

Бурение скважин и разработка месторождений

УДК.622.276.63:51-74

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ КИСЛОТНОЙ ОБРАБОТКИ ТРЕЩИНЫ ГРП В КАРБОНАТНЫХ КОЛЛЕКТОРАХ MODELING AND OPTIMIZATION OF ACID TREATMENT OF FHF FRACTURE IN CARBONATE RESERVOIRS

Г. Т. Булгакова, А. В. Блонский

G. T. Bulgakova, A. V. Blonsky

Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа

*Ключевые слова: математическое моделирование; кислотная обработка; трещина ГРП;
карбонатный коллектор*

Key words: mathematical modeling; closed fracture acidizing; FHF fracture, carbonate reservoir

Метод кислотного гидроразрыва пласта (КГРП) на низкопродуктивных доломитизированных коллекторах, на которых закачка кислоты в пласт крайне затруднительна из-за низкой приемистости, не дает длительного эффекта. КГРП создает короткие протравленные трещины. Для поддержания длительной продуктивности скважин требуется более глубокое проникновение кислотного состава в пласт. В связи с этим, для по-

вышения гидропроводности трещин ГРП, в последние годы развивается технология «closed fracture acidizing» — кислотная обработка трещины ГРП при давлении ниже давления разрыва пласта [1]. Эффективность кислотной обработки трещины ГРП определяется проводимостью трещины, обусловленной кислотным травлением породы. В зависимости от литологии большинство карбонатных коллекторов гетерогенны и представляют собой градации от чистого известняка (CaCO_3) до доломита ($\text{CaMg}[\text{CO}_3]_2$) и доломитизированного известняка. Ангидрит (CaSO_4), относительно неактивный по сравнению с реакцией кислоты с карбонатами, также часто присутствует в форме включений. Вследствие неоднородности коллектора процесс растворения породы идет неравномерно, и после смыкания трещины остаются каналы достаточно высокой проводимости. Эффективная длина трещины зависит от длины вытравленных каналов, которая в свою очередь зависит от объема используемой кислоты, скорости протекающей реакции и скорости фильтрации кислоты через стенки трещины.

В соответствии с современными требованиями расчет прогнозных показателей при проектировании кислотной обработки трещины ГРП должен базироваться на моделях основных физико-химических процессов с реализацией в виде программного продукта [2, 3]. Для прогноза эффективности кислотной обработки трещины ГРП необходимо разработать математическую модель процесса, основанную на законах сохранения массы кислотного состава, переноса кислоты в трещине с учетом утечек кислотного раствора к стенкам обрабатываемой поверхности.

Современные модели кислотного ГРП предсказывают проводимость протравленной трещины на предположении равномерного растворения. Проводимость трещины рассчитывается на основе экстраполяции результатов фильтрационных исследований в масштабе зерна. 2D-модели кислотного разрыва пласта рассмотрены Ven-Naseur К. и Economides [4], Lo и Dean [5], Settari [6]. Эти модели прогнозируют равномерное растворение по контуру заданной геометрии трещины. Проводимость трещины вычисляется по величине объема растворенной породы. 3D-модель кислотного растворения трещины [7] может предсказать неоднородное травление по всему объему трещины. Но имеются некоторые ограничения в вычислительном алгоритме. Размер блока аппроксимационной сетки (порядка метра) намного превышает масштаб неоднородности.

Dong и др. [8] разработали модель для имитации кислотной обработки в трещиноватых карбонатных коллекторах. Кислотная обработка естественных трещин отличается от кислотных разрывов в нескольких аспектах. В естественных трещинах кислотная обработка проводится при давлении нагнетания реагента ниже, чем давление ГРП, так что утечки кислоты из трещины в пласт невелики по сравнению КГРП, где высокое давление внутри трещины приводит к высокой утечке кислоты. Естественная ширина трещины очень мала, и ее величина сильно влияет на окончательный профиль обработанной трещины, в то время как при КГРП начальная ширина трещины относительно большая и имеет меньше вариаций. Поэтому размер трещины КГРП меньше влияет на поток кислоты и окончательный профиль травления. В работе [9] представлена 3D-модель кислотного травления трещины, использующая промежуточные масштабы: микромасштаб, учитывающий неоднородность минералогического состава стенок трещины, и макромасштаб трещины разрыва. Для расчета трехмерного поля скоростей разработан специальный численный алгоритм на основе высокопроизводительных технологий (суперкомпьютер). Проводимость трещины КГРП зависит от модели травления поверхности трещины, которая определяется распределением проницаемости и минералогии вдоль поверхности трещины.

Существует несколько вариантов для прогнозирования ширины трещины при КГРП. Некоторые коммерческие программные продукты могут оценить проводимость кислотного травления и рассчитать ширину трещины по корреляции Nierode and Kruk [10] (StimPlan, MFrac, FRACPRO, GONFER). В лучшем случае эти программные пакеты используют 2D-решения для управления потоками жидкости. В работе [11] представлена 3D-модель расчета скорости, давления при течении кислоты в трещине различной ширины. Показано, что профиль кислоты в трещине для ньютоновской и неньютоновской жидкости одинаковый, изменяется только коэффициент диффузии

для каждого типа жидкости. Эта работа использует стандартный метод вычислительной гидродинамики SIMPLE [12].

3D-модель КГРП с проппантом рассмотрена в работе [13]. Показано, что включение проппанта в КГРП значительно улучшает проводимость трещины. В этом случае проводимость трещины определяется проводимостью проппанта.

Представленные 3D-модели КГРП достаточно сложны и трудоемки в реализации. Учет микронеоднородности в сочетании с масштабом трещины требует разработки специальных численных алгоритмов и специальных вычислительных кластеров.

Для прогнозирования скин-фактора после кислотной обработки трещины ГРП и расчета зависимости длины обработки от скорости закачки кислотного состава можно использовать достаточно простые усредненные модели. Такой подход рассмотрен в работе [14]. Моделировалась обработка трещины ГРП кислотным составом. Установлено, что при небольшой полудлине трещины скин-фактор намного меньше, чем в трещине с большей полудлиной. Снижение скин-фактора обусловлено увеличением полудлины трещины и, следовательно, площади фильтрации. При этом проникновение кислотного состава в трещину с увеличением полудлины трещины снижается. Более глубокое проникновение кислотного состава в трещину малой длины вызвано меньшей площадью и, следовательно, большей скоростью фильтрации.

В настоящей работе представлена усредненная математическая модель кислотной обработки трещины ГРП с проппантом, основанная на законах сохранения массы кислотного состава, переноса кислоты в трещине с учетом утечек кислотного раствора к стенкам обрабатываемой поверхности. Модель, построенная на законах сохранения массы кислотного состава, переноса кислоты в трещине с учетом утечек кислотного раствора к стенкам обрабатываемой поверхности за счет диффузии, прогнозирует поле давления, поле течения, профиль концентрации кислоты вдоль трещины и изменение ширины трещины вследствие кислотного травления, как функции закачанного объема кислоты и скорости закачки. Модель кислотной обработки трещины ГРП с проппантом в карбонатных коллекторах реализована численно с учетом фильтрационно-емкостных свойств пласта. На основе результатов, полученных при реализации модели, рассчитывается скин-фактор, представляющий собой параметр, характеризующий степень совершенства гидродинамической связи пласта со скважиной за счет наличия трещины. Математическое моделирование процесса кислотной обработки трещины ГРП с проппантом позволяет рассчитать оптимальные параметры закачки: скорость закачки и объем закачки кислотного состава, определяющие минимальный скин-фактор.

Модель основана на следующих предположениях: изотермические условия; пренебрежение гравитацией; несжимаемость жидкости; высота и длина трещины неизменны во время закачки кислоты.

Рассмотрим задачу кислотной обработки трещины ГРП в карбонатном коллекторе. Модель карбонатной породы строится в соответствии со следующими предположениями: в центре, вдоль боковой поверхности, находится трещина высотой h и полудлиной l , кислота нагнетается вдоль трещины; утечки кислоты пронизывают матрицу перпендикулярно трещине. Система координат выбирается так, чтобы направление оси x совпадало с направлением распространения потока кислоты, направление оси z совпадало с направлением высоты трещины, и направление y было перпендикулярно поверхности трещины. Плоскость трещины совпадает с плоскостью $x - z$, утечки распространяются в направлении y . В качестве элементарного объема рассматривается параллелепипед со сторонами $\phi'.x, \phi'.z, b$, где b — переменная ширина трещины в точ-

ке x, z (рис. 1). Линейный поток кислоты вдоль разрыва с утечками жидкости и диффузией кислоты к стенкам трещины описывается уравнением [15]:

$$\frac{\alpha C}{\phi y} + \frac{\alpha v_x C}{\alpha x} + \frac{\alpha v_y C}{\alpha y} + \frac{\alpha C}{\alpha z} - \frac{\alpha}{D} \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) = 0, \quad (1)$$

где C — массовая концентрация кислоты; $D_{эф}$ — эффективный коэффициент диффузии.

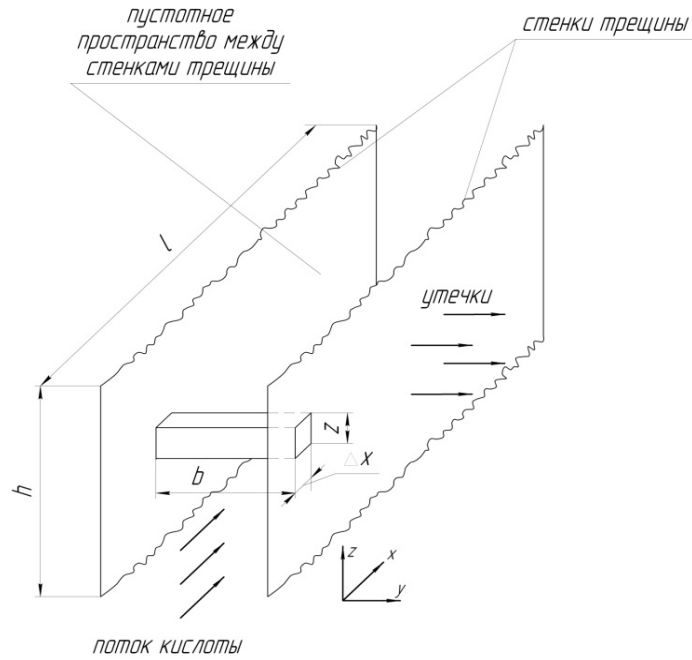


Рис. 1. Геометрия задачи. Элементарный объем

Усредним это уравнение по ширине и высоте трещины. При интегрировании по толщине пласта для упрощения задачи считаем, что потери жидкости через подошву и кровлю пласта равны нулю. При интегрировании по ширине трещины учитываются утечки жидкости в пласт. Коэффициент диффузии на стенке трещины определяется соотношением [15]

$$-D_{эф} \frac{\alpha}{C} \Big|_y \frac{b}{C} k_g (C - w), \quad (2)$$

2

где C_w — концентрация кислоты на стенках трещины; k_g — коэффициент массообмена. Коэффициент k_g имеет ту же размерность, что и скорость (м/с), и определяется как скорость притока кислоты к стенкам трещины при диффузии. Так как соляная кислота (HCl) является сильной кислотой, то почти все молекулы HCl в кислотном растворе диссоциируют на ионы H^+ и Cl^- . Скорость реакции ионов водорода H^+ с карбонатами (главным образом с карбонатом кальция $CaCO_3$) очень высокая, поэтому все ионы водорода H^+ вступают в реакцию с карбонатами на поверхности трещины. В результате значение концентрации кислоты на стенках трещины C_w может быть приравнено к нулю. Выражение (2) принимает вид

$$-D_{эф} \frac{\alpha}{C} \Big|_y \frac{b}{2} k_g C. \quad (3)$$

Усредненное по сечению трещины уравнение (1) принимает вид

$$\frac{\alpha(Cv_x b)}{\alpha x} - \frac{2Cv_l}{2Ck_g} \frac{\alpha}{(Cb)} \cdot \quad (4)$$

Первое слагаемое левой части уравнения описывает перенос кислоты, обусловленный потоком кислоты в направлении x . Последние два слагаемых описывают распро-

странение кислоты из трещины в направлении y , обусловленное утечками и диффузией соответственно.

Составляющая средней скорости потока кислоты v_x определяется по закону Дарси

$$v_x = \frac{k_f (p - p_i)}{\mu \alpha x}, \quad (5)$$

где μ — вязкость кислоты; k_f — проницаемость трещины; p — среднее по сечению трещины давление в точке (x, z) . Зависимость изменения проницаемости k_f при кислотном растворении стенок трещины может быть принята в виде

$$k_f = k_f^0 \exp(\alpha x), \quad (6)$$

где k_f^0 — начальная ширина трещины ГРП, α — константа среды, определяемая экспериментально.

Скорость утечек является важным параметром уравнения (4) и определяется

$$v_l$$

градиентом давления на стенке скважины. Если пренебречь сжимаемостью скелета породы, градиент давления на стенке трещины можно заменить средним градиентом давления в пласте

$$v_l = \frac{k}{\mu} \frac{p - p_i}{L_m}, \quad (7)$$

где k — проницаемость карбонатной породы; p_i — пластовое давление, давление на стенке трещины принимается равным среднему давлению p по ее сечению, L_m — контур питания.

Реакция взаимодействия кислоты с поверхностью горной породы является гетерогенной реакцией. Истинная скорость реакции, которая определяет время, необходимое для растворения горной породы, контролируется скоростью переноса кислоты к стенкам трещины и внутренней кинетикой реакции кислоты с горной породой. При температуре, присущей процессу кислотной обработки, скорость реакции HCl с карбонатами сравнима со скоростью молекулярной диффузии [16]. Таким образом, истинная скорость растворения горной породы фактически зависит только от скорости переноса кислоты к стенкам трещины. Согласно этому предположению изменение ширины трещины при кислотном растворении определяется формулой

$$\frac{db}{dt} = \lambda \frac{\pi_a}{\pi_m} \left(2k_g C + 2 \frac{\Psi}{k} \frac{p - p_i}{L_m} C \right), \quad (8)$$

где Ψ — коэффициент, характеризующий долю утечек, которая вступила в реакцию с горной породой на стенках трещины, λ — растворяющая способность кислоты,

π_a , — плотности кислоты и минерала породы соответственно, m — пористость.

π_m

На основе лабораторных экспериментов [9] установлено значение коэффициента утечек $\Psi = 0,3$.

Для расчета давления в трещине используется уравнение неразрывности для несжимаемой жидкости с учетом (5)

$$\frac{\alpha}{\alpha x} \left(k_f \left(\frac{\alpha p}{\mu} \frac{\lambda}{\alpha x} \right) \right) \quad (9)$$

Неизвестные функции концентрации, ширины трещины и давления $c(x, t)$, $b(x, t)$, $p(x, t)$ соответственно определяются через уравнения (4, 8, 9) при соответствующих начальных и граничных условиях (10):

$$p(x, t) = p_i \quad \text{при } t = 0, 0 < x < l;$$

$$C(x, t) = 0 \quad \text{при } t = 0, 0 < x < l;$$

$$B(x, t) = b_0 \quad \text{при } t = 0, 0 < x < l; \quad (10)$$

$$- \frac{k_f h \alpha P}{\mu \alpha x} \Big|_0^x \quad q_0 \quad \text{при } t > 0; \quad p(l, t) = p_i \quad \text{при } t > 0,$$

$$C(0, t) = C_0 \quad \text{при } t > 0.$$

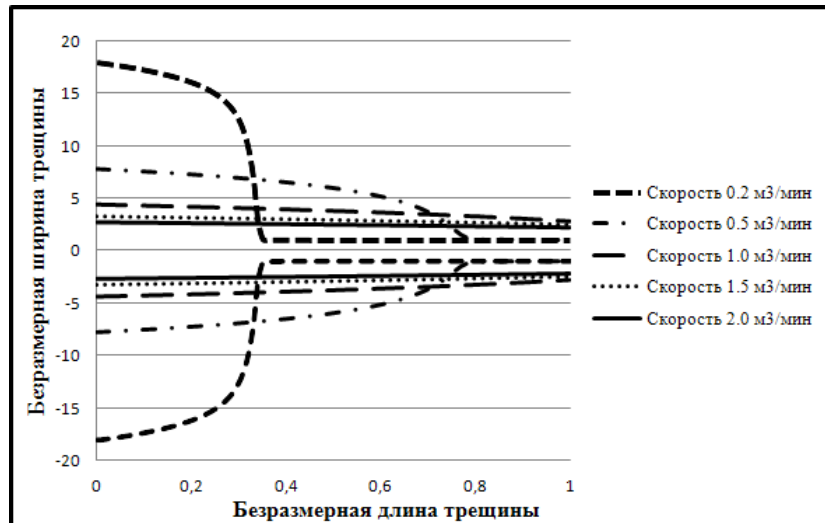
Система нелинейных уравнений в частных производных (4, 8, 9) с соответствующими начальными и граничными условиями (10) решалась численно. На основе метода контрольного объема для течений с проницаемыми границами построен модифицированный алгоритм SIMPLE [12]. Численные расчеты проводились для условий продуктивных отложений карбонатного коллектора: проницаемость матрицы — 1,5 мДа, пористость матрицы — 0,08, пластовое давление — 20 МПа, плотность породы — 2 710 кг/м³, средняя ширина трещины в продуктивной зоне h_0 — 1,57 мм, проницаемость трещины — 400 мДа, высота трещины в продуктивной зоне — 10 м, плотность кислоты — 1 189 кг/м³, растворяющая способность кислоты — 1,37, вязкость кислоты — 1,7 спз, начальная концентрация кислоты — 0,24, коэффициент массопереноса — 0,00003 м/с. Вычислительный эксперимент проводился для различных скоростей закачки кислоты в диапазоне от 0,2 до 2 м³/мин. Объем кислотного состава варьировался в диапазоне от 2 до 15 м³. Расчеты показывают, что средняя ширина трещины в продуктивной зоне уменьшается с увеличением скорости. При больших объемах закачки этот эффект проявляется значительно, средняя ширина уменьшается вдвое при увеличении скорости до 2 м³/мин. Этот факт объясняется тем, что при высоких скоростях и объемах закачки кислотного раствора, кислота не успевает полностью прореагировать с карбонатной породой. При меньших объемах закачки — 2 м³ и 5 м³ эффект снижения средней ширины трещины незначительный.

Глубина проникновения кислоты в трещину также зависит от скорости закачки кислотного раствора. С увеличением скорости закачки глубина проникновения увеличивается, кислотный раствор обрабатывает трещину по всей длине. При низких скоростях закачки 0,2 м³/мин и 0,5 м³/мин объем закачки почти не влияет на глубину проникновения кислотного раствора. При скоростях закачки 1 м³/мин и 1,5 м³/мин оптимальным является удельный объем 0,625 м³/м, соответствующий 5 м³. Дальнейшее увеличение объема не приводит к значительному увеличению глубины проникновения.

На рис. 2 представлен профиль изменения ширины обработки вдоль трещины (в безразмерных переменных). При низких скоростях закачки кислота расходуется в основном на входе и истощается до достижения конца трещины. С увеличением скорости высокая концентрация кислоты достигает конца трещины. При скоростях закачки 1,5 м³/мин, 2 м³/мин соответствующие профили ширины почти совпадают.

Как показывают расчеты, профиль ширины трещины вдоль длины определяется типом кислотного раствора. При обработке 12 % раствором соляной кислоты при минимальной скорости закачки 0,2 м³/мин ширина травленной поверхности на входе в трещину в 4 раза меньше, а глубина обработки в 3 раза превышает результат, полученный при использовании 24 % раствора HCl. При скорости закачки не менее 0,5 м³/мин обработка идет по всей длине трещины, но при этом средняя ширина трещины почти в 2 раза меньше, чем при использовании 24 % раствора HCl. Объем закачки в обоих случаях 6 м³. Для других объемов закачки получается аналогичный результат. Следует вывод, что более концентрированные кислоты интенсивнее разъедают породу, но при

этом почти не оказывают влияния на эффективную глубину проникновения кислоты. Это означает, что главным фактором, влияющим на глубину проникновения кислоты, является скорость закачки кислоты.



*Рис. 2. Профиль ширины после кислотной обработки вдоль трещины для различных скоростей закачки. Объем закачки 6 м^3 .
Безразмерные переменные $\bar{b} = b/b_0$; $\bar{x} = x/l$*

Эффективность кислотной обработки оценивается по значению скин-фактора S , рассчитанного по методике Синко-Ли и Саманьего [17]. Расчеты показывают, что с увеличением скорости скин-фактор уменьшается, но практически не зависит от объема закачки. Причем с увеличением скорости закачки темп уменьшения скин-фактора замедляется. При скоростях не менее $1 \text{ м}^3/\text{мин}$ кривые зависимости скин-фактора S от объема закачки сливаются. Подтверждается оптимальная скорость закачки в $1 \text{ м}^3/\text{мин}$. Предельное значение скин-фактора для условий расчета равно 4,8.

Представленная модель кислотной обработки трещины ГРП позволяет управлять такими параметрами, как скорость растворения, скорость закачки и объем закачанной кислоты в скважину для достижения максимально возможного эффекта кислотной обработки при заданном объеме раствора реагента.

Анализ результатов, полученных в ходе вычислительного эксперимента по кислотной обработке трещины ГРП с проппантом для типичных скважин ГРП, позволяет сформулировать рекомендации по скоростям и объемам закачки при проведении кислотных обработок скважин с ГРП.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках базовой части государственного задания организациям высшего образования в 2015г. и проекта РФФИ 14-01-97012 р.

Список литературы

1. Bartko K. M., Conway, M. W. Krawietz, T. E., Marquez R. B., Ob, R.G.M. Field and Laboratory Experience in Closed Fracture Acidizing the Lisburne Field, Prudhoe Bay, Alaska // SPE 24855-MS. – 1992.
2. Kharisov R. Ya., Folomeev A. E., Sharifullin A. R., Bulgakova G. T., Telim A. G. Integrated Approach to Acid Treatment Optimization in Carbonate Reservoirs // Energy & Fuels. – 2012. V.26. – № 5. – P. 2621-2630.
3. Булгакова Г. Т., Харисов Р. Я., Шарифуллин А. Р., Пестриков А. В. Математическое моделирование и оптимизация солянокислотных обработок скважин в карбонатных коллекторах // Научно-технический вестник ОАО «НК «Роснефть». – 2014. – № 2. – С. 22-28.
4. Ben-Naceur K., Economides M. J. Design and Evaluation of Acid Fracturing Treatments // SPE 18978. – 1989.
5. Lo K.K. and Dean R.H. Modeling of Acid Fracturing // SPE Production Engineering. – 1989. – 4(2). – P. 194-200.
6. Settari A. Modeling of Acid-Fracturing Treatments // SPE Production & Facilities. – 1993. – 8(1). – P. 30-38.

7. Romero J., Gu H., Gulrajani S.N. Three-Dimensional Transport in Acid Fracturing in Acid Fracturing Treatments: Theoretical Development and Consequences for Hydrocarbon Production // SPE 39956, 1998.
8. Dong C. Modeling of the acidizing process in naturally fractured carbonates // SPE Journal. – 2002. Dec. – P. 400-408.
9. Jianye Mou, Zhu D., and Hill A. D. Acid-Etched Channels in Heterogeneous Carbonates – A Newly Discovered Mechanism for Creating Acid Fracture Conductivity // SPE 119619. – 2009.
10. Nierode D. E. and Kruk K. F. An Evaluation of Acid Fluid Loss Additives, Retarded Acids, and Acidized Fracture Conductivity // SPE 4549-MS. – 1973.
11. Oeth C. V., Hill A. D., and Zhu D. Acid Fracturing: Fully 3D Simulation and Performance Prediction // SPE 163840-MS. – 2013.
12. Patankar S. V. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. – New York: McGraw-Hill Book Co., 1980. – 197 p.
13. Bale A., Smith M. B., Klein H. H. Stimulation of carbonates combining acid fracturing with proppant (CAPF): A Revolutionary Approach for Enhancement of Sustained Fracture Conductivity and Effective Fracture Half-length // SPE 134307-MS. – 2010.
14. Вольнов И. А. Автоматизация оценки эффективности процессов, протекающих при соляно-кислотных обработках карбонатных коллекторов залежей нефти // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2009. – № 8. – С. 32-36.
15. Williams, B. B, Gidley, J. L., Schechter, R. S. Acidizing Fundamentals. – New York: SPE Monograph Series, 1979. – 124 p.
16. Салимов В. Г., Ибатуллин Р. Р., Насыбуллин А. В. и др. Экспериментальное изучение скорости растворения карбонатных пород в кислотных жидкостях для гидроразрыва пласта // Нефтяное хозяйство. – 2013. – № 1. – С. 68-71.
17. Cinko-Ley H., Samaniego F. Transient pressure analysis for fractured wells // JPT. – 1981. Sept. – P. 1749-1766.

Сведения об авторах

Булгакова Гузель Талгатовна, д. ф.-м. н., профессор кафедры математики, Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа, тел. 8(347)2737735, e-mail: math@mail.rb.ru

Блонский Артем Вадимович, аспирант, Московский физико-технический институт (технический университет), тел. 89175233589, e-mail: artemblonskii@gmail.com

Information about the authors

Bulgakova G. T., Dr: Sc. in Physics & Mathematics, professor of the chair of mathematics, Ufa State Aviation Technical University, Ufa, phone: 8(347)2737735, e-mail: math@mail.rb.ru

Blonsky A. V., postgraduate student of the chair «Oil and gas technologies», Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, phone: 89175233589, e-mail: artemblonskii@gmail.com