонтах является не исключением, а, скорее, правилом. Поэтому и минимальные σ_x и максимальные σ_y компоненты тензора гравитационно-тектонических напряжений чаще всего горизонтальны:

$$\sigma_x < \sigma_z < \sigma_y . \qquad (2)$$

При этом влияние тектоники можно выразить соответствующими коэффициентами $k_{т.x}$ и $k_{т.y}$:

$$\sigma_y = k_{т.y} (\rho g H - p_{пл}) \frac{\nu}{1-\nu} , \qquad (3)$$

где H, ρ и ν – соответственно расчетная глубина, средняя плотность и коэффициент Пуассона слагающих массив горных пород.

Поскольку тектонические движения охватывают весьма обширные участки недр, значения $k_т$, установленные для умеренных глубин, сохраняются и для глубоких горизонтов, как это было установлено, например, исследованиями Камборнской горной школы Великобритании для гранитных массивов Корнуолла [2].

В зависимости от пространственного положения главной системы структурных ослаблений α_n, β_n, напряжения, нормальные к поверхности фильтрующих трещин, могут изменяться от минимального уровня $\sigma_n = \sigma_x$ при $\alpha_n = 0$ и $\beta_n = 90^0$ до максимального $\sigma_n = \sigma_y$ при $\alpha_n = 90^0$ и $\beta_n = 90^0$ [2,3]:

$$\sigma_n = \sin\beta_n (\sigma_x \cos\alpha_n + \sigma_y \sin\alpha_n) + \sigma_z \cos\beta_n . \qquad (4)$$

Давление рабочей жидкости перед границей гидроразрыва, необходимое для его дальнейшего развития вдоль плоскости этого структурного ослабления с минимальным механическим сопротивлением [3],

$$P_{\text{г.}n} = \sigma_n + P_{\text{пл}} + \Delta P_{\text{р.}n}. \qquad (5)$$

Известно, однако, что при субгоризонтальном или наклонном положении главных структур ослаблений гидроразрыв очень часто, особенно на больших глубинах, развивается, минуя тектонические трещины и пересекая структурные блоки в вертикальной плоскости, нормальной к минимальным действующим в массиве напряжениям σ_x, хотя разнонаправленные микротрещины и иные дефекты структуры матрицы скальных пород обусловливают достаточно высокое значение коэффициента структурного ослабления $\varphi \approx 0{,}5 \div 0{,}6$ [I]:

$$P_{\text{г.в}} = \sigma_x + P_{\text{пл}} + \Delta P_{\text{р.в}}. \qquad (6)$$

Очевидно, развитие гидроразрыва в вертикальной плоскости становится наиболее вероятным при условии, что $P_{\text{г.в}} < P_{\text{г.}n}$ или

$$(\sigma_n - \sigma_x) \geq (\Delta P_{\text{р.в}} - \Delta P_{\text{р.}n}). \qquad (7)$$

Поскольку уровень напряжений и их разность в левой части неравенства (7) растут пропорционально глубине, а показатели прочности и структурных ослаблений не имеют столь явной связи, на глубоких горизонтах должна возрастать вероятность вертикальных гидроразрывов, что и наблюдается в действительности [2,II].

Как было отмечено выше, для оценки условий разрыва небольшого образца горной породы показатель $[\sigma_{\text{р}}]$ дает не худшие результаты, чем экспериментально определяемые показатели $K_{I\text{кр}}$ и Δl. Однако это не означает возможности определять механическое сопротивление гидроразрыву породного массива простой поправкой на коэффициент структурного ослабления, т.е. показателем $\varphi[\sigma_{\text{р}}]$. Необходимо учесть еще другой ослабляющий эффект, возникающий при объемном характере развития деформаций, предшествующих гидроразрыву массива (рис.I).

Теоретические и экспериментальные исследования подтверждают, что под влиянием сжимающих усилий в горной породе возникают концентрация напряжений в вершинах микротрещин и их слияние в магистральные макротрещины, ориентированные по направлению действия нагрузки. В случае развития вертикальной трещины гидроразрыва породный элемент в ее вершине разгружается от сжимающих его напряжений σ_x, когда давление рабочей жидкости на берега трещины достигает уровня $P = P_{\text{пл}} + \sigma_x$. При дальнейшем росте давления в этом элементе начинают развиваться растягивающие напряжения. Когда эти напряжения достигают $\Delta P_{\text{р.в}}$, происходит хрупкий скачок гидроразрыва. Но это произойдет при $\Delta P_{\text{р.в}} < [\sigma_{\text{р}}]\varphi$, поскольку при объемном развитии деформации указанный породный элемент остается под действием сжимающих напряжений σ_y и σ_z, которые при определенной интенсивности и сами могли бы вызвать образование трещины в плоскости yz.

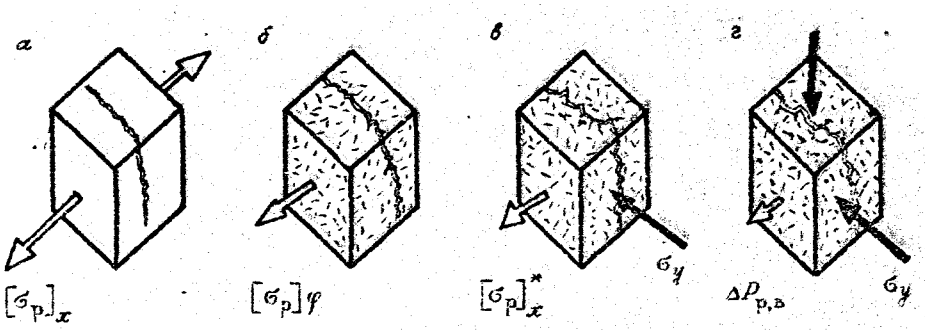


Рис.1. Механическое сопротивление элемента породного массива разрыву: а – в условиях одноосного растяжения, $\varphi = 1{,}0$; б – то же, с учетом структурного ослабления, $\varphi < 1{,}0$; в – при плоской деформации с учетом ослабляющего эффекта сжимающих напряжений σ_y, $[\sigma]^*_c = f[\sigma_p], \varphi, \sigma_y$; г – в условиях объемной деформации с учетом ослабляющего эффекта сжимающих напряжений σ_y и σ_z, $\Delta P_{p.в} = [\sigma_p]^*(1 - \sigma_z/[\sigma_{сж}]$

Как показано А.Гриффитсом, в условиях плоской деформации "растяжение–сжатие" растягивающие напряжения σ_3 могут достигать своего "одноосного" предела $[\sigma_p]$ перед разрывом, если сжимающие напряжения σ_1 по своей абсолютной величине не более чем втрое превосходят растягивающие напряжения σ_3 (которые рассматриваются как отрицательные). Если это условие, характерное для малых глубин и весьма прочных пород, не соблюдается и имеет место соотношение

$$3\sigma_3 + \sigma_1 > 0\,, \qquad (8)$$

сжимающие напряжения σ_1 существенно ослабляют сопротивляемость материала разрыву и он произойдет при растягивающих напряжениях $[\sigma_p]^* < [\sigma_p]$, который А.Гриффитс назвал энергетическим критерием прочности и который можно найти из уравнения, записанного в работе [1] в форме

$$8\sigma_p(\sigma_3 + \sigma_1) + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 = 0\,. \qquad (9)$$

Из решения уравнения (9) в наших условиях, т.е. при $\sigma_3 = [\sigma_p]^*_x$, $\sigma_1 = \sigma_y$ и $\sigma_p = [\sigma_p]\varphi$, можно получить формулу [3]

$$[\sigma_p]^*_x = \sqrt{a_x^2 + \sigma_y(8[\sigma_p]\varphi - \sigma_y)} - a_x\,, \qquad (10)$$

где

$$a_x = 4[\sigma_p]\varphi + \sigma_y\,, \qquad (11)$$

а с учетом ослабляющего эффекта второго сжимающего напряжения σ_z механическое сопротивление породного массива образованию вертикальной трещины разрыва получено в виде

$$\Delta P_{р.в} = [\sigma_р]^{*}_{\alpha}\left(1 - \frac{\sigma_2}{[\sigma_{сж}]}\right). \qquad (12)$$

Аналогичные расчетные зависимости получены в работе [3] и для развития гидроразрыва вдоль тектонических трещин $\alpha_п, \beta_п$ с минимальным механическим сопротивлением $\Delta P_{р.п}$. Поскольку на глубоких горизонтах разность напряжений $\sigma_y - \sigma_x$ обычно превосходит прочность пород, для геотермального гидроразрыва наиболее вероятно образование вертикальных трещин. Развитие гидроразрыва по тектоническим поверхностям раздела возможно лишь при значениях $\beta_п$ близких к 90°.

В условиях анизотропного объемного сжатия (2) в любой точке породного массива действуют касательные напряжения, которые при соответствующей интенсивности могли вызвать появление сдвиговых трещин. Очевидно, однако, что наиболее опасно развитие касательных напряжений по тектоническим трещинам второй (по степени структурного ослабления массива) секущей системы, ориентированной под углами $\alpha_с$ и $\beta_с$. Активная нагрузка на "торцы" структурных блоков от давления рабочей жидкости в фильтрующих тектонических трещинах главной системы $\alpha_п, \beta_п$ может вызвать их сдвиги по этим контактам. Давление рабочей жидкости, обеспечивающее возможность такого сдвига по условию Кулона,

$$P_{г.с} = P_{пл} + \frac{2\Gamma_п}{\Gamma_с}\left([\tau_0]\varphi_с + \sigma_{п.с}\,tgf\right), \qquad (13)$$

где $\Gamma_п$ и $\Gamma_с$ – густота тектонических трещин главной и секущей систем структурных ослаблений; $[\tau_0]$ – сцепление пород, сопротивление чистому сдвигу; $\varphi_с$ – коэффициент структурного ослабления секущей поверхности раздела; tgf – коэффициент трения при сдвиге смежных структурных блоков по этому контакту с учетом дилатансийных эффектов; $\sigma_{п.с}$ – нормальные к плоскости сдвига напряжения,

$$\sigma_{п.с} = \sin\beta_с(\sigma_x\cos\alpha_с + \sigma_y\sin\alpha_с) + \sigma_z\cos\beta_с. \qquad (14)$$

При развитии гидроразрыва в виде зоны трещин сдвига такие трещины остаются закрытыми сжимающим усилием $\sigma_{п.с}$, они плохо фильтруют даже такую маловязкую жидкость, как вода. В американских и английских опытных ГЦС с обширными зонами гидроразрыва, в которых преобладают трещины сдвига, начальный гидравлический импеданс достигал 2 МПа·с/л. Для эффективной работы циркуляционной системы этот показатель должен быть ниже примерно на порядок. Поэтому предпочтительно образование при гидроразрыве вертикальных трещин растяжения, сохраняющих раскрытие при умеренном напоре циркуляционного насоса ($P_н \sim \sigma_x$).

С увеличением глубины наиболее вероятными механизмами гидроразрыва становятся вертикальное и сдвиговое трещинообразования. Последнее возмож-

но при $P_{г.с} < P_{г.в}$, а из структуры выражений (I3) и (I4) следует, что давление рабочей жидкости, необходимое для развития сдвигов, существенно зависит от ориентировки секущей системы структурных ослаблений $\alpha_c \beta_c$. При маловероятном горизонтальном положении этих закрытых тектонических трещин, т.е. при $\beta_c = 0$, затрудняющее сдвиговую деформацию нормальное к этим поверхностям напряжение $\sigma_{n.c} = \sigma_z$, что следует из формулы (I4). Поскольку для образования вертикальных трещин растяжения нужно преодолеть существенное меньшие напряжения $\sigma_x < \sigma_z$, развитие гидроразрыва в виде таких горизонтальных сдвигов также маловероятно.

При наиболее распространенной субвертикальной ориентации тектонических трещин, т.е. при $\beta_c \approx 90^0$, нормальная нагрузка на плоскость сдвига существенно зависит от азимутального угла α_c. Из выражения (I4) видно, что при $\alpha_c = 90^0$ получим $\sigma_{n.c} = \sigma_y$, а при $\alpha_c \approx 0$, т.е. когда простирание секущих тектонических трещин совпадает с направлением действия максимальных напряжений σ_y, эта нагрузка имеет минимальное значение $\sigma_{n.c} = \sigma_x$. В последнем случае наиболее вероятен именно сдвиговый механизм гидроразрыва, ибо механическое сопротивление "чистому" сдвигу при структурном ослаблении φ_c меньше, чем отрыву при коэффициенте ослабления $\varphi > \varphi_c$, а преодолеваемые напряжения в случае сдвига могут быть также примерно вдвое меньше (обычно $tg\, f \leq 0{,}5$).

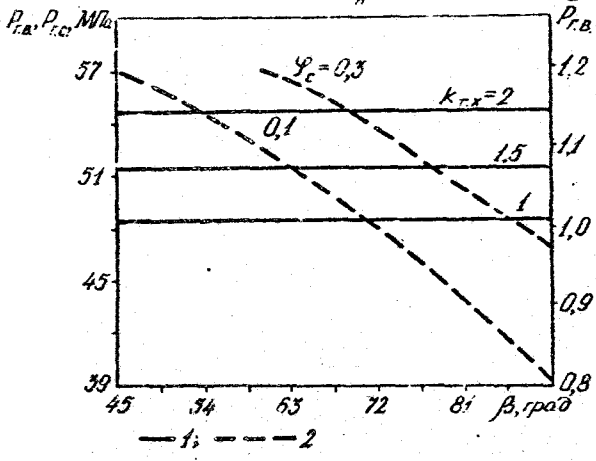


Рис.2. Влияние угла падения секущей системы трещин на давление воды перед границей гидроразрыва в виде одиночной вертикальной трещины $P_{г.в}$ (1) и в виде зоны сдвигов смежных структурных блоков $P_{г.с}$ (2)

На рис.2 показаны результаты выполненного ст.науч.сотр. В.М.Алексеевым компьютерного анализа влияния тектоники $k_{т.х}$, структурных ослаблений φ_c и угла падения секущей системы поверхностей разрыва β_c на вероятность конкурирующих механизмов гидроразрыва гранитного массива на глубине 3 км при средних ("типичных") значениях всех остальных из 40 независимых исходных переменных величин, входящих в расчетную методику СШГИ [3]. Здесь давление рабочей жидкости - воды перед границей растущей вертикальной трещины при тектоническом коэффициенте $k_{т.х} = I$, составляющее $P^*_{г.в} = 48{,}35$ МПа, условно принято за базовое $P^*_г$. По оси ординат отложены безразмерные отношения $\bar{P}_{г.в} = P_{г.в}(k_{т.х})/P^*_г$ и $\bar{P}_{г.с} = P_{г.с}(\varphi_c)/P^*_г$. Из графиков следует, что при отсутствии тектонического влияния ($k_{т.х} = I$) сдвиговый механизм становится более вероятным (т.е. $P_{г.с} < P_{г.в}$) при минимальном значении $\varphi_c = 0{,}I$ и $\beta_c > 70^0$, а с ростом коэффициента структурного ослабления до

φ_c = 0,3 сдвиговый механизм "требует" более крутых углов падения и даже при $\beta_{c.x}$ = 30° вертикальные и сдвиговые трещины являются почти равновероятными. Однако по мере усиления тектонического влияния до $\lambda_{т.х}$ = 2 вероятность сдвигового механизма гидроразрыва быстро возрастает.

В работе [3] расчетная методика СПГТИ проверена в известных условиях эксперимента 2032 Лос-Аламосской лаборатории США по одному из результирующих параметров гидроразрыва – раскрытию трещины около скважины: по расчету получено $\delta_0 = 2{,}2 \cdot 10^{-3}$ м вместо $\delta_0 = 2{,}3 \cdot 10^{-3}$ м в эксперименте (при среднем темпе нагнетания 0,097 м^3/с).

В условиях того же крупномасштабного американского эксперимента 2032 наша методика проверена по трем другим параметрам[x]: глубина зоны фильтрационных течек определена в 83 м, а фактически составила в среднем 75 м; расчетный объем нагнетаемой воды 22294 м^3 также оказался достаточно близок к фактическому значению 21600 м^3; общая продолжительность гидроразрыва по расчету 63,8 ч, а в действительности 61 ч.

В феврале 1991 г. НПО "Недра" совместно с СПГТИ и Гипроникелем впервые в России осуществили экспериментальный гидроразрыв гранитного массива с температурой 210 °С на глубине 3770 м при строительстве Тырныаузской опытной геотермальной системы. При инициации гидроразрыва, т.е. преодолении концентрации напряжений на стенке скважины, развиваемое насосным агрегатом давление воды достигало $P'_н$ = 70,0 МПа, при "захлопывании" трещины оно снизилось до P_{min} = 38 МПа, а при развитии начальной трещины составляло $P_н$ = 50,2 МПа. Интенсивный самоизлив 37 м^3 воды при "захлопывании" начальной трещины (темп самоизлива 2,2 м^3/мин превышал темп нагнетания 1,8 м^3/мин) указывает на ее значительное раскрытие и практически исключает вариант сдвиговых деформаций.

Минимальные горизонтальные сжимающие напряжения и механическое сопротивление породного массива разрыву определены в этих опытных данных при вертикальном положении трещины: $\sigma_x = \sigma_{min} = P_{min}$ = 38,0 МПа; $\Delta P_{р.в} = P_н - \sigma_x$ = 50,2 – 38 = 12,2 МПа, поскольку при пренебрежимо малых потерях давления в колонне труб $\Delta P_к \approx 0$ и весьма близких значениях средней плотности рабочей и пластовой жидкости ($\rho_г \approx \rho_{пл}$), гидростатического давления на рабочем интервале скважины и пластового давления ($P_{г.ст} = P_{пл}$) можно принять $P_н \approx P_{г.в}$. По данным лабораторных испытаний ρ = 2630 кг/м^3, $[\sigma_{сж}]$ = 250 МПа, $[\sigma_р]$ = 25 МПа, ν = 0,31. Полное горное давление на глубине гидроразрыва составляет $q_г$ = 97,3 МПа, пластовое давление $P_{пл}$ = 35,2 МПа, а вертикальные сжимающие напряжения в породном скелете $\sigma_z = q_г - P_{пл}$ = 97,3 – 35,2 = 62,1 МПа.

Для определения максимального горизонтального напряжения σ_y воспользуемся структурой параметра Надаи-Ладе:

---

[x] Дядькин Ю.Д., Гуан Синь Хо, Слюсарев Н.И. Экспериментальная проверка формул геотермального гидроразрыва // Проблемы геотермальной энергии / Санкт-Петерб. горн. ин-т. СПб, 1993.

$$\mu_\sigma = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}. \qquad (15)$$

Предельное значение $\mu_\sigma = -1{,}0$ означало бы $\sigma_2 = \sigma_3$, т.е. равенство горизонтальных напряжений $\sigma_y = \sigma_x$, но это противоречило бы эллипсовидному поперечному сечению скважины при ее бурении (соотношение осей 1,8).

Другое предельное значение $\mu_\sigma = 1{,}0$ означает равенство $\sigma_1 = \sigma_2$, т.е. $\sigma_y = \sigma_z$, что противоречит интенсивному "дискованию" керна, которое во всех случаях было горизонтальным. Остается признать среднестатистическое значение $\mu_\sigma = 0$, при котором $\sigma_y = \sigma_1 = 2\sigma_2 - \sigma_3 = 2 \cdot 62{,}1 - 38{,}0 = 86{,}2$ МПа.

Установленные таким образом компоненты тензора напряжений указывают на значительное влияние тектонических сил. При коэффициенте Пуассона $\nu = 0{,}31$ по выражению (3) находим

$$k_{т.x} = \frac{38{,}0}{27{,}9} = 1{,}36; \qquad k_{т.y} = \frac{86{,}2}{27{,}9} = 3{,}1.$$

Фактическое значение энергетического критерия прочности А.Гриффитса при известных значениях $\Delta P_{р.в}$, σ_z и $[\sigma_{сж}]$ находим из формулы (12): $[\sigma_р]^*_x = 16{,}2$ МПа. Теперь можно определить результирующее значение коэффициента структурного ослабления породного массива:

$$\varphi = \frac{(\sigma_y + [\sigma_р]^*_x)^2}{8[\sigma_р](\sigma_y - [\sigma_р]^*)}. \qquad (16)$$

Подставляя значения σ_y, $[\sigma_р]$ и $[\sigma_р]^*_x$, находим $\varphi = 0{,}75$, что существенно выше рекомендуемых средних значений [1]. Таким образом, Тырныаузский гранитный массив (Эльджурта) характеризуется повышенным механическим сопротивлением, сравнительно небольшим структурным ослаблением, а также низкой интегральной проницаемостью, которая по анализу опытных данных составляет $k = 0{,}5 \cdot 10^{-17}$ м^2.

Экспериментальные результаты позволяют определить еще один трудно подающийся предрасчету параметр – коэффициент концентрации кольцевых напряжений на стенке скважины k_σ, который по теореме Ламэ может изменяться от 1 до 2:

$$k_\sigma = \frac{P'_н - \Delta P_р - \Delta P_к}{P_н - \Delta P_р - \Delta P_к - \Delta P_{тр}}. \qquad (17)$$

Пренебрегая малыми потерями давления в колонне труб (при низкой вязкости воды и малом темпе нагнетания $\Delta P_к \leq 0{,}025$ МПа) и незначительным изменением давления при развитии трещины ($\Delta P_{тр} \approx 0$) в условиях опыта, получим $k_\sigma = 1{,}26$.

Подставляя полученные из опыта значения $k_т$ и φ в расчетные зависимости [3], естественно, получим полное соответствие $P'_н$ = 70,0 МПа и $P'_н$ = 50,2 МПа. Это подтверждает как структуру формул (I0)-(I2), так и принятый в данном анализе вариант механизма гидроразрыва - вертикальная трещина растяжения. Правильность такого выбора можно подтвердить и оценкой уровня давления рабочей жидкости, необходимого для реализации других механизмов гидроразрыва. Фильтрующие тектонические трещины главной системы структурных ослаблений характеризуются углами $\alpha_п$ = 25° и $\beta_п$ = 72°. При этих углах и установленных значениях σ_x, σ_y и σ_z по формуле (4) находим сжимающие напряжения, нормальные к поверхности этих трещин: $\sigma_п$ = = 85,7 МПа. Следовательно, даже при полном отсутствии сцепления по этим трещинам, при $\varphi_п$ = 0, развиваемое насосным агрегатом давление было бы недостаточно для разгрузки этих трещин от сжимающих напряжений: 70,0 < 85,7 МПа.

Пространственное положение секущей системы закрытых трещин породного массива определяется углами $\alpha_с$ = 45°, $\beta_с$ = 65° при средней густоте $\Gamma_с \approx \Gamma_п \approx$ 0,I. Препятствующая сдвигу нормальная нагрузка на эти поверхности по формуле (I4) при известных значениях σ_x, σ_z, σ_y, $\alpha_с$ и $\beta_с$ составит I38,0 МПа. При вероятных значениях $[\tau_0] \approx$ 5 МПа, $\varphi_с$ = 0,2; $tg\,f$ = 0,3 давление, необходимое для сдвига структурных блоков, при $P_{пл}$ = 35,2 МПа по формуле (I3) составит I20,0 МПа. Поскольку $P_{г.ст} \approx P_{пл}$, необходимый напор насосного агрегата в этом случае должен был достигать $P_{п.с} = P_{г.с} - P_{пл}$ = I20,0 - 35,2 = 84,8 МПа. Однако уже при $P'_н$ = 70 МПа произойдет инициация, а при $P_н$ = 50,2 МПа будет развиваться вертикальная трещина, секущая структурные блоки. Таким образом, в условиях Тырныаузского эксперимента сдвиговые деформации возможны лишь на участках с весьма "гладкими" поверхностями секущих трещин ($tg\,f < 0,2$) и повышенной их густотой ($\Gamma_с > \Gamma_п$).

Рассмотренные примеры подтверждают пригодность расчетной методики СПГИ как для анализа экспериментальных результатов, так и для проектирования геотермального гидроразрыва. Разумеется, корректность расчетных результатов зависит не только от правильности формул, но и от достоверности исходных данных. Такие из них, как коэффициенты влияния тектонических напряжений, структурных ослаблений, концентрации напряжений, интегральной проницаемости, к сожалению, нельзя определить на образцах, поскольку они характеризуют особенности породного массива. До накопления достаточного статистического материала единственным путем к обоснованному выбору исходных значений φ, $k_т$, k_σ и k нужно считать пробный гидроразрыв. Значение Тырныаузского гидроразрыва для проектирования и создания в Тырныаузе геотермальной циркуляционной системы многократно превосходит затраченные на этот эксперимент средства и усилия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баклашов И.В. Деформации и разрушение породных массивов. М.: Недра, 1988.

2. Дядькин Ю.Д. Разработка геотермальных месторождений. М.: Недра, 1989.

3. Дядькин Ю.Д. Вопросы механики гидроразрыва горячих скальных пород // Зап. Санкт-Петерб. горн. ин-та. 1991. Т. 125.

4. Желтов Ю.П. Механика нефтегазоносного пласта. М.: Недра, 1975.

5. Dash Z., Murphy H. Estimating Fracture Aperture from hydraulic Date and Comperison with Theory. LAPL 85-20. Los Alamos, N.M.,1985

6. Duchane D. Hot Dry Rock : A Realistic Energy Option. Geothermal Resources Council Bulletin,1990,March.

7. Girstma J.A. Hafkens R. Comperison of theories for prediction width and extent of vertical hydraullical induced fractures. Int.Jnl. of Energy Resources Technology. Trans.ASME,1979,March.

8. Haimson B.C. Hydrofracturing Stress Measurements. Int. Jnl. Rock Mechanics and Mining Sciences. V. 26,# 6,1989,Dec.

9. Haimson B.C. Hydrofracturing Stress Measuring Method and recent results. Int. Jnl. Rock Mechanics and Mining Sciences,V. 12,# 4,1978.

10. Ito T.,Hayashy K. Physical Background to Breakdown Pressure in Hydraulic Fracturing Stress Measurement. Int. Jnl. Rock Mechanic and Mining Sciences.1991,V. 28,# 3.

11. Tester J.W.,Brown D.W.,Potter R.M. Hot Dry Rock Geothermal Energy - new Agenda for 21-st Century. LA - 11 574.UC - 251. Los Alamos, N.M. USA,1989,July.

12. Tester J.W.,Herzog H.J. Economic Prediction for Heat Mining: A Review and Analysis of Hot Dry Rock Geothermal Energy Technology.MIT - EL 90 - 001. Cambridge, Massachusetts, 1990,July.