

Модель для экспресс оценок дизайна ГРП с использованием приближенного аналитического решения

Gazpromneft NTC: Developing Inhouse 3D Hydrofracturing Models



2018 Halliburton, все права защищены
2018 Halliburton Rights Reserved

Шель Е.В., Падерин Г.В.
(ООО «Газпромнефть НТЦ»)

Shel Egor Vladimirovich, Paderin Grigory Vladimirovich
(LLC Gazpromneft Science & Technology Center)

В работе приводится аналитическое решение модели Pseudo3D для гидроразрыва пласта в упрощенной геомеханической постановке. Задача решается в безразмерных параметрах для обеспечения универсальности решения. Строятся графики безразмерной длины от высоты, а также график Aspect ratio трещины для разных.

Полученное решение позволяет быстро находить геометрию трещины при развитии ГРП, а также оценить нужный объем закачки жидкости ГРП для достижения нужной длины трещины, в том числе и при гибридном ГРП с несколькими жидкостями.

Введение

Гидроразрыв пласта (ГРП) – основной метод интенсификации нефтедобычи в традиционных и нетрадиционных коллекторах. Планирование, сопровождение и оптимизация операций ГРП осуществляется с использованием специализированных программных пакетов. Например, MFrac, FracPro, FracCADE, Mangrove, которые либо продаются добывающим и нефтесервисным компаниям, либо являются внутренними разработками нефтесервисных компаний, и расчеты в них предоставляются только как часть сервисных услуг. Все

This paper provides an analytical solution for the Pseudo3D model for hydrofracturing in a simplified geomechanical setting. The problem is solved in dimensionless parameters to ensure the universality of the solution. Dimensional lengths on height are plotted.

The obtained solution allows to quickly find the geometry of the fracture during the development, as well as to estimate the required volume of fluid injection to achieve the desired fracture length, including for hybrid hydrofracturing with several fluids.

Introduction

Hydrofracturing is the basic method to stimulate oil production in conventional and unconventional reservoirs. Customized software packages are used for planning, support and optimization of hydrofracturing operations. For example, software packages MFrac, FracPro, FracCADE, Mangrove are either sold to operators and oilfield service companies or represent in-house products of the oilfield service companies, and calculations made using the packages are only provided as a part of the services. All hydrofracturing run on the assets of Gazprom Neft PJSC are imported ones, and it is highly difficult to purchase licenses (services) for them due to sanctions. Therefore, the development of own solutions to hydrofracturing design simulation is

применяемые симуляторы ГРП на активах компании ПАО «Газпром нефть» является импортными, приобретение лицензий (услуг) которых в связи с санкционными ограничениями значительно затруднено. Поэтому, разработка собственных подходов математического моделирования дизайна ГРП является одной из приоритетных задач в отрасли в рамках стратегии импортозамещения.

Основные аналитические решения (PKN, KGD, Radial) в теории ГРП получены в 50-70х годах двадцатого века. Из этих трех моделей наиболее адекватной для месторождений западной Сибири является модель PKN [1,2]. Однако, даже она не учитывает строение геологического разреза. Для учета этого стали разрабатываться численные модели такие, как Pseudo3D, Planar3D и Full3D, задействующие значительные вычислительные ресурсы. В данной же работе делается акцент на получении прокси и аналитического решения в Pseudo3D постановке.

Положения Pseudo-3D модели

Псевдотрехмерная модель [3,4] (см. рис 1) является по сути расширением модели PKN и строится на следующих предположениях:

1) Трещина растёт в плоскости, перпендикулярной минимальному горному напряжению, которое на больших глубинах имеет горизонтальное направление. Трещина растёт симметрично вправо и влево, а потому во многих симуляторах рисуется только одно крыло трещины. В нашей модели также имеется симметрия по вертикали

2) В моделях, описывающих трещину ГРП, вводится так называемое чистое давление $p = p_f - \sigma_0$, где p_f – полное давление флюида, а σ_0 – горное давление в коллекторе. На краю трещины полудлины L раскрытие $w=0$, а значит из уравнений линейной механики хрупкого разрушения $p(L)=0$. Сама граница трещины определяется двумя функциями $L(t)$ и $h(x,t)$. В представленной ниже формулировке эти функция заменены на $L(h_0)$ и $h(x, h_0)$ т.к. в нашей постановке для любого времени t соответствует свое значение h_0 – высоты трещины в центре, а значит и само время представимо как $t(h_0)$.

3) Вертикальный поток жидкости считается пренебрежимым по сравнению с горизонтальным. Это выполняется, когда основной рост трещины идет по горизонтали. В каждом вертикальном сечении выписывается закон сохранения массы, горизонтальный поток усредняется по вертикали.

one of the top-priority tasks of the branch within the framework of the import substitution strategy.

Basic analytical solutions (PKN, KGD, Radial) in the hydrofracturing theory were developed in 50-70s of the twentieth century. The PKN model [1,2] is the one of these three models that suits the fields in Western Siberia the best. Still, even this model does not cover the geological section structure. To take that into account, the development of such numerical models as Pseudo3D, Planar3D and Full3D, demanding high computing power was initiated. Besides, this paper puts a focus on obtaining of proxy and analytical solution in the Pseudo3D setting.

Assumptions of Pseudo-3D Model

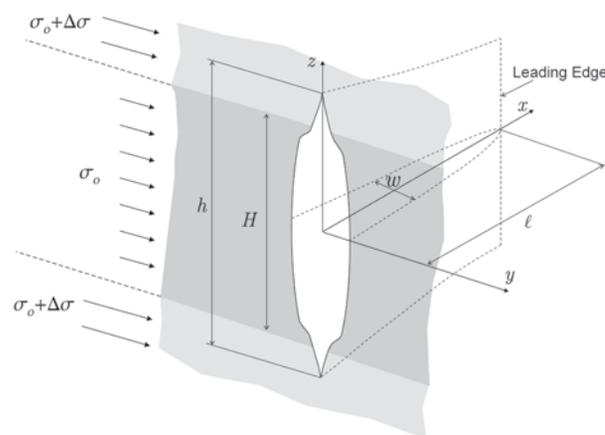


Рис. 1. Модель Pseudo3D [6]

Fig. 1. Pseudo3D model [6]

The Assumptions model [3,4] (see Fig. 1) actually represents an extension of the PKN model, and it is based on the following assumptions:

1) A fracture is developing within the plane oriented at the right angle to the minimum rock stress that has a horizontal direction at higher depths. The fracture grows in size symmetrically to the right and to the left, that's why only one fracture wing is plotted in many simulators. Our model also features a symmetry in the vertical plane.

2) For the models describing a hydraulic fracture a so called net pressure $p = p_f - \sigma_0$ is introduced, where p_f is total fluid pressure and σ_0 is rock pressure in the reservoir. At the edge of the fracture with half-length L opening of the fracture makes $w=0$, and from elastic fracture mechanics equations it follows that $p(L)=0$. The fracture border itself is defined by two functions $L(t)$ and $h(x,t)$. In the formula below these functions are substituted with $L(h_0)$ and $h(x, h_0)$ as in our setting any time t corresponds to unique

4) Раскрытие трещины в каждом профиле определяются условиями плоской деформации. Это приближение следует из основного предположения $h \ll L$. Однако на кончике трещины это приближение все равно не выполняется.

5) Утечки в пласт рассчитываются по формуле Картера, в предположении одномерного течения около контура трещины.

Математическая постановка

Из плоской теории упругости [5] следует формула для профиля трещины высоты h с продуктивным слоем толщины H , контрастом напряжений $\Delta\sigma$ и трещинностойкостью соседних слоев K_I , модулем Юнга E и коэффициентом Пуассона ν :

$$\tilde{w} = \frac{2K}{\pi\sqrt{\lambda}} \sqrt{\lambda^2 - 4z^2} + \frac{4}{\pi} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{\sqrt{\lambda^2 - 4z^2} + \sqrt{\lambda^2 - 1}}{\sqrt{\lambda^2 - 4z^2} - \sqrt{\lambda^2 - 1}} \right] - \tilde{z} \ln \frac{\sqrt{\lambda^2 - 4z^2} + 2\tilde{z}\sqrt{\lambda^2 - 1}}{\sqrt{\lambda^2 - 4z^2} - 2\tilde{z}\sqrt{\lambda^2 - 1}}; \lambda > 1$$

$$\tilde{w} = \frac{2K}{\pi\sqrt{\lambda}} \sqrt{\lambda^2 - 4z^2}; \lambda < 1$$

Здесь введены безразмерные параметры [6]:

$$\lambda = \frac{h}{H}; \tilde{z} = \frac{z}{H}; K = \sqrt{\frac{2\pi K_I}{H \Delta\sigma}}; \tilde{p} = \frac{p}{\Delta\sigma}; \tilde{w} = \frac{wE'}{H\Delta\sigma}$$

Здесь $E' = \frac{E}{(1-\nu^2)}$ – модуль плоской деформации. В безразмерном виде профиль трещины зависит только от безразмерной трещинностойкости K , которая для пластовых условий, как правило, не велика, и слабо влияет на раскрытие, и безразмерной высоты λ .

$$Q(x) = - \frac{\partial p}{\partial x} \frac{1}{12\mu} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} w^3 dz = - \frac{\partial \tilde{p}}{\partial \tilde{x}} \frac{\Delta\sigma^4 H^4}{12\mu L E'^3} \int_{-\frac{\lambda}{2}}^{\frac{\lambda}{2}} \tilde{w}^3 d\tilde{z}$$

Основным уравнением развития трещины является закон сохранения массы для одномерного течения:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{2C_1 H}{\sqrt{t - t_0(x)}} = 0$$

где C_1 – коэффициент утечек по Картеру, а S – площадь сечения вертикального профиля трещины.

Построение прокси моделей

Основная идея при построении прокси моделей состоит в отказе от численного решения путем построения разностных схем, как традиционным подходе Cell-based Pseudo3D [6]. За место этого предлагается использовать известные аналитические решения и проводить их сшивку. Например, в работе [7] предлагается для нахождения профиля ширины по высоте использовать точное аналитическое решение, для нахождения высоты - критерий Ирвина, для

value h_0 - fracture height in the center, consequently the time itself may be expressed as $t(h_0)$.

3) The vertical fluid flow is considered negligible as compared to the horizontal fluid flow. That is the case when the fracture mainly grows in the horizontal plane. The law of conservation of mass is applied to every vertical section, while the horizontal flow is averaged in the vertical plane.

4) Fracture opening in each profile depends on plane-strain conditions. This approximation follows from the basic assumption $h \ll L$. Still, on the fracture tip this approximation has no effect as well.

5) Leaks to a reservoir are calculated by the Carter formula based on the assumption of one-dimensional flow next to the fracture periphery.

Mathematical Setting

On the basis of flat elasticity theory [5] the below formula is derived for the profile of a fracture with height h with producing reservoir having thickness H , stress contrast $\Delta\sigma$ and toughness of adjacent layers K_I , Young's modulus E , and Poisson's ratio ν :

$$\tilde{w} = \frac{2K}{\pi\sqrt{\lambda}} \sqrt{\lambda^2 - 4z^2} + \frac{4}{\pi} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{\sqrt{\lambda^2 - 4z^2} + \sqrt{\lambda^2 - 1}}{\sqrt{\lambda^2 - 4z^2} - \sqrt{\lambda^2 - 1}} \right] - \tilde{z} \ln \frac{\sqrt{\lambda^2 - 4z^2} + 2\tilde{z}\sqrt{\lambda^2 - 1}}{\sqrt{\lambda^2 - 4z^2} - 2\tilde{z}\sqrt{\lambda^2 - 1}}; \lambda > 1$$

$$\tilde{w} = \frac{2K}{\pi\sqrt{\lambda}} \sqrt{\lambda^2 - 4z^2}; \lambda < 1$$

Dimensionless parameters are introduced here [6]:

$$\lambda = \frac{h}{H}; \tilde{z} = \frac{z}{H}; K = \sqrt{\frac{2\pi K_I}{H \Delta\sigma}}; \tilde{p} = \frac{p}{\Delta\sigma}; \tilde{w} = \frac{wE'}{H\Delta\sigma}$$

Here $E' = \frac{E}{(1-\nu^2)}$ is plane strain modulus. In the dimensionless form the fracture profile only depends on dimensionless fracture toughness K , which as a rule is rather low in reservoir conditions and has a little effect on fracture opening, and on dimensionless height λ .

In the same manner, the Poiseuille equation is derived for the one-dimensional flow in the fracture:

$$Q(x) = - \frac{\partial p}{\partial x} \frac{1}{12\mu} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} w^3 dz = - \frac{\partial \tilde{p}}{\partial \tilde{x}} \frac{\Delta\sigma^4 H^4}{12\mu L E'^3} \int_{-\frac{\lambda}{2}}^{\frac{\lambda}{2}} \tilde{w}^3 d\tilde{z}$$

The basic equation for fracture development is the law of conservation of mass for one-dimensional flow:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{2C_1 H}{\sqrt{t - t_0(x)}} = 0$$

where, C_1 is leakage factor according to the Carter formula, and S is cross-sectional area of the fracture vertical profile.

нахождения длины – решение PKN, а сшивку проводить по чистому давлению в отличии от предшествующих работ, например [8], где для нахождения чистого давления использовалось некорректное приближение, а сшивка проводилась по значению высоты.

Получение аналитического решения

Получение приближенного аналитического решения стало возможным благодаря выделению новых безразмерных параметров отсутствующих в [6], а именно:

$$A\lambda_0\gamma\bar{Q}(\bar{x}) = -\frac{\partial\bar{p}}{\partial\bar{x}}\frac{1}{12}\int_{-\frac{\lambda}{2}}^{\frac{\lambda}{2}}\bar{w}^3d\bar{z}; \gamma = \frac{\mu E'^3 Q}{\Delta\sigma^4 H^3}; \bar{Q}(\bar{x}) = \frac{Q(\bar{x})}{Q}$$

$$\frac{L(h_0)}{h_0}$$

Здесь $A(h_0) = \frac{h_0}{L(h_0)}$ – «половинный» aspect ratio

трещины, а $\gamma = \frac{\mu E'^3 Q}{\Delta\sigma^4 H^3}$ – малый параметр задачи, разложение по которому и позволяет нам получить новое аналитическое решение для задачи.

Физический смысл параметра γ заключается в отношении толщины пласта к характерной достижимой длине трещины. Чем меньше γ , тем больше получается длина трещины.

Для дальнейшего решения задачи выписывается безразмерная проницаемость трещины,

$$g(\lambda, K) = \frac{1}{12}\int_{-\frac{\lambda}{2}}^{\frac{\lambda}{2}}\bar{w}^3d\bar{z}$$

Для выделения безразмерных параметров выделяется безразмерное время:

$$\frac{t}{H^3\Delta\sigma} = \tau(\lambda_0)$$

И получается следующее уравнение:

$$\frac{\partial}{\partial\bar{x}}\left(-\frac{1}{A\lambda_0}\frac{\partial\bar{p}}{\partial\bar{x}}g(\lambda(\lambda_0, \bar{x}), K)\right) + A\lambda_0\gamma\frac{\partial\bar{s}}{\partial\tau} + 2A\lambda_0\bar{c}\frac{1}{\sqrt{\tau - \tau_0(\bar{x})}} = 0$$

Оно дополняется граничным условием на поток в правую половину в начале трещины:

$$-\frac{1}{A\lambda_0}\frac{\partial\bar{p}}{\partial\bar{x}}\frac{\Delta\sigma^4 H^3}{\mu E'^3}g(\lambda_0, K) = \frac{Q}{2}; \bar{x} = 0$$

Или же:

$$-\frac{\partial\bar{p}}{\partial\bar{x}}g(\lambda_0, K) = \frac{1}{2}A\lambda_0\gamma; \bar{x} = 0$$

Proxy Model Building

The fundamental idea for proxy model building consists in abandonment of numerical solution through development of difference schemes same as in the conventional Cell-based Pseudo3D approach [6]. It is suggested using the known analytical solutions instead, and cross linking those solutions. For example, the authors of paper [7] suggest using the accurate analytical solution to calculate the width profile by height, the Irwin criterion to calculate height, the PKN solution to calculate length, and cross linking on the basis of net pressure as opposed to the previous papers, for example [8], where an incorrect approximation was used to calculate net pressure, and cross linking was done with reference to the height value.

Obtaining of Analytical Solution

It is now possible to obtain an approximate analytical solution due to derivation of new dimensionless parameters missing in [6], namely:

$$A\lambda_0\gamma\bar{Q}(\bar{x}) = -\frac{\partial\bar{p}}{\partial\bar{x}}\frac{1}{12}\int_{-\frac{\lambda}{2}}^{\frac{\lambda}{2}}\bar{w}^3d\bar{z}; \gamma = \frac{\mu E'^3 Q}{\Delta\sigma^4 H^3}; \bar{Q}(\bar{x}) = \frac{Q(\bar{x})}{Q}$$

Where, $A(h_0) = \frac{L(h_0)}{h_0}$ is a half aspect ratio of a fracture,

and $\gamma = \frac{\mu E'^3 Q}{\Delta\sigma^4 H^3}$ is a small parameter of the mathematical problem, and expansion with respect to that parameter makes it possible to obtain a new analytical solution of the problem.

The physical meaning of parameter γ is the ratio of reservoir thickness and characteristic obtainable fracture length. The lower γ , the longer the fracture is.

For further problem solution dimensionless permeability of fracture is derived as

$$g(\lambda, K) = \frac{1}{12}\int_{-\frac{\lambda}{2}}^{\frac{\lambda}{2}}\bar{w}^3d\bar{z}$$

To derive dimensionless parameters, nondimensionalized time is to be calculated as follows:

$$\frac{t}{H^3\Delta\sigma} = \tau(\lambda_0)$$

and the following equation is obtained:

$$\frac{\partial}{\partial\bar{x}}\left(-\frac{1}{A\lambda_0}\frac{\partial\bar{p}}{\partial\bar{x}}g(\lambda(\lambda_0, \bar{x}), K)\right) + A\lambda_0\gamma\frac{\partial\bar{s}}{\partial\tau} + 2A\lambda_0\bar{c}\frac{1}{\sqrt{\tau - \tau_0(\bar{x})}} = 0$$

It is supplemented by the boundary condition of flow to the right half in the fracture origin:

$$-\frac{1}{A\lambda_0}\frac{\partial\bar{p}}{\partial\bar{x}}\frac{\Delta\sigma^4 H^3}{\mu E'^3}g(\lambda_0, K) = \frac{Q}{2}; \bar{x} = 0$$

Здесь выделен безразмерный параметр утечек, который для большинства трещин является малым. Стоит отметить, что это параметр влияния утечек на форму, параметр «мгновенных» утечек. «Интегральный» параметр утечек как правило больше на несколько порядков. Этот параметр характеризует именно эффективность жидкости и итоговый объем трещины, но не её форму.

Аналитическое решение получается, если отбросить все члены в уравнении с малыми параметрами. Тогда, с учётом граничного условия, получается уравнение:

$$G(\lambda(\lambda_0, \tilde{x}), K) = (1 - \tilde{x})G(\lambda_0, K)$$

Которое означает, что поток жидкости вдоль трещины постоянен, то есть оттоки по вертикали пренебрежимо малы. Это и есть основное положение модели Pseudo3D.

Интегрируя уравнение по частям, получаем соотношение в квадратурах:

Где $G(\lambda_0, K)$ – универсальная функция, характеризующая достигаемую обезразмеренную длину трещины при данной высоте, и имеет универсальный характер.

$$G(\lambda, K) = \int_1^{\lambda(\lambda_0, \tilde{x})} \frac{\partial \tilde{p}}{\partial \lambda} g(\lambda, K) d\lambda; G_\lambda(\lambda, K) = \frac{\partial \tilde{p}}{\partial \lambda} g(\lambda, K)$$

Её графики для разных значений параметра $K \in (0,1)$ представлены ниже:

Полудлина трещины L находится по формуле:

$$L(\lambda_0, K) = H * \frac{2G(\lambda_0, K)}{\gamma}$$

Здесь видно, что выделенный нами безразмерный параметр γ является единственным параметром, на который влияет дизайн ГРП, и который может влиять на длину трещины.

Данные решения без труда обобщаются и на гели ГРП степенной реологии по той же схеме. Данное приближённое решение постоянного потока позволяет не только получать форму трещины для какого-то одного геля ГРП, но и для трещины, созданной разными гелями ГРП, применёнными поочерёдно.

Or:

$$-\frac{\partial \tilde{p}}{\partial \tilde{x}} g(\lambda_0, K) = \frac{1}{2} A \lambda_0 \gamma; \tilde{x} = 0$$

The dimensionless leakage parameter being low for most fractures has been derived here. It should be noted that this is a parameter related to the shape dependant on leakage rate, an «instant» leakage parameter. The «integral» leakage parameter is as a rule several orders higher. This parameter characterizes exactly fluid efficiency and total volume of a fracture but not its shape.

To obtain an analytical solution, one should omit all terms in the equation containing small parameters. Thereupon, the following equation is obtained with account of the boundary condition:

$$G(\lambda(\lambda_0, \tilde{x}), K) = (1 - \tilde{x})G(\lambda_0, K)$$

The equation indicates the continuous flow of fluid along the fracture, i.e. outflows in the vertical plane are negligible. This is exactly the basic provision of the Pseudo3D model.

On integrating the equation in parts, we obtain the following ratio in quadratures:

Where, $G(\lambda_0, K)$ is a universal function which characterizes the obtainable nondimensionalized fracture length for the given height.

$$G(\lambda, K) = \int_1^{\lambda(\lambda_0, \tilde{x})} \frac{\partial \tilde{p}}{\partial \lambda} g(\lambda, K) d\lambda; G_\lambda(\lambda, K) = \frac{\partial \tilde{p}}{\partial \lambda} g(\lambda, K)$$

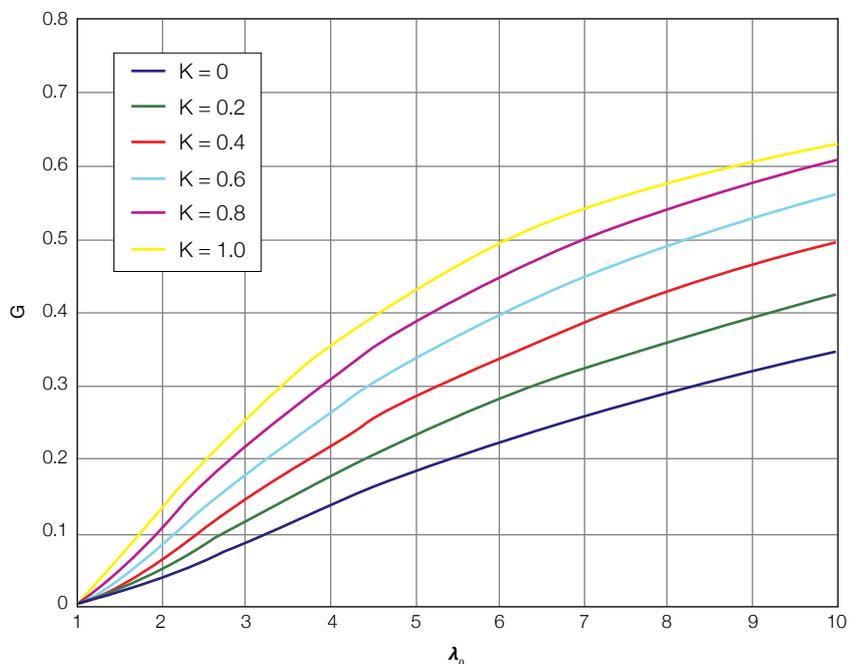


Рис. 2. функция $G(\lambda, K)$ при $K \in (0,1)$ от возможных значений λ_0 .
Fig. 2. Function $G(\lambda, K)$ at $K \in (0,1)$ of possible values λ_0 .

Пример расчета для гибридного ГРП изображен на рис. 3.

Выводы

В работе обозначены основные подходы моделирования ГРП в Pseudo3D постановке. Основным преимуществом прокси и приближенного аналитического решения является отсутствие необходимости построения численного решения нелинейного уравнения 2ого порядка.

Также стоит отметить, что аналитическое решение выполнено в безразмерных переменных и зависит от трех безразмерных параметров, что позволяет определить степень влияния литологии пласта и реологии жидкости на достижимые значения геометрии трещины ГРП. Также, отличительной особенностью данного решения является принципиальная возможность моделировать гибридный ГРП.

Литература

[1] T.K. Perkins and L.R. Kern. Widths of hydraulic fractures. J. Pet. Tech., Trans. AIME, 222:937-949, 1961.

[2] R.P. Nordgren. Propagation of vertical hydraulic

fractures. Its graphs related to various values of parameter $K\epsilon(0,1)$ are given below:

Fracture half-length L is calculated by the formula:

$$L(\lambda_0, K) = H * \frac{2G(\lambda_0, K)}{\gamma}$$

From the above formula it follows that the derived dimensionless parameter γ is the only parameter which depends on the hydrofracturing design and may affect fracture length.

This approximate solution for continuous flow makes it possible to obtain a fracture shape not only for any hydrofracturing gel but for the fracture created using different hydrofracturing gels applied one-by-one. The sample calculation for hybrid hydrofracturing is shown in Fig. 3.

Conclusions

The paper gives the basic approaches to hydrofracturing simulation in the Pseudo3D setting. The main advantage of proxy and approximate analytical solution is that it is not necessary to build a numerical solution of a second-order non-linear equation.



Российский Круглый Стол по Бурению



2018

6-й Российский Круглый
Стол по Бурению

12 Апреля 2018 Москва

Ведущий российский форум для буровых профессионалов

Свыше 250 высококвалифицированных представителей ведущих российских нефтегазовых и буровых компаний

Презентации по технологиям бурения от российских и международных нефтегазовых операторов

Технологически ориентированные дискуссии за круглыми столами

**ЗАЯВИТЕ О СВОЕМ УЧАСТИИ
УЖЕ СЕЙЧАС!**

fractures. J. Pet. Tech., 253:306–314, 1972. (SPE 3009).

[3] A. Settari and M. P. Cleary. Development and testing of a pseudo-three-dimensional model of hydraulic fracture geometry (p3dh). In Proc. 6th SPE Symposium on Reservoir Simulation of

[4] B. R. Meyer. Design formulae for 2d and 3-d vertical hydraulic fractures: Model comparison and parametric studies. In Proc. Unconventional Gas Technology Symposium, pages 391–408. SPE 15240, 1986.

[5] N.I. Muschelahvili. Some basic problems of the mathematical theory of elasticity. P. Noordhoff, Groningen, The Netherlands, 1953.

[6] J.I. Adachi, E. Detournay, A.P. Pierce. An Analysis of the Classical Pseudo-3D Model for Hydraulic Fracture with Equilibrium Height Growth across Stress Barriers, Int. J. of Rock Mechanics & Mining Sciences, Volume 47, Issue 4: 625–639, June 2010.

[7] G.V. Paderin. Modified Approach to Incorporating Hydraulic Fracture Width Profile in Unified Fracture Design Model, SPE Russian Petroleum Technology Conference, 2016, (SPE 182034)

[8] M.J. Economides, Olygney R.E, Valko P.P. Unified Fracture Design, Texas:Orsa Press Alvin

Авторы статьи: Шель Е.В., Падерин Г.В. Научно-Технический Центр «Газпром нефти» (ООО «Газпромнефть НТЦ»).

Материал любезно предоставлен компанией ПАО «Газпром нефть» и журналом «ПРОнефть».

Bibliography

[1] T.K. Perkins and L.R. Kern. Widths of hydraulic fractures. J. Pet. Tech., Trans. AIME, 222:937–949, 1961.

[2] R.P. Nordgren. Propagation of vertical hydraulic fractures. J. Pet. Tech., 253:306–314, 1972. (SPE 3009).

[3] A. Settari and M. P. Cleary. Development and testing of a pseudo-three-dimensional model of hydraulic fracture geometry (p3dh). In Proc. 6th SPE Symposium on Reservoir Simulation of

[4] B. R. Meyer. Design formulae for 2d and 3-d vertical hydraulic fractures: Model comparison and parametric studies. In Proc. Unconventional Gas Technology Symposium, pages 391–408. SPE 15240, 1986.

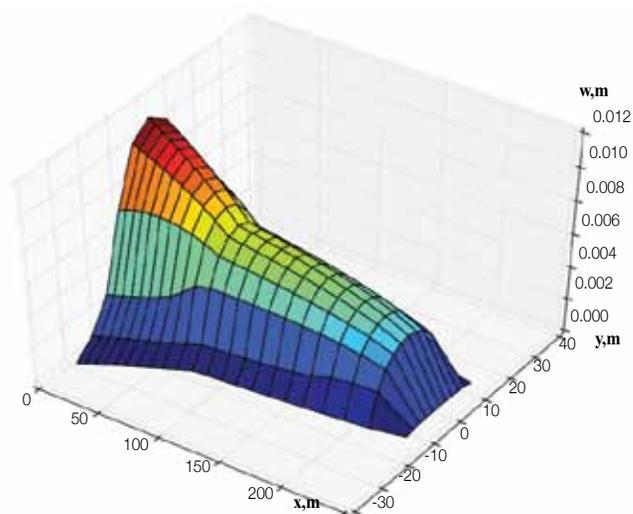


Рис. 3. Пример расчета для гибридного ГРП (линейный гель и сшитый гель)

Fig. 3. Sample calculation for hybrid hydrofracturing (linear gel and crosslinked gel, fluid)

Also, it should be noted that the analytical solution is based on dimensionless variables and depends on three dimensionless parameters which allows to determine the degree of formation lithology and fluid rheology impact on obtainable values of the hydraulic fracture geometry. Besides, the specific feature of this solution is the principal possibility to simulate the hybrid hydrofracturing.

[5] N.I. Muschelahvili. Some basic problems of the mathematical theory of elasticity. P. Noordhoff, Groningen, The Netherlands, 1953.

[6] J.I. Adachi, E. Detournay, A.P. Pierce. An Analysis of the Classical Pseudo-3D Model for Hydraulic Fracture with Equilibrium Height Growth across Stress Barriers, Int. J. of Rock Mechanics & Mining Sciences, Volume 47, Issue 4: 625–639, June 2010.

[7] G.V. Paderin. Modified Approach to Incorporating Hydraulic Fracture Width Profile in Unified Fracture Design Model, SPE Russian Petroleum Technology Conference, 2016, (SPE 182034)

[8] M.J. Economides, Olygney R.E, Valko P.P. Unified Fracture Design, Texas:Orsa Press Alvin

Authors of the article: Shel Egor Vladimirovich, Paderin Grigory Vladimirovich, LLC Gazpromneft Science & Technology Center.

Published with thanks to Gazprom Neft & PROneft Magazine