

Валидация модели трещины гидроразрыва Planar3D, реализованной в корпоративном симуляторе «РН-ГРИД»

Validation of the Planar3D hydraulic fracture model implemented in the corporate simulator RN-GRID

A.V. Pestrikov¹, A.B. Peshcherenko¹, M.S. Grebelnik², I.M. Yamilev²

¹Rosneft Oil Company, RF, Moscow

²RN-UfaNIPineft LLC, RF, Ufa

E-mail: a_pestrikov@rosneft.ru

Keywords: hydraulic fracturing, HF, hydraulic fracturing design, hydraulic fracturing simulator, mathematical modeling, hydrodynamics, elasticity theory, numerical methods, model validation, experiment, Planar3D

The work is devoted to the validation of a Planar3D hydraulic fracturing model, implemented in the corporate hydraulic fracturing simulator RN-GRID. Hydraulic fracturing simulator is specialized software for mathematical modeling and engineering analysis of the hydraulic fracturing process. The simulator allows evaluating fracture geometry and treatment parameters, taking into account geological structure of the reservoir, rock geomechanical properties, fracturing fluid and proppant properties.

Fracture model validation was carried out by comparing the results of mathematical modeling with the results of experimental studies in the laboratory installation of organic glass.

The article discusses two typical fracture growth scenarios, one of which — fracture growth in the area of lower stress — is traditionally considered difficult for numerical modeling using simplified Pseudo3D hydraulic fracturing models. The comparisons show a good agreement between the results of modeling in the developed Planar3D model and the results of experimental studies for each of the cases considered. In addition to comparison with experimental data, a comparison was made of the results of numerical simulations in RN-GRID with the results of simulations in another Planar3D hydraulic fracturing simulator for each of the cases considered. There is a good agreement between the simulation results in these simulators.

It is noted that the use of a hydraulic fracturing simulator with an experimentally proven model allows performing physically accurate modeling of this complex process, make sound engineering decisions in treatment designing and increase hydraulic fracturing efficiency.

А.В. Пестриков¹,
А.Б. Пещеренко¹,
М.С. Гребельник²,
И.М. Ямилев²

¹ПАО «НК «Роснефть»

²ООО «РН-Уфанипинефть»

Адрес для связи: a_pestrikov@rosneft.ru

Ключевые слова: гидроразрыв пласта (ГРП), дизайн ГРП, симулятор ГРП, математическое моделирование, гидродинамика, теория упругости, численные методы, валидация модели, эксперимент, Planar3D

DOI: 10.24887/0028-2448-2018-11-46-50

Данная статья является продолжением серии научных публикаций ПАО «НК «Роснефть», посвященных вопросам математического моделирования гидроразрыва пласта (ГРП) и разработанному компанией первому отечественному симулятору ГРП «РН-ГРИД». ГРП является ключевой технологией обеспечения и интенсификации добычи нефти как на традиционных объектах, так и на объектах с трудноизвлекаемыми запасами. Эффективное применение технологии ГРП при разработке нефтегазовых месторождений невозможно без детального моделирования данного процесса. Симулятор ГРП «РН-ГРИД», промышленно внедренный в ПАО «НК «Роснефть», является корпоративным инженерным инструментом для проектирования и контроля применения технологии ГРП. ПАО «НК «Роснефть» уделяет особое внимание как разработке, так и экспериментальной проверке собственных решений для моделирования ключевых процессов нефтегазодобычи.

Математическое моделирование гидроразрыва пласта (ГРП) с использованием программного комплекса для проектирования ГРП [1, 2] является основой для принятия специалистами нефтегазовой компании инженерных решений как при проектировании, проведении и анализе отдельных операций

ГРП, так и при выполнении концептуальных задач разработки месторождений с применением ГРП. Возникающий при этом вопрос достоверности результатов моделирования ГРП вызывает необходимость валидации используемой математической модели, т.е. установления степени, в которой модель является точным представле-

нием реальности с точки зрения предполагаемого использования модели. Целью валидации является количественная оценка прогностической способности модели путем сравнения результатов моделирования с экспериментальными данными [3].

В настоящей статье приведено сравнение результатов моделирования трещины ГРП в рамках планарной трехмерной модели (Planar3D, PL3D), реализованной в корпоративном симуляторе гидроразрыва пласта «РН-ГРИД», и экспериментальных данных, полученных в работах [4, 5]. Рассмотрены два важных случая развития трещины гидроразрыва:

1) развитие трещины в слое с низким сжимающим напряжением с частичным проникновением в слой с более высокими напряжениями – простейшая трехслойная модель [4];

2) рост трещины из слоя с более высоким напряжением в нижележащую область меньших напряжений – пятислойная модель [5].

Валидация модели для второго случая особенно важна, поскольку этот случай отличается немонотонным характером развития трещины разрыва и позволяет наглядно продемонстрировать преимущество модели Planar3D по сравнению с более упрощенными моделями класса Pseudo3D [1].

Валидация модели, как и предшествовавшая ей верификация на известные аналитические решения, была выполнена на этапе разработки расчетного ядра симулятора ГРП «РН-ГРИД».

Проведение экспериментов

В каждом эксперименте [4, 5] использовалась установка на основе массивных блоков из полиметилметакрилата (ПММА). Плоскость развития трещины представляет собой поверхность соприкосновения двух блоков из ПММА, в которую при помощи гидравлической системы закачивается модельная жидкость гидроразрыва на водной основе с добавлением загустителя в виде глюкозы и красителя для визуального наблюдения за динамикой роста трещины. Нижней грани верхнего блока придается такой профиль, при котором при сжатии с нижним блоком с плоской верхней гранью получается необходимый для каждого эксперимента ступенчатый профиль сжимающих напряжений в плоскости соприкосновения блоков. Оптическая прозрачность ПММА позволяет контролировать рост трещины при помощи видеокамеры. Утечки жидкости из трещины и трещиностойкость среды в данных экспериментах отсутствуют. В каждом рассмотренном случае жидкость закачивается через входное отверстие в установке, трещина развивается между блоками ПММА в плоскости x, y . Для удобства проведения эксперимента плоскость развития трещины была расположена горизонтально, при моделировании это учитывалось отключением гравитационной компоненты. Схема выполнения экспериментов приведена на рис. 1.

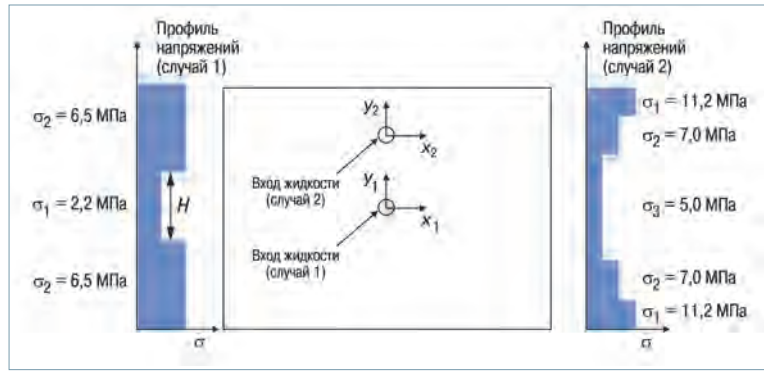


Рис. 1. Профиль сжимающего напряжения σ и положение входных отверстий для первого и второго случаев

Случай 1: трехслойная модель. Размер установки составлял 335×340 мм. Заданный профиль напряжений соответствует классическому случаю развития трещины в пределах слоя с низким сжимающим напряжением с частичным проникновением в выше- и нижерасположенные слои с высокими сжимающими напряжениями. Большинство геологических условий проведения ГРП можно представить как соответствующие данному случаю (глины – песчаник – глины). Ширина трещины в ходе эксперимента измерялась в точке с координатами (-30;0) в соответствующих координатных осях эксперимента. Профиль напряжений был задан как:

$$\sigma_0(x_1, y_1) = \begin{cases} 2,2 \text{ МПа}, & |y_1| \leq 25 \text{ мм}, \\ 6,5 \text{ МПа}, & 25 \text{ мм} < |y_1| < 170 \text{ мм}. \end{cases}$$

Случай 2: пятислойная модель. Размер установки составлял 400×365 мм. Трещина начинает развиваться в слое с промежуточным значением сжимающего напряжения с последующим проникновением в область меньших сжимающих напряжений. Динамика развития трещины имеет немонотонный характер, ее контур развивается несимметрично относительно оси x и имеет разную форму на различных временах закачки.

Ширина трещины в ходе эксперимента измерялась в двух точках с координатами (-30;0) и (30;0) в соответствующих координатных осях эксперимента. Профиль напряжений в эксперименте был задан как:

$$\sigma_0(x_2, y_2) = \begin{cases} 11,2 \text{ МПа}, & 65 \text{ мм} < y_2 < 25 \text{ мм}, \\ & -295 \text{ мм} < y_2 < -255 \text{ мм}, \\ 7,0 \text{ МПа}, & \dots, |y_2| < 25 \text{ мм}, \\ & -255 \text{ мм} < y_2 < -205 \text{ мм}, \\ 5,0 \text{ МПа}, & -205 \text{ мм} < y_2 < -25 \text{ мм}. \end{cases}$$

Валидация модели

Валидация модели проводилась путем численного моделирования условий каждого из вышеописанных экспериментов при помощи симулятора ГРП «РН-ГРИД» в режиме Planar3D и сопоставления результатов численных расчетов с экспериментальными данными. Геометрические параметры эксперимента и скорости закачки были масштабированы для учета физических ограничений на минимально допустимые значения соответствующих параметров в симуляторе «РН-ГРИД». Для последующего сравнения результатов моделирования и экспериментальных данных было проведено обратное масштабирование.

Изначально предполагалось поддерживать расход закачки постоянным, но измерение расхода в ходе эксперимента показало, что он менялся сложным образом из-за эффекта сжимаемости линии закачки, принимая постоянное значение по истечении некоторого времени. Для учета этого эффекта при моделировании были использованы ступенчатые графики расхода закачки в соответствии с результатами обработки фактических данных [4, 5]. Основные параметры моделирования приведены в табл. 1.

Случай 1: трехслойная модель. При моделировании использовалась квадратная расчетная сетка с числом расчетных узлов 80×74 , шаг по времени равнялся 3 с. Сравнение данных моделирования и эксперимента для давления в точке закачки приведено на рис. 2. Из него видно, что на больших временах результаты хорошо согласуются, а на малых имеются расхождения, связанные в первую очередь с потерями на трение в окрестности входного отверстия, сильно зависящими от геометрии установки, и с эффектами сжимаемости линии подачи жидкости. Последнее явление заключается в накоплении и последующем быстром высвобождении некоторого количества жидкости гидроразрыва на входе лабораторной установки. Оба эти процесса затруднительно в должной степени учесть при моделировании, и оба существенны лишь на малых временах.

На рис. 2 и 3 приведено сравнение модельных и экспериментальных данных для основных геометрических параметров трещины: ширины, полудлины и высоты. Наблюдается хорошее соответствие этих данных в течение всего исследуемого периода. На рис. 3 также представлено сопоставление для фиксированного момента времени положения контура трещины, определенного авторами работы [4] в ходе эксперимента при помощи видеокамеры, и карты раскрытия трещины, полученной в симуляторе. Видно, что форма и размеры трещины очень близки.

Таблица 1

Параметры	Случай 1	Случай 2
Модуль Юнга, ГПа	3,3	3,3
Коэффициент Пуассона	0,4	0,4
Вязкость жидкости, Па·с	30,2	30
Расход закачки, $10^3 \text{ м}^3/\text{с}$	2,0 $t \in (0; 243) \text{ с}$	0,9 $t \in (0; 31) \text{ с}$
	1,3 $t \in (0; 643) \text{ с}$	6,5 $t \in (31; 151) \text{ с}$ 2,3 $t \in (151; 660) \text{ с}$
Смыкающее напряжение, МПа	6,5 $y \in (2,5; 17) \text{ м}$	11,2 $y \in (2,5; 6,5) \text{ м}$
	2,2 $y \in (-2,5; 2,5) \text{ м}$	7,0 $y \in (-2,5; 2,5) \text{ м}$
	6,5 $y \in (2,5; 6,5) \text{ м}$	5,0 $y \in (-20,5; 2,5) \text{ м}$ 7,0 $y \in (-22,5; -20,5) \text{ м}$
		11,2 $y \in (-29,5; -22,5) \text{ м}$

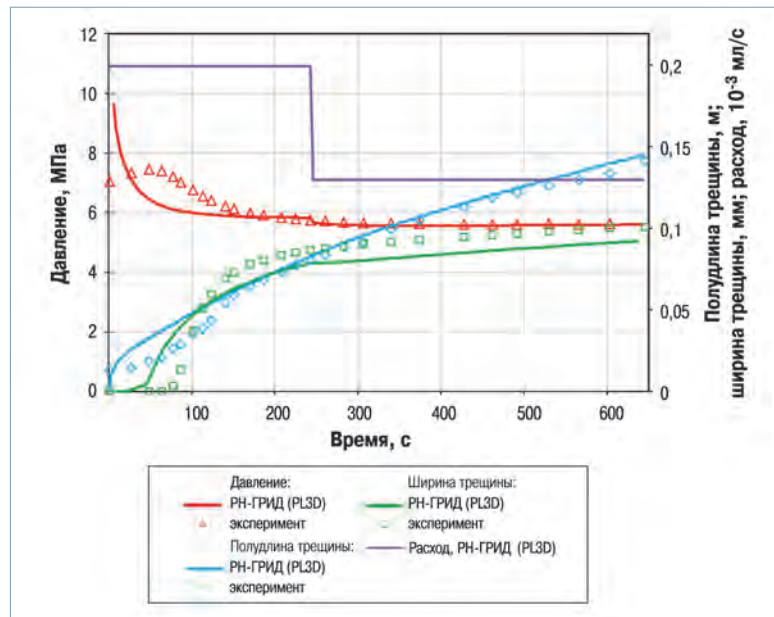


Рис. 2. Сравнение результатов моделирования и экспериментальных данных для давления в точке закачки, ширины трещины в точке (30;0) и ее полудлины

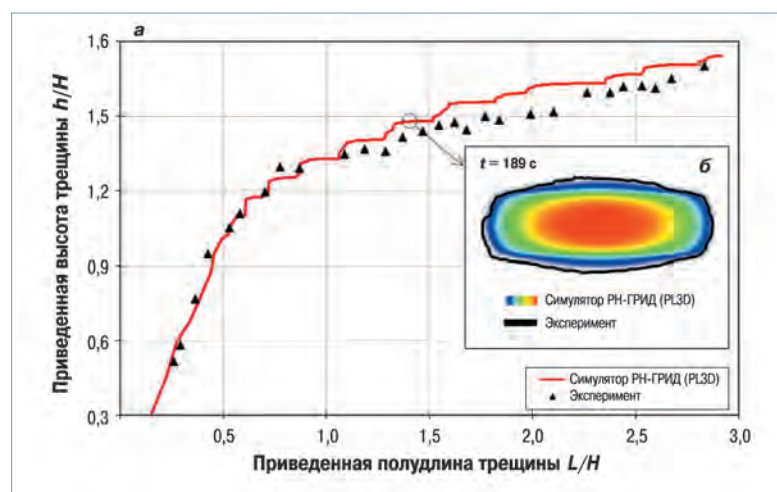


Рис. 3. Сравнение результатов моделирования и экспериментальных данных для зависимости приведенной высоты трещины h/H от приведенной полуудлины L/H (h – высота трещины в точке (0;0); H – высота среднего слоя (см. рис. 1); L – полуудлина трещины) (а) и сопоставление контура трещины в момент времени $t = 189 \text{ с}$, полученного при помощи симулятора «РН-ГРИД» и экспериментально (б)

Таблица 2

Параметры	Расхождение между численными и экспериментальными значениями, %	
	по всем данным	по данным после установки режима закачки ($t > 243$ с)
Давление в точке закачки $p(t)$	17	1
Полудлина трещины $L(t)$	10	2
Приведенная высота трещины $h/H(L/H)$	6	3

В табл. 2 приведена численная оценка расхождения между модельными и экспериментальными значениями рассматриваемых параметров. Так как полученные данные представляют собой числовые ряды вида $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$, $\{y_1, y_2, \dots, y_N\}$, для оценки их различия было вычислено отношение евклидовой нормы разности этих рядов (векторов в N -мерном пространстве) к их среднему

$$\{\text{Расхождение, \%}\} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2}}{\sqrt{\sum_{j=1}^N \left(\frac{1}{2}(x_j + y_j)\right)^2}} \cdot 100 \%$$

Эта же мера определена для данных на больших временах, когда расход закачки можно считать установившимся. На малых временах отмечается наибольший вклад в расхождение параметров.

2. Случай 2: пятислойная модель. При моделировании использовалась квадратная расчетная сетка с числом расчетных узлов 47×77 , отчетный шаг по времени равнялся 3 с. Из сравнения экспериментальной и численной кривых нормированного давления в точке закачки (рис. 4) следует, что они достаточно удовлетворительно согласуются, несмотря на затрудненную процедуру учета потерь на трение и сжимаемости линии закачки – эффектов, рассмотренных в предыдущем разделе. Численная кривая была получена с учетом приближения сложного графика закачки, полученного в эксперименте, ступенчатым изменением расхода жидкости, что отразилось в скачках рассчитанного давления в моменты изменения расхода. Из рис. 4 также видно, что геометрические параметры трещины, определенные в ходе эксперимента и при моделировании, согласуются на всем интервале времени.

На рис. 5 приведено сравнение смоделированной в симуляторе «РН-ГРИД» и полученной экспериментально динамики контура трещины для различных моментов времени от начала роста трещины. Для момента времени $t = 660$ с представлено сравнение полученного экспериментально положения контура трещины и карты раскрытия трещины, рассчитанной в симуляторе. Как и в случае 1, форма и размер контуров трещины хорошо сопоставимы.

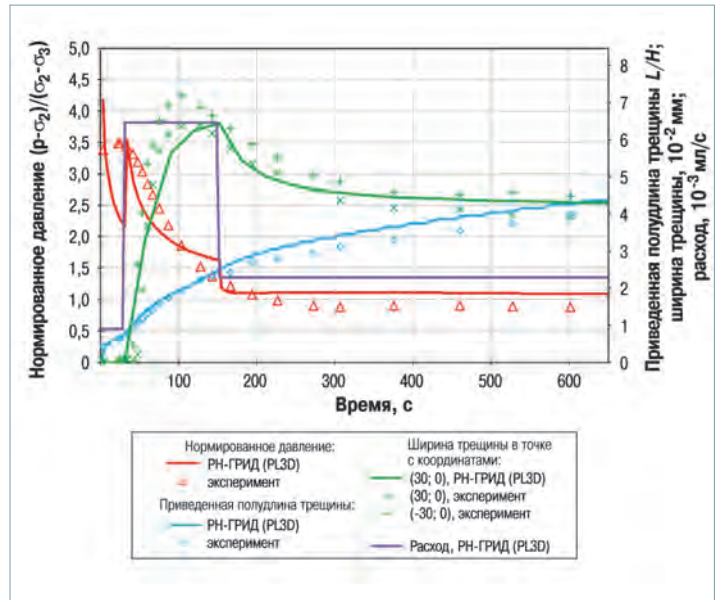


Рис. 4. Сравнение результатов моделирования и экспериментальных данных для нормированного давления в точке закачки, приведенной полудлины L/H (H – высота слоя 2 на рис. 1) и ширины трещины в точках с координатами $(30;0)$ и $(-30;0)$

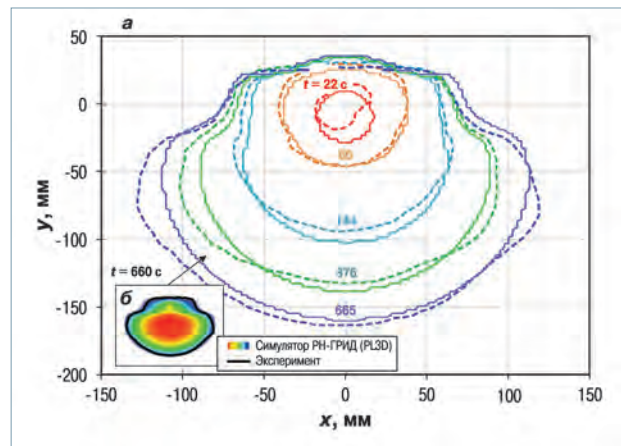


Рис. 5. Сопоставление динамики контура трещины, рассчитанной на симуляторе «РН-ГРИД» (сплошные линии) и полученной экспериментально в работе (5) (штриховые линии) (а), сопоставление экспериментального контура трещины в момент $t = 660$ с и карты ее раскрытия (б)

Оценка успешности валидации для случая 2 выполнена аналогично оценке для случая 1. Установлено, что расхождение между численным и экспериментальным значениями параметров $p(t)$ и $L/H(t)$ составило 8 %.

Сравнение результатов моделирования с результатами моделирования в другом симуляторе класса Planar3D

Кроме экспериментальных данных, в работах [4, 5] также представлены результаты математического моделирования рассматриваемых случаев в симуляторе ГРП класса Planar3D, разработанного в рамках работ [6, 7]. Сравнение результатов, полученных при помощи симулятора «РН-ГРИД», с расчетами в симуляторе Planar3D является дополнительным критерием верификации модели, реализованной в «РН-ГРИД». На рис. 6. приведены результаты сравнения расчетов

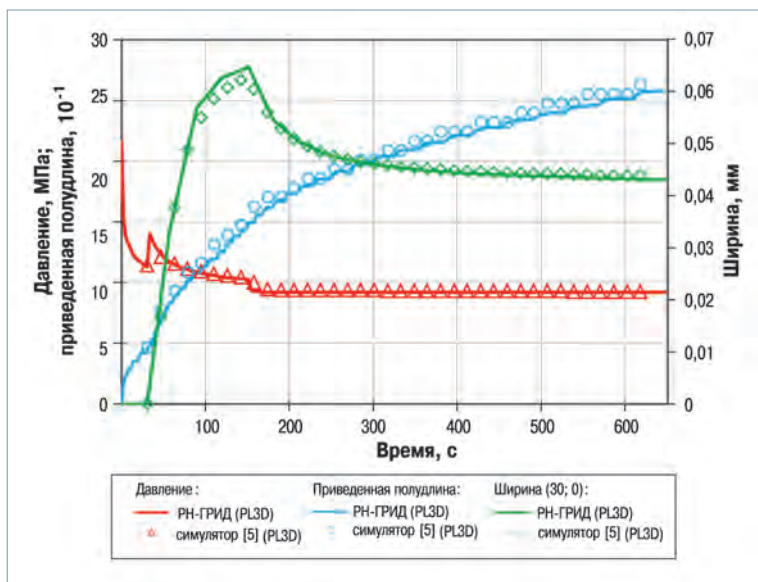


Рис. 6. Сравнение для случая 2 результатов численного моделирования при помощи симулятора «РН-ГРИД» и результатов моделирования в рамках PL3D-модели (5)

в симуляторах для случая 2 как для наиболее сложного с точки зрения характера развития трещины. Динамика давления и геометрических параметров трещины, рассчитанная в каждом симуляторе, практически совпадает. Аналогичное сравнение, выполненное для случая 1, также показало хорошее совпадение модельных результатов.

Выводы

1. На основе экспериментальных данных успешно проведена валидация реализованной в симуляторе «РН-ГРИД» модели развития трещины ГРП класса Planar3D. Установлено, что важнейшие с точки зрения практического применения ГРП случаи развития трещины корректно описываются моделью ГРП класса Planar3D.

2. Результаты валидации свидетельствуют о том, что симулятор «РН-ГРИД» хорошо описывает фактическое развитие трещины ГРП и обладает высокой прогностической достоверностью.

3. Соответствие результатов моделирования в симуляторе «РН-ГРИД» результатам моделирования в стороннем симуляторе Planar3D является дополнительным подтверждением успешной верификации применяемой в симуляторе «РН-ГРИД» модели развития трещины.

4. Применение симулятора с экспериментально проверенной моделью ГРП позволяет ПАО «НК «Роснефть» обеспечивать достоверное моделирование данного

сложного процесса, принимать обоснованные инженерные решения при проектировании ГРП и повышать эффективность его применения на месторождениях компании.

Коллектив авторов благодарит специалистов в области математического моделирования ГРП ООО «РН-УфаниПИНефть» за помощь и ценные замечания, полученные при обсуждении результатов данной работы.

Список литературы

1. Корпоративный симулятор гидроразрыва пласта: от математической модели к программной реализации / А.В. Аксаков, О.С. Борщук, И.С. Желтова (и др.) // Нефтяное хозяйство. – 2016. – № 11. – С. 35–40.
2. Корпоративный симулятор гидроразрыва пласта «РН-ГРИД»: от программной реализации к промышленному внедрению / А.А. Ахтямов, Г.А. Макеев, К.Н. Байдюков (и др.) // Нефтяное хозяйство. – 2018. – № 5. – С. 94–97.
3. *Concepts of Model Verification and Validation*. – Los Alamos National Laboratory / B. Thacker (et al.). – 2004. – URL: http://www.ltasvis.ulg.ac.be/cmsms/uploads/File/Los-Alamos_VerificationValidation.pdf.
4. Jeffrey R.G., Bungler A.P. A Detailed Comparison of Experimental and Numerical Data on Hydraulic Fracture Height Growth Through Stress Contrasts // SPE 106030. – 2009.
5. A comparison of numerical and experimental results of hydraulic fracture growth into a zone of lower confining stress / R. Wu, A.P. Bungler, R.G. Jeffrey, E. Siebrits // The 42nd U.S. Rock Mechanics Symposium (USRMS), 29 June–2 July, San Francisco, California. – 2008. – ID: ARMA 08-267. – URL: <https://www.onepetro.org/conference-paper/ARMA-08-267>.
6. Siebrits E., Peirce A.P. An efficient multi layer planar 3D fracture growth algorithm using a fixed mesh approach // Int. J. Numer. Meth. Engng. – 2002. – № 53. – P. 691–717. – DOI:10.1002/nme.308.
7. Peirce A.P., Siebrits E. A dual mesh multigrid preconditioner for the efficient solution of hydraulically driven fracture problems // Int. J. Numer. Meth. Engng. – 2005. – № 63. – P. 1797–1823. – DOI:10.1002/nme.1330.

References

1. Aksakov A.V., Borshchuk O.S., Zheiltova I.S. et al., *Corporate fracturing simulator: from a mathematical model to the software development* (In Russ.), Neftyanoe khozyaystvo = Oil Industry, 2016, no. 11, pp. 35–40.
2. Akhtyamov A.A., Makeev G.A., Baydyukov K.N. et al., *Corporate fracturing simulator RN-GRID: from software development to in-field implementation* (In Russ.), Neftyanoe khozyaystvo = Oil Industry, 2018, no. 5, pp. 94–97.
3. Thacker B. et al., *Concepts of model verification and validation*, Los Alamos National Laboratory, 2004, URL: http://www.ltasvis.ulg.ac.be/cmsms/uploads/File/LosAlamos_VerificationValidation.pdf.
4. Jeffrey R.G., Bungler A.P., *A detailed comparison of experimental and numerical data on hydraulic fracture height growth through stress contrasts*, SPE 106030-MS, 2009.
5. Wu R., Bungler A.P., Jeffrey R.G., Siebrits E., *A comparison of numerical and experimental results of hydraulic fracture growth into a zone of lower confining stress*, Proceedings of the The 42nd U.S. Rock Mechanics Symposium (USRMS), 29 June–2 July 2008, San Francisco, California, URL: <https://www.onepetro.org/conference-paper/ARMA-08-267>.
6. Siebrits E., Peirce A.P., *An efficient multi layer planar 3D fracture growth algorithm using a fixed mesh approach*, Int. J. Numer. Meth. Engng., 2002, no. 53, pp. 691–717, DOI:10.1002/nme.308.
7. Peirce A.P., Siebrits E., *A dual mesh multigrid preconditioner for the efficient solution of hydraulically driven fracture problems*, Int. J. Numer. Meth. Engng., 2005, no. 63, pp. 1797–1823, DOI:10.1002/nme.1330.