

УДК 622.276.66

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СКВАЖИНЫ С ЭЛЛИПТИЧЕСКОЙ ТРЕЩИНОЙ ГИДРОРАЗРЫВА

Герасименко С.А.

ЗАО «ЕВРОТЭК», г. Тюмень

Стрекалов А.В.¹, Самойлов А.С.

Тюменский государственный нефтегазовый университет, г. Тюмень

e-mail: ¹ darlex77@mail.ru

***Аннотация.** Известно, что в условиях, когда горизонтальная скважина (ГС) не выполняет проектного назначения по выработке запасов нефти, недропользователями проводится комплекс мероприятий по интенсификации притока. К нему в частности относится и гидроразрыв пласта, проводимый в ГС по различным технологиям. Актуальность прогнозирования эффективности ГРП в ГС связана с практическими результатами его применения. В работе представлена аналитическая модель притока к ГС с трещиной ГРП.*

***Ключевые слова:** горизонтальная скважина, гидравлический разрыв пласта, ГРП, анизотропия, приток, эллиптическая трещина*

Известно, что в условиях, когда ГС не выполняет проектного назначения по выработке запасов нефти, недропользователями проводится комплекс мероприятий по интенсификации притока. К нему, в частности, относится и гидроразрыв пласта, проводимый в ГС по различным технологиям. Исследования, посвященные механизму трещинообразования при гидравлическом разрыве пласта в горизонтальных скважинах, и математическое моделирование этого процесса рассмотрено в работах Каневской Р.Д. [1], Мукминова И.Р. [2], Телкова А.П. [3, 4], Economides M. J. [5], Демаркоса А.С. [6] и др.

В данной работе рассматривается приток в ГС с трещиной ГРП с учетом развивающегося потока в трещине. Основными отличительными параметрами от существующих является геометрический учет несовершенства трещины относительно вертикали и латерали, известный по некоторым моделям как скин-эффект от штуцера [7]. Если скважина пробурена в направлении главного механического напряжения τ_2 , то возникает продольная вертикальная трещина. Если же она пробурена перпендикулярно механическим напряжениям τ_2 , то формируется поперечная горизонтальному стволу трещина.

Трещины, возникающие под углом к стволу скважины в плоскости гидроразрыва, со временем могут переориентироваться в поперечные трещины. Такой ограниченный доступ добываемой жидкости образует «штуцер», потенциально препятствующий притоку. На рис. 1 представлена расчетная схема эллиптической

наклонной трещины после проведения гидравлического разрыва пласта. На бесконечно малом участке dl в трещину толщиной b будет поступать приток из пласта dq . Необходимо решить задачу определения величины притока от линейных размеров трещины и распределения давления по длине трещины.

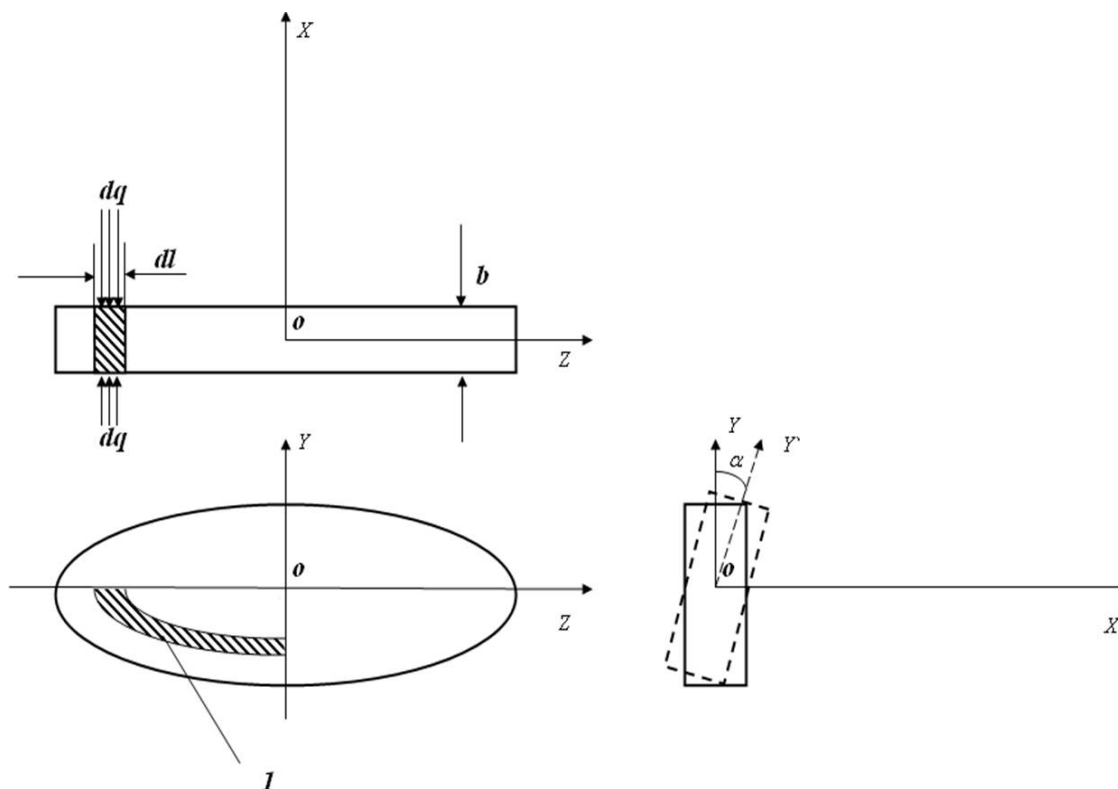


Рис. 1. Расчетная схема модели эллиптической вертикальной или наклонной трещины

Приток из матрицы в трещину выразим через $df_{mp} \approx 2\pi l \cdot dl$ при начальном пластовом давлении на бесконечно малом участке dl . Таким образом, приток жидкости в трещину будет описываться уравнением [8]:

$$\frac{dq}{dl} = \frac{2 \delta k \pi l \cdot (P_k - P)}{\mu R}, \quad (1)$$

где δ – критерий искривления фильтрационных потоков, который будет определяться в виде $\delta = \frac{h}{R} \left(\frac{k_z}{k} \cdot e^{\cos(\alpha)-1} \right)$; h – толщина пласта, м, R – радиус контура питания, м; k – проницаемость по латерали, м²; k_z – проницаемость по вертикали, м²; α – угол отклонения от вертикали, град, l – длина трещины, м, μ – динамическая вязкость жидкости, Па·с; P_k – давление на контуре питания, Па; P – давление в элементе Па.

Фильтрация жидкости в пласте вдоль трещины к точке «0» (рис. 1) описывается дифференциальным уравнением:

$$\frac{dp}{dl} = \frac{q\mu}{2b\pi l k_t}, \quad (2)$$

где k_t – проницаемость трещины, мкм².

На конце трещины (у забоя) граничными условиями являются:

$$\begin{aligned} q(L) &= Q; \\ p(L) &= P_k. \end{aligned}$$

Таким образом, движение жидкости в трещине описывается системой из двух дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dq}{dl} = \frac{2\delta k\pi l \cdot (P_c - p)}{\mu R} \\ \frac{dp}{dl} = \frac{q\mu}{2b\pi l k_t} \end{cases}. \quad (3)$$

Решая систему дифференциальных уравнений, найдем распределение давления по трещине

$$p(l) = J_0\left(\sqrt{\frac{2\delta k}{bk_t R}} \cdot l\right) \cdot (P_c - P_k) + P_k, \quad (4)$$

и зависимость притока в трещину от линейных размеров

$$q(l) = \frac{-2\pi\sqrt{2}\sqrt{\frac{\delta k}{bk_t R}} \cdot J_1\left(\sqrt{\frac{2\delta k}{bk_t R}} \cdot l\right) \cdot (P_c - P_k) \cdot b \cdot k_z}{\mu}. \quad (5)$$

Решение осуществлялось в пакете Maple.

Приток из трещины к забою горизонтальной скважины описывается следующим уравнением

$$Q = \frac{\int_0^L q(l, \delta, k, p_c, p_k, R, k_t, b, \mu) dl}{L}. \quad (6)$$

После интегрирования получаем, что

$$Q = \frac{1}{\mu} \left[b \pi^2 k_t \cdot \begin{pmatrix} J_0\left(\sqrt{\frac{2\delta k}{bk_t R}} \cdot L\right) \cdot \phi\left(1, \sqrt{\frac{2\delta k}{bk_t R}} \cdot L\right) - \\ J_1\left(\sqrt{\frac{2\delta k}{bk_t R}} \cdot L\right) \cdot \phi\left(1, \sqrt{\frac{2\delta k}{bk_t R}} \cdot L\right) \end{pmatrix} (P_c - P_k) \right], \quad (7)$$

где J_0, J_1 – функция Бесселя первого рода;

ϕ – функция Струве.

На рис. 2 представлена зависимость притока из трещины, от забойного давления – P_c и параметра δ . Из формы поверхности видно, что при уменьшении забойного давления величина притока жидкости из трещины увеличивается пропор-

ционально, то есть данная зависимость описывается линейным законом фильтрации. При изменении критерия искривления фильтрационных потоков δ в сторону увеличения (уменьшения), данный процесс может происходить при увеличении (уменьшении) разницы вертикальной и горизонтальной проницаемости или при увеличении толщины пласта (уменьшении), либо изменении угла наклона трещины к горизонтальной плоскости в сторону увеличения (уменьшения), величина притока жидкости изменяется не линейно. И чем больше депрессия, тем заметнее влияние критерия искривления фильтрационных потоков на величину притока жидкости из трещины.

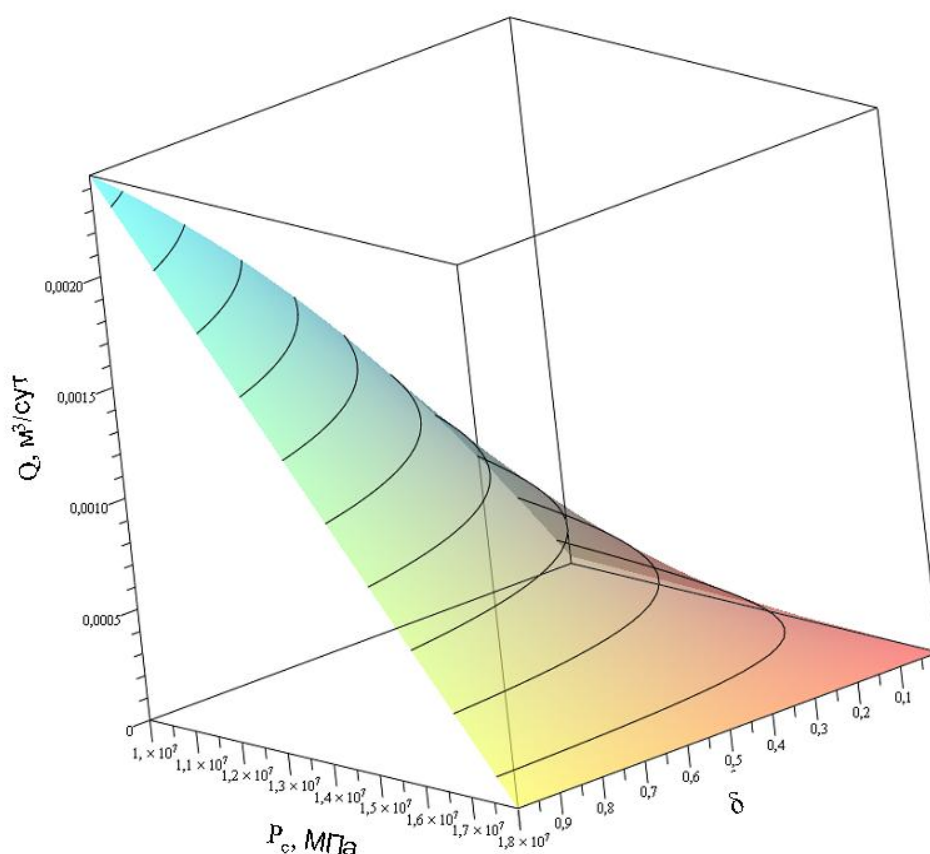


Рис. 2. Зависимость притока из трещины от забойного давления P_c и параметра δ

На рис. 3 представлена зависимость величины притока из трещины к точке забоя от линейных размеров трещины при фиксированных значениях проницаемости, проницаемости трещины, динамической вязкости пластового флюида, ширины трещины, пластового и забойного давлений и постоянного радиуса контура питания. Из зависимости видно, что при увеличении длины трещины величина притока будет увеличиваться нелинейно, при длине трещины 0 - 20 м более интенсивно, а при длинах 100 и более метров кривая будет выполаживаться и влияние не столь ощутимо, положение этой «полки» будет зависеть от проницаемости трещины. Кривая выположится полностью, когда проницаемость трещины уже не

будет обеспечивать необходимого давления для притока из матрицы. Из вышесказанного можно сделать вывод о том, что оптимальная длина трещины равна 80-90 м.

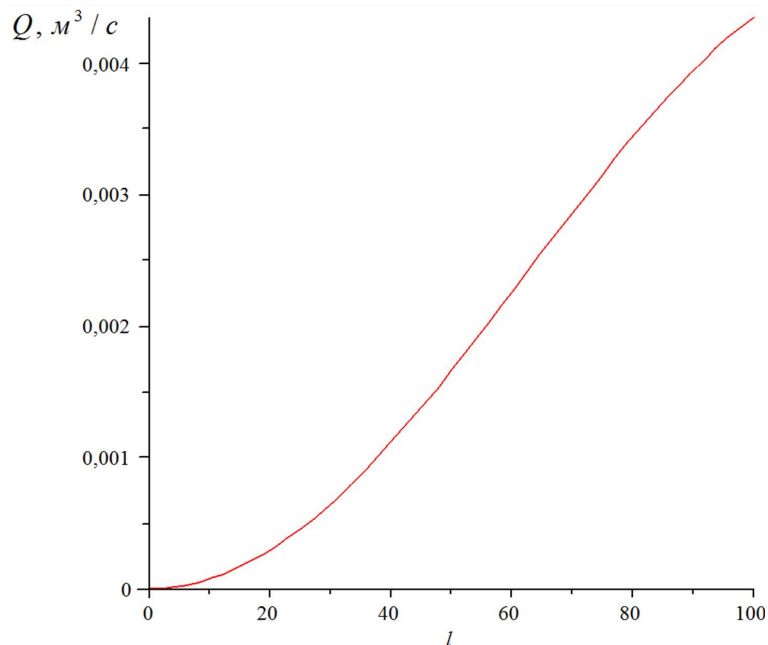


Рис. 3. Приток в трещину из матрицы от точки забоя при $k=100 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$, $k_t=10000 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$, $\mu=0,001 \text{ Па} \cdot \text{с}$, $b=0,01 \text{ м}$, $P_{пл}=18 \text{ МПа}$, $P_c=10 \text{ МПа}$, $R=500 \text{ м}$

На рис. 4 представлена зависимость значения дебита по трещине от ее длины при фиксированных значениях k , k_t , μ , b , $P_{пл}$, P_c , R .

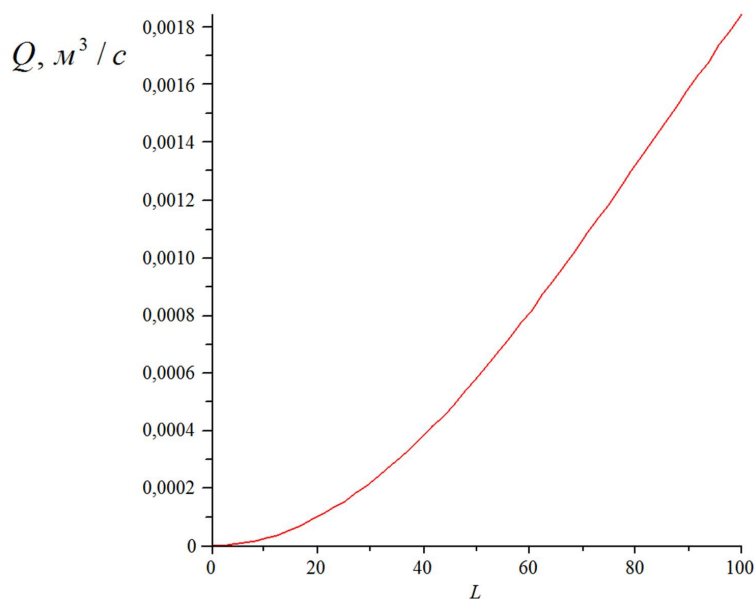


Рис. 4. Зависимость дебита по трещине от ее длины при $k=10 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$, $k_t=10000 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$, $\mu=0,001 \text{ Па} \cdot \text{с}$, $b=0,01 \text{ м}$, $P_{пл}=18 \text{ МПа}$, $P_c=10 \text{ МПа}$, $R=500 \text{ м}$

На основе аналитической модели стационарного однофазного притока выявлено влияние изменения зенитного угла трещины гидроразрыва на величину удельного дебита горизонтального ствола.

По результатам проведенных работ получены следующие выводы и результаты:

– создана модель, позволяющая прогнозировать приток из матрицы в трещину с дальнейшим продвижением по ней к стволу скважины в зависимости от линейных размеров трещины, а также распределения давления по длине трещины;

– создана модель совместного притока из трещины и горизонтального ствола, учитывающая анизотропию пласта, угол наклона трещины к стволу, факторы искривления фильтрационных потоков;

Литература

1. Каневская Р.Д. Математическое моделирование разработки месторождений нефти и газа с применением гидравлического разрыва пласта. М.: Недра-Бизнесцентр, 1999. 212 с.

2. Мукминов И.Р. Об эффективности гидроразрыва пласта в горизонтальных скважинах // Нефтепромысловое дело. 1998. № 5. С. 29 - 32.

3. Ушаков А.С., Телков А.П. Методика прогнозирования оптимальной длины поперечных полутрещин гидроразрыва пласта в горизонтальных стволах и рентабельных дебитов во времени // Территория Нефтегаз. 2010. № 11. С. 36 - 38.

4. Ушаков А.С., Телков А.П. Геолого-физические критерии при подборе скважин для проведения ГРП // Новые технологии для ТЭК Западной Сибири: Сб. науч. тр., 4 научн.-техн. конф., Тюмень: ТюмГНГУ, 2010. С. 40 - 44.

5. Экономидес М., Олини Р., Валько П. Унифицированный дизайн гидроразрыва пласта. Наведение мостов между теорией и практикой. Перевод: М. Углов. Москва, 2004. 148 с. (Transl. from: Economides M., Oligney R., Valkó, P. Unified Fracture Design – Bridging the gap between theory and practice, Orsa Press, Alvin, Texas, 2002. 262 p.)

6. Demarchos A.S., Porcu A.S., Economides M.J. Blazing the Way in Horizontal Well Fracturing in Algeria: The First Successful Transverse Multi-Fractured Well // SPE Russian Oil and Gas Technical Conference and Exhibition, 3-6 October 2006, Moscow, Russia. Paper SPE 102263-MS. DOI: 10.2118/102263-MS

7. Cinco-Ley H., Samaniego F. Transient Pressure Analysis: Finite Conductivity Fracture Case Versus Damage Fracture Case // 1981 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, TX, Oct. 5-7, 1981. Paper SPE 10179.

8. Климов М.Ю. Разработка и исследование нефтяных месторождений с использованием горизонтальных скважин. Дисс. ... к.т.н. Тюмень, 2009. С. 16 - 17.

MATHEMATICAL MODELING OF HORIZONTAL WELLS WITH ELLIPTICAL FRACTURE

S.A. Gerasimenko,
Eurotek CJSC, Russia, Tyumen

A.V. Strekalov¹, A.S. Samoilov
Tyumen State Oil and Gas University, Russia, Tyumen
e-mail: ¹darlex77@mail.ru

Abstract. *It is known that in a situation where a horizontal well is not fulfilling the project purpose to develop oil reserves, mining companies carried out a set of actions for the stimulation. To him in particular applies to hydraulic fracturing, held in the horizontal well by different technologies. The urgency of predicting the effectiveness of hydraulic fracturing in the horizontal well associated with the practical results of its application. The paper presents an analytical model of flow to the horizontal well fracture.*

Keywords: *horizontal wells, hydraulic fracturing, anisotropy, flow, elliptic crack*

1. Kanevskaya R.D. Matematicheskoe modelirovanie razrabotki mestorozhdenii nefti i gaza s primeneniem gidravlicheskogo razryva plasta (Mathematical modeling of the oil and gas fields development with using hydraulic fracturing). Moscow: OOO Nedra-Biznestsentr, 1999. 212 p.

2. Mukminov I.R. Ob effektivnosti gidrorazryva plasta v gorizont'al'nykh skvazhinakh (The effectiveness of hydraulic fracturing in horizontal wells), *Neftepromyslovoe delo*, 1998, Issue 5, pp. 29 - 32.

3. Ushakov A.S., Telkov A.P. Metodika prognozirovaniya optimal'noi dliny poperechnykh polutreshchin gidrorazryva plasta v gorizont'al'nykh stvolakh i rentabel'nykh debitov vo vremeni (Method for predicting the optimal length of a semi-transverse cracks for hydraulic fracturing in horizontal trunks and profitable production rates over time), *Territoriya Neftegaz*, 2010, Issue 11, pp. 36 - 38.

4. Ushakov A.S., Telkov A.P. Geologo-fizicheskie kriterii pri podbore skvazhin dlya provedeniya GRP (Geological and physical criteria in the selection of wells for fracturing) in *Novye tekhnologii dlya TEK Zapadnoi Sibiri (New technologies for oil and gas in Western Siberia. Proceedings of IV sci.-tech. conf)*, Tyumen, TyumGNGU, 2010. PP. 40 - 44.

5. Economides M., Oligney R., Valkó, P. Unified Fracture Design – Bridging the gap between theory and practice, Orsa Press, Alvin, Texas, 2002. 262 p.

6. Demarchos A.S., Porcu A.S., Economides M.J. Blazing the Way in Horizontal Well Fracturing in Algeria: The First Successful Transverse Multi-Fractured Well, Paper SPE 102263 presented at *SPE Russian Oil and Gas Technical Conference and Exhibition*, 3-6 October 2006, Moscow, Russia. DOI: 10.2118/102263-MS

7. Cinco-Ley H., Samaniego F. Transient Pressure Analysis: Finite Conductivity Fracture Case Versus Damage Fracture Case. Paper SPE 10179 presented at the 1981 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, TX, Oct. 5-7, 1981

8. Klimov M.Yu. Razrabotka i issledovanie neftyanykh mestorozhdenii s ispol'zovaniem gorizonta'nykh skvazhin (Oil field development and investigation using horizontal wells). PhD Thesis. Tyumen, 2009.