

УДК 658.5

ПОКАЗАТЕЛИ АДЕКВАТНОСТИ МОДЕЛИ РОСТА САМОПРОИЗВОЛЬНО РАЗВИВАЮЩИХСЯ ТЕХНОГЕННЫХ ТРЕЩИН

© 2025 Р.Р. Копейкин, В.А. Левенцов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

Статья поступила в редакцию 02.12.2024

Явление самопроизвольно развивающихся техногенных трещин оказывает существенное влияние на процессы добычи нефти и газа, поэтому игнорирование данного эффекта может привести как к положительным, так и отрицательным последствиям в процессе разработки месторождений жидких углеводородов. В статье приведено краткое описание однофазной гидрогеомеханической двумерной модели роста автоматической трещины гидравлического разрыва пласта (АГРП). Важным отличием от стандартной модели, использующейся при интерпретации гидродинамических исследований скважин, является физически обоснованная возможность роста техногенных трещин. Объективная оценка и сравнение физико-математических моделей разной степени сложности, а также качества их адаптации на реальные данные – задача первостепенной важности. В работе проведен обзор существующих показателей точности, именуемых также показателями адекватности. С помощью данных показателей можно проводить оценку качества адаптации моделей. На примере явления АГРП проведена количественная оценка физико-математических моделей разной степени сложности с помощью показателей качества их адаптации на исторические данные. Применение количественных метрик позволило провести объективный сравнительный анализ двух моделей. *Ключевые слова:* показатели точности модели, показатели адекватности модели, показатели качества адаптации модели, заводнение, поддержание пластового давления, техногенная трещина, АГРП, пороупругий эффект.

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-2-88-96

EDN: GJGIGV

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время трудно представить какую-либо сферу нашей жизни без моделирования процессов происходящих в ней. Исключением не является и нефтегазовая отрасль. Процессы добычи нефти и газа обязательно сопровождаются с помощью моделей разной степени сложности в течение всего жизненного цикла добываемой продукции. Использование конкретной модели обосновывается необходимостью учета наиболее значимых эффектов, которыми невозможно пренебречь. Например, для моделирования процессов движения флюидов в пласте для месторождений высоковязкой нефти используются термогидродинамические модели из-за значительного влияния температуры на вязкость нефти, значение которой сказывается на ее подвижности.

С целью сокращения машинного времени и человеческих трудозатрат в модель обычно пытаются заложить только значимые эффекты, которые помогают описывать поведение моделируемого объекта с заданной точностью в выбранном диапазоне значений. Поэтому модели всегда содержат допущения, что обуславливает границы их применимости.

С течением времени открываются новые явления, становятся определяющими ранее малоизвестные и малоизвестные по каким-либо причинам эффекты. К числу таких явлений можно отнести автоматический гидравлический разрыв пласта (АГРП) [1]. Он возникает в процессе заводнения нефтяных пластов (вода закачивается в пласт с помощью нагнетательных скважин для поддержания порового давления и вытеснения углеводородов к добывающим скважинам [2]) при превышении давления закачки над давлением разрыва породы. Данный эффект нельзя игнорировать, так как он оказывает существенное влияние на проектирование разработки и непосредственную эксплуатацию нефтегазовых месторождений, где применяется система поддержания пластового давления.

В процессе создания новых моделей проводят их верификацию, валидацию [3], сравнение с другими моделями. Кроме этого, при моделировании происходит адаптация (настройка) параметров модели на исторические данные с целью проведения точных прогнозных расчетов. В каждом из перечисленных случаев необходимо оценивать адекватность (точность) моделей, качество их адап-

Копейкин Роман Романович, аспирант. E-mail: kop_r_r@mail.ru

Левенцов Валерий Александрович, кандидат экономических наук, доцент Высшей школы передовых цифровых технологий. E-mail: vlevensov@spbstu.ru

тации на реальные и/или синтетические данные. Сделать это возможно с помощью определенных метрик – показателей точности и качества адаптации модели.

Целью данной работы является обзор существующих показателей адекватности (точности) и качества адаптации модели на исторические данные, которые могут быть также использованы для сравнения моделей друг с другом.

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ РОСТА ТРЕЩИНЫ АГРП

Согласно статье 3.1.6 ГОСТ Р 57412—2017 под моделированием понимается изучение свойств и/или поведения объекта моделирования, выполненное с использованием его моделей [4].

Объект моделирования – это явление, объект или свойство объекта реального мира. В нашем случае объектом моделирования является явление АГРП.

Модель – сущность, воспроизводящая явление, объект или свойство объекта реального мира. Для адекватного моделирования поведения трещин АГРП используется численная физико-математическая модель [1]. Ниже приведем ее краткое описание с учетом эффекта преднапряженного состояния, вызванного созданием трещины ГРП [5].

В качестве определяющих уравнений в пласте используются уравнения Био для пороупругой среды [6], которые в случае плоского напряженного состояния имеют следующий вид:

$$\nabla \cdot \sigma = 0, \sigma = \left[\lambda' (\nabla \cdot u) + \frac{1}{\mu'} \sigma_{zz} - \alpha' p \right] I + \mu' \varepsilon(u), \quad (1)$$

$$S'_\varepsilon \frac{\partial p}{\partial t} = \nabla \cdot \left(\frac{k}{\mu} \nabla p - \alpha' \frac{\partial u}{\partial t} \right) + \sum_{i=1}^{N_w} \frac{Q_i(t)}{H} \delta_{x_i}(x), \quad (2)$$

где σ – тензор полных напряжений, u – вектор перемещений, $\varepsilon(u)$ – тензор малых деформаций, p – поровое давление, σ_{zz} – вертикальное горное давление, $x = (x, y)$ – координаты вдоль горизонтальных осей, k – проницаемость пласта, μ – вязкость жидкости, $Q_i(t)$ – объемные расходы, задаваемые на скважинах, H – толщина продуктивного слоя, $\delta_{x_i}(x)$ – дельта-функция Дирака. Параметры λ' , μ' , α' и S'_ε задаются через модуль Юнга E , коэффициент Пуассона ν , коэффициент Био α и упругость пласта S_ε следующим образом:

$$\lambda' = \frac{E\nu}{1-\nu^2}, \mu' = \frac{E}{1+\nu}, \alpha' = \frac{1-2\nu}{1-\nu} \alpha, S'_\varepsilon = \left(S_\varepsilon + \frac{\alpha\alpha'}{\mu'} \right). \quad (3)$$

При описании механики развития АГРП используется модель трещины постоянной высоты ЕРКН [7]. Для описания течения вязкой жидкости в трещине АГРП уравнение смазки сформулировано в терминах среднего по высоте трещины H раскрытия $\bar{w}$ в виде

$$\frac{\partial \bar{w}}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\bar{w}^3}{12\mu} \frac{\partial p_f}{\partial x} \right) + q_l = \frac{Q_0(t)}{H} \delta_{x_0}(x), \quad (4)$$

где q_l – утечки жидкости из трещины в пласт, Q_0 – расход на нагнетательной скважине.

Если возникает необходимость моделировать фильтрацию через закреплённую трещину ГРП на нагнетательных или добывающих скважинах, то это делается в рамках модели конечной проводимости трещины [8].

Трещина АГРП раскрывается под действием чистого давления $p_{net} = p_f - \sigma_{cl}$, где p_f – давление жидкости в трещине, σ_{cl} – напряжение закрытия, которое включает в себя начальное минимальное сжимающее горизонтальное напряжение σ_h и дополнительные сжимающие напряжения σ_b , возникающее за счет эффекта пороупругости, [9] и $\sigma_{prestress}$, возникающее при создании трещины ГРП и ее закрепления пропантом [5]. При остановке закачки трещина АГРП может начать закрываться вплоть до начального закреплённого состояния трещины ГРП или полностью в отсутствие ГРП на скважине. Подход из [9, 10] позволяет корректно описывать данный процесс на основе решения контактной задачи. Для замыкания модели задаются граничные условия на дальней границе пласта и начальные условия.

В работе [1] была проведена проверка адекватности (совокупность действий с моделью, результатом которых является подтверждение ее соответствия моделируемому объекту реального мира [4]) описанной однофазной гидрогеомеханической двумерной модели роста трещины АГРП на основе данных гидродинамических исследований скважин (ГДИС), а также ее сравнение с традиционной моделью интерпретации ГДИС, которая описывается только уравнением на давление (рис. 1).

ОБЗОР ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТОЧНОСТИ И КАЧЕСТВА АДАПТАЦИИ МОДЕЛЕЙ

Сравнение моделей было выполнено на качественном уровне без использования показателей качества адаптации моделей на исторические данные. Приведем ряд определений, которые помогут разобраться в данном термине.

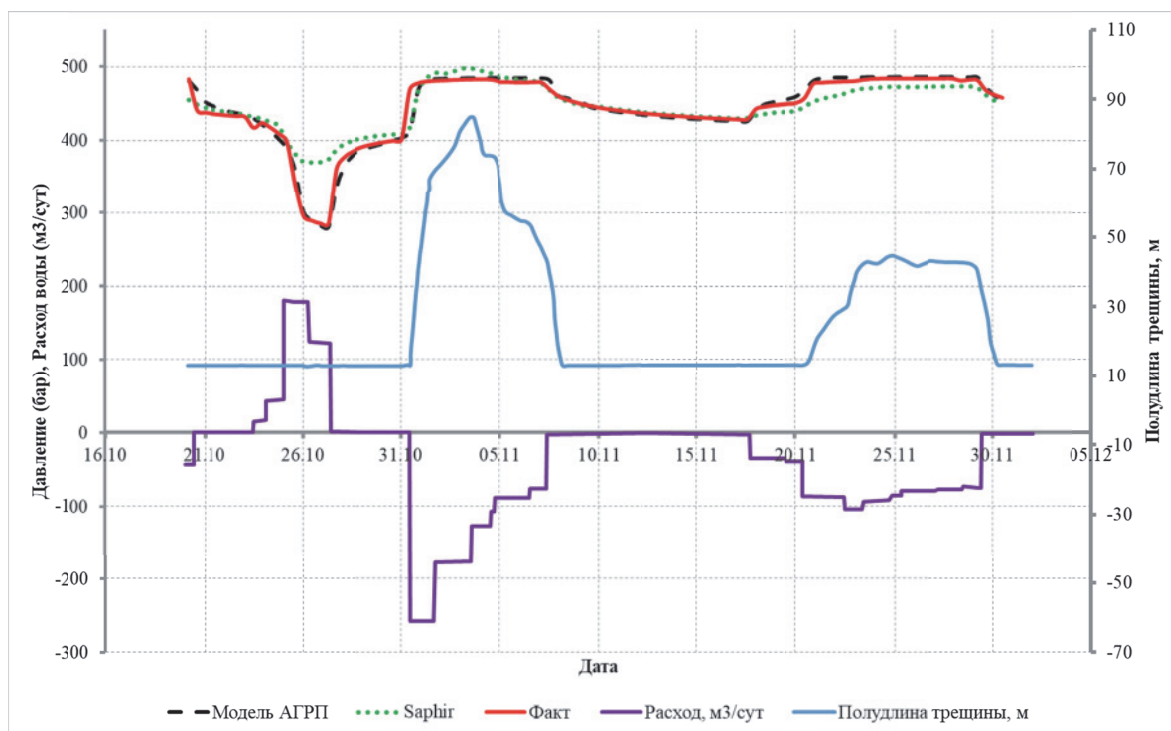


Рис. 1. Сравнение результатов адаптации по фактическому забойному давлению (красная кривая) предложенной численной Модели (черная пунктирная линия) и модели в ПО Saphir (зеленая пунктирная линия)

Адаптация цифровой геолого-фильтрационной модели – физически обоснованное изменение параметров и структуры цифровой геолого-фильтрационной модели для максимально возможной сходимости фактических и модельных показателей разработки месторождения нефти и газа [11].

Под качеством понимается свойство товара или услуги наиболее полно удовлетворять требованиям и пожеланиям потребителя [12]. Потребитель – пользователь модели, а товар/услуга – сама модель.

Показатель качества продукции – это количественная характеристика одного или нескольких свойств продукции, входящих в ее качество, рассматриваемая применительно к определенным условиям ее создания и эксплуатации или потребления [13].

В Приказе МПР РФ № 61 от 21.03. 2007 г. «Рекомендации по проектированию разработки газонефтяных месторождений» написано, что результаты адаптации должны быть предоставлены, но не написано, что в них входит [14].

Рассматривая «Временный регламент оценки качества и приемки трехмерных цифровых геолого-гидродинамических моделей, представляемых пользователями недр в составе технических проектов разработки месторождений углеводородного сырья на рассмотрение ЦКР Роснедра по УВС» (утвержденный Протоколом от 19.04.2012 N 5370 ЦКР Роснедра по УВС), можно найти требования к адаптации моделей. Если обобщить пункты 4.2.1 – 4.2.3 и 4.3.1 – 4.3.2, то получится следующее: «текущие (в каждый момент модельного времени) / накопленные (сумма значений параметра на конец моделируемого периода) расчётные параметры могут отклоняться от фактических показателей разработки не более чем на XX%» [15]. Обоснование принятых значений допустимых отклонений в данном документе не приведено.

Были также проанализированы источники [2,16-21]. Показатели качества адаптации моделей, которые можно было бы использовать применительно к данной работе, в них не приведены.

Далее был сделан обзор серии стандартов ГОСТ Р 57700.

Процессы верификации и валидации похожи на процесс адаптации тем, что требуют сравнения эталона или валидационного базиса с результатами расчета модели. В ГОСТ Р 57700.13-2018 «Численное моделирование физических процессов. Численное моделирование многофазной фильтрации. Верификация ПО» приведено 28 тестов для одноименной процедуры в названии самого стандарта, критерием качества является «совпадение результатов моделирования с эталонными результатами, опубликованными в ...» [22]. А в ГОСТ Р 57700.17–2018 «Численное моделирование физических процессов. Численное моделирование дозвуковых течений вязких жидкостей и газов. Валидация ПО» написано, что «точность соответствия результатов решения и эталона не стандартизуется, но определяется потребностями конкретного потребителя данного ПО» [23].

В ГОСТ Р 57700.15-2018 «Численное моделирование физических процессов. Численное моделирование ламинарных течений вязких жидкостей и газов. Валидация ПО» есть упоминание о нормах: «отклонение численного результата от эталонного, выраженного в некоторой норме, называют погрешностью вычислений» [24].

В ГОСТ Р 57700.25-2020 «Компьютерные модели и моделирование. Процедуры валидации» упоминается лишь о среднеквадратичном отклонении, ссылаясь на методы статистического анализа согласно ГОСТ Р 50779.0 [25].

Анализ части стандартов по статистическим методам [26-31], которые преимущественно являются переводами иностранных нормативных документов, не выявил альтернативных метрик, помимо ранее упомянутой среднеквадратичной ошибки

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^N (X_i - Y_i)^2}. \quad (5)$$

Так как нам необходимо сравнить два временных ряда с одинаковой дискретностью (например, результаты расчета модели и исторические данные), то мы можем воспользоваться формулой для коэффициента линейной корреляции [32]:

$$R = \frac{\sum (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum (X_i - \bar{X})^2 \sum (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (6)$$

где $\bar{X}, \bar{Y}$ – средние значения временного ряда №1 и №2 соответственно, X_i, Y_i – значения временного ряда №1 и №2 соответственно, взятые с i -го шага.

Коэффициент корреляции, хоть изначально и предназначен для измерения линейной зависимости между двумя разными переменными, может быть применен для сравнения модельных расчетов с фактическими значениями или двух разных моделей. Бессмысленно сравнивать физико-математические модели разной степени сложности друг с другом напрямую, это необходимо делать посредством модели-эталона или экспериментальных данных. Мы можем рассматривать выходные данные рассматриваемой модели и фактические значения (или значения модели-эталона) как отдельные переменные. Коэффициент корреляции тогда покажет, насколько согласованы два набора данных. Но для определения «лучшей» модели необходимы дополнительные метрики (например, $RMSE$) которые сравнивают результаты расчетов моделей с истинными значениями.

В последнее время все большую популярность набирает область искусственного интеллекта (ИИ), в которой в качестве метрик оценки корректности моделей ИИ обычно используют вышепречисленные показатели ($R^2, RMSE$). В ГОСТ Р 59898-2021 «Оценка качества систем искусственного интеллекта. Общие положения» приведены примеры метрик оценки функциональной корректности систем искусственного интеллекта (СИИ) в задачах регрессии: $RMSE$, средняя абсолютная ошибка (MAE) [33].

В машинном обучении наиболее распространенными метриками точности модели являются: среднеарифметическая ошибка (MAE), среднеквадратичное отклонение ($RMSE$), дисперсия (MSE), коэффициент детерминации (R^2) [34, 35].

В учебнике по машинному обучению [36] и обзоре регрессионных метрик [37] представлен расширенный перечень показателей, которые могут быть полезны при оценке моделей: $MAPE$ (mean absolute percentage error), $SMAPE$ (symmetric mean absolute percentage error), $WAPE$ (weighted average percentage error), $MSLE$ (mean squared logarithmic error), $RMSLE$ (root mean squared logarithmic error), $adjusted R-squared$, $quantile loss$, $Huber loss$, PWP (proportion of wrong predictions).

Ниже опишем некоторые показатели точности (адекватности) моделей из списка выше, с остальными читатель может ознакомиться, используя список литературы.

$RMSLE$ обычно используется, когда разность между фактическим и предсказанным значениями различается на порядок и выше:

$$RMSLE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^N (\log(X_i + 1) - \log(Y_i + 1))^2}. \quad (7)$$

$MAPE$ является средним значением относительной ошибки:

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum \frac{|X_i - Y_i|}{|Y_i|}. \quad (8)$$

Показатель $SMAPE$ отличается от $MAPE$ средним значением рассматриваемых параметров в знаменателе, что позволяет уйти в ряде случаев от деления на ноль:

$$SMAPE = \frac{1}{N} \sum \frac{2|X_i - Y_i|}{|X_i + Y_i|}. \quad (9)$$

$WAPE$ есть отношение площадей между сравниваемыми кривыми и под эталонной кривой:

$$WAPE = \frac{\sum |X_i - Y_i|}{\sum |Y_i|}. \quad (10)$$

Показатель PWP позволяет определить долю случаев, когда предсказанное значение выше или

ниже сравниваемого на определенное значение (заданный порог d), которое может быть не только абсолютным (например, 40 бар), но и относительным (например, 10%):

$$PWP = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N 1 \text{ if } |X_i - Y_i| > d. \quad (11)$$

СРАВНЕНИЕ МОДЕЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТОЧНОСТИ

Далее для сравнения описанных физико-математических моделей с фактическими данными будем использовать MAE , $RMSE$, $RMSLE$, MSE , R^2 , $MAPE$, $SMAPE$, $WAPE$, PWP .

Первые четыре показателя помогут оценить средние значения отклонений в обычном и логарифмическом масштабах, коэффициент детерминации (R^2) – совпадение трендов двух кривых (например, при $R^2 = 1$ MAE может быть не равен 0), $MAPE$ и $SMAPE$ – среднюю абсолютную процентную разницу между прогнозируемыми и фактическими значениями, $WAPE$ – накопленную абсолютную ошибку относительно суммы всех эталонных значений, PWP – долю предсказаний с абсолютными ошибками более 5% относительно эталона.

Рассчитанные значения выбранных метрик для сравнения двух моделей (с учетом АГРП и без) посредством исторических данных (кривая забойного давления скважины), на которые они были настроены приведены в таблице 1.

Таблица 1. Сравнение показателей точности моделей

Показатель/Модель	Модель с учетом АГРП	ПО «Saphir»
MAE, бар	5,046	11,771
RMSE, бар	8,42	20,392
RMSLE	0,004	0,033
MSE, бар	70,900	415,839
R^2, д.е.	0,969	0,855
MAPE, %	1,165%	3,049%
SMAPE, %	1,170%	2,905%
WAPE, %	1,140	2,650
PWP ($d > 5\%$), %	4,000%	9,000%

MAE и $RMSE$ модели АГРП примерно в два раза ниже, чем у стандартной модели. Также можно заметить, что за счет логарифмирования затруднена интерпретация метрики $RMSLE$, которая имеет низкие значения из-за того, что порядок модельных и фактических значений одинаков. Показатель $WAPE$ имеет низкие значения в обоих случаях ($< 3\%$), хотя кривая давлений из ПО Saphir в некоторых зонах графика сильно отклоняется от эталона. Если модифицировать данную метрику с помощью деления накопленной абсолютной ошибки не на всю площадь графика под эталонной кривой, а только на ее часть (начиная с 250 бар), то значения увеличатся до 2,6% и 6,1% соответственно. Коэффициент детерминации R^2 показал, что более сложная модель описывает примерно на 11,43% больше изменений кривой давления эталона, чем более простая, что является довольно существенным приростом коэффициента детерминации (см. рис. 2). Метрики $MAPE$, $SMAPE$ для соответствующих моделей близки по своим значениям из-за сравнительно небольшой разницы забойных давлений по отношению к эталону.

Одним из самых информативных показателей, по мнению автора, наряду с R^2 является PWP , так как он позволяет оценивать продолжительность периода времени (или его долю относительно полного промежутка времени), на котором модельная кривая имеет расхождение больше, чем пороговое значение ошибки d , задаваемое пользователем. Варьирование параметра d позволяет провести более детальный анализ результатов (см. рис. 3): наибольшая разница значений ($\Delta PWP = 38\%$) наблюдается при $d = 2\%$, ΔPWP стабилизируется ($\sim 5\%$) при $d > 5\%$, все расчетные значения модели роста трещины АГРП и стандартной модели лежат в пределах 12% и 32% относительной ошибки соответственно.

В дальнейшем можно попытаться скомбинировать или усовершенствовать перечисленные, или создать новые показатели точности моделей.

Анализ выбранных метрик однозначно подтверждает, что модель, учитывающая эффект АГРП, более точно описывает поведение скважины в различных режимах работы. Это обусловлено учетом

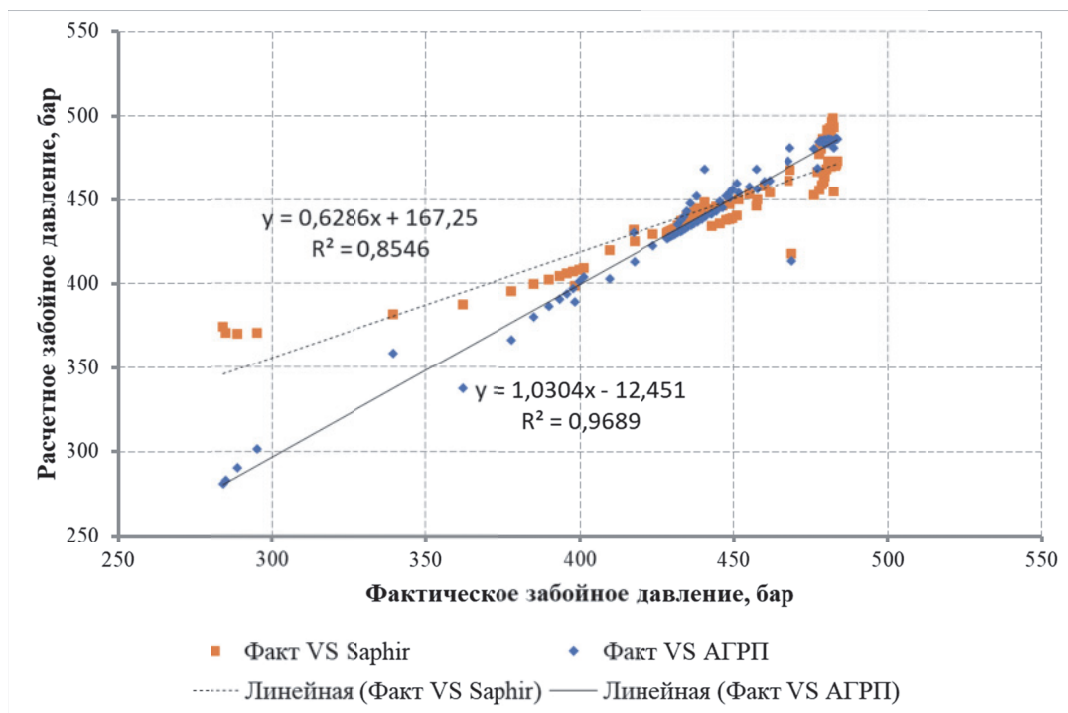


Рис. 2. Корреляции результатов моделей с фактическими значениями забойного давления

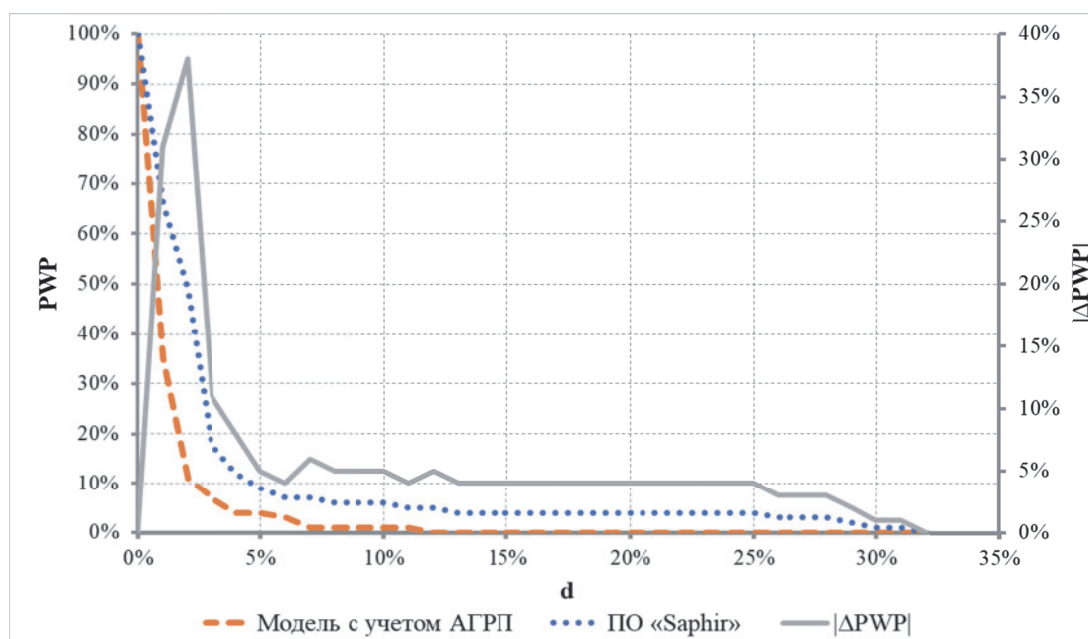


Рис. 3. Сравнение показателя PWP двух моделей в зависимости от порогового значения d

физического эффекта АГРП, проявляющегося при давлении, превышающем порог разрыва породы (48,05 МПа). Хотя визуальное сравнение (рис. 1) также указывает на это, использование количественных метрик обеспечивает значительные преимущества: объективность, точность, измеримость, воспроизводимость и возможность сравнительного анализа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе было представлено краткое описание физико-математической модели АГРП с учетом предварительно напряженного состояния, вызванного трещиной ГРП. Важным отличием от стандартной модели, использующейся при интерпретации ГДИС, является физически обоснованная возможность роста техногенных трещин.

В результате обзора литературы и нормативной документации были выявлены метрики, позволяющие количественно оценить точность и адекватность моделей относительно эталонных зна-

чений. Большинство перечисленных метрик применяются в области искусственного интеллекта и могут быть успешно использованы при верификации, валидации и адаптации моделей из других сфер деятельности человека. При этом неважно является модель стационарной или зависящей от времени.

Для сравнительного анализа двух моделей: базовой и расширенной, учитывающей влияние АГРП, - были выбраны девять наиболее релевантных метрик. Результаты анализа показали, что усовершенствованная модель обеспечивает более адекватное описание параметров работы исследуемой скважины, превосходя по точности базовую модель.

Открытым остается вопрос об обоснованной стандартизации значений перечисленных показателей в каждой области знаний. В настоящее время в большинстве случаев допустимый уровень расхождения между результатами моделирования и эталонными значениями определяется каждым пользователем программного обеспечения индивидуально, исходя из собственных потребностей и ограничений, что создает определенные сложности в определении уровня адекватности модели, варианта адаптации и т.д. Дальнейшие работы должны быть направлены на разработку и внедрение стандартизованных критериев оценки точности/адекватности и качества адаптации моделей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Копейкин Р.Р. Моделирование гидродинамических исследований скважин с учетом автоГРП в рядной системе разработки / Р.Р. Копейкин, Абдуллин Р.Ф., С.А. Калинин, Р.Ф., Б.Н. Старовойтова, А.Н. Байкин, С.В. Головин // Нефтяное хозяйство. – 2023. – №12. – С. 30-35.
2. ГОСТ Р 53712-2009. Месторождения нефтяные и газонефтяные. Программные средства для проектирования. Основные требования: национальный стандарт Российской Федерации: дата введения 2011-01-01 / Федеральное агентство по техническому регулированию. – Изд. официальное. – Москва: Стандартинформ, 2010. – 11 с.
3. ГОСТ Р 57700.37-2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения.
4. ГОСТ Р 57412-2017. Компьютерные модели в процессах разработки, производства и эксплуатации изделий. Общие положения. – М.: Стандартинформ, 2018. – 14 с.
5. Копейкин, Р.Р. Исследование поведения индикаторной кривой нагнетательной скважины с авто-ГРП / Р.Р. Копейкин, М.М. Хасанов // XIII Всероссийский Съезд по теоретической и прикладной механике: сборник тезисов докладов в 4 томах, 21–25 августа, 2023 г., Санкт-Петербург. Т. 4. Материалы симпозиумов и Исторической сессии. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2023. – С. 377-379.
6. Coussy O. Poromechanics. – Chichester: J.Wiley & Sons Ltd, 2004. – 360 pp. – DOI:10.1002/0470092718.
7. Dontsov E., Peirce A.P. Comparison of toughness propagation criteria for blade-like and pseudo-3D hydraulic fractures // Eng. Fract. Mech. – 2016. – V. 160. – P. 238–247. – <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2016.04.023>.
8. Кременецкий, М.И. Гидродинамические и промыслово-технологические исследования скважин / М.И. Кременецкий, А.И. Ипатов. – М.: МАКС Пресс, 2008. – 476 с.
9. Two-dimensional models for waterflooding induced hydraulic fracture accounting for the poroelastic effects on a reservoir scale / A.N. Baykin, R.F. Abdullin, E.V. Dontsov, S.V. Golovin // Geoenergy Sci. Eng. – 2023. – V. 224. – P. 211600. – <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2023.211600>.
10. Калинин, С.А. Анализ слияния трещин автоГРП в рядной системе разработки с помощью математического моделирования / С.А. Калинин, А.Н. Байкин, Р.Ф. Абдуллин, Б.Н. Старовойтова, И.Ш. Базыров, Р.Р. Копейкин, С.В. Головин, Е.Н. Кичигин // Нефтяное хозяйство. – 2022. – №12. – С. 40-45.
11. ГОСТ Р 53554-2009. Поиск, разведка и разработка месторождений углеводородного сырья. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2010. – 22 с.
12. ГОСТ Р ИСО 9000-2015. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь. – М.: Стандартинформ, 2015. – 14 с.
13. ГОСТ 15467-79. Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2009. – 22 с.
14. Приказ МПР РФ № 61 от 21.03. 2007 г. Рекомендации по проектированию разработки газонефтяных месторождений.
15. Временный регламент оценки качества и приемки трехмерных цифровых геолого-гидродинамических моделей, представляемых пользователями недр в составе технических проектов разработки месторождений углеводородного сырья на рассмотрение ЦКР Роснедр по УВС» (утвержденный Протоколом от 19.04.2012 N 5370 ЦКР Роснедра по УВС).
16. ГОСТ 28195-89. Оценка качества программных средств. Общие положения. – М.: Стандартинформ, 2018. – 30 с.
17. ГОСТ 28806-90. Качество программных средств. Термины и определения. – М.: ИПК издательство стандартов, 2001. – 14 с.
18. ГОСТ Р 56923-2016. Информационные технологии. Системная и программная инженерия. Управление жизненным циклом. – М.: Стандартинформ, 2016. – 108 с.
19. ГОСТ Р ИСО/МЭК 12119-2000. Информационная технология. Пакеты программ. Требования к качеству и тестирование. – М.: Стандартинформ, 2005. – 18 с.
20. ГОСТ Р ИСО/МЭК 9126-93. Информационная технология. Оценка программной продукции. Характеристики качества и руководства по их применению. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2004. – 12 с.
21. РД 153-39.0-047-00 Регламент постоянно действующих геолого-технологических моделей газонефтяных месторождений: дата введения 2019-07-01.
22. ГОСТ Р 57700.13-2018. Численное моделирование физических процессов. Численное моделирование многофазной фильтрации. Верификация ПО. – М.: Стандартинформ, 2018. – 20 с.
23. ГОСТ Р 57700.17-2018. Численное моделирование физических процессов. Численное моделирование дозвуковых течений вязких жидкостей и газов. Валидация ПО. – М.: Стандартинформ, 2018. – 36 с.

24. ГОСТ Р 57700.15-2018. Численное моделирование физических процессов. Численное моделирование ламинарных течений вязких жидкостей и газов. Валидация ПО. – М.: Стандартинформ, 2018. – 16 с.
25. ГОСТ Р 57700.25-2020 Компьютерные модели и моделирование. Процедуры валидации. – М.: Стандартинформ, 2020. – 12 с.
26. ГОСТ 15895-77 (СТ СЭВ 547-84). Статистические методы управления качеством продукции. Термины и определения. – М.: Издательство стандартов, 1991. – 48 с.
27. ГОСТ Р 50779.0-95. Статистические методы. Основные положения. – М.: Стандартинформ, 2008. – 8 с.
28. ГОСТ Р 50779.46-2012. Статистические методы. Управление процессами. Часть 4. Оценка показателей воспроизводимости и пригодности процесса. – М.: Стандартинформ, 2014. – 46 с.
29. ГОСТ Р 50779.70-2018. Статистические методы. Процедуры выборочного контроля по альтернативному признаку. Введение в стандарты серии ГОСТ Р ИСО 2859. – М.: Стандартинформ, 2018. – 16 с.
30. ГОСТ Р ИСО 22514-2-2015 Статистические методы. Управление процессами. Часть 2. Оценка пригодности и воспроизводимости процесса на основе модели его изменения во времени. – М.: Стандартинформ, 2016. – 28 с.
31. ГОСТ Р ИСО 3534-2-2019. Статистические методы. Словарь и условные обозначения. Часть 2. Прикладная статистика. – М.: Стандартинформ, 2019. – 108 с.
32. Тейлор, Дж. Введение в теорию ошибок / Дж. Тейлор. Пер. с англ. – М.: Мир, 1985. – 272 с.
33. ГОСТ Р 59898-2021. Оценка качества систем искусственного интеллекта. Общие положения. – М.: Российский институт стандартизации, 2021. – 20 с.
34. Regression-metrics // GeeksforGeeks.–URL: <https://www.geeksforgeeks.org/regression-metrics/> (дата обращения 26.09.2024).
35. Performance metrics in machine learning [complete guide] // neptune.ai. –URL: <https://neptune.ai/blog/performance-metrics-in-machine-learning-complete-guide> (дата обращения 21.09.2024).
36. Учебник по машинному обучению// Яндекс Образование. – URL: <https://education.yandex.ru/handbook/ml/article/metriki-klassifikacii-i-regressii> (дата обращения 27.09.2024).
37. 10 regression metrics for machine learning & practical how to guide // Spot intelligence. – URL: <https://spotintelligence.com/2024/03/27/regression-metrics-for-machine-learning/> (дата обращения 27.09.2024).

ADEQUACY INDICATORS OF THE GROWTH MODEL OF SPONTANEOUSLY DEVELOPING TECHNOGENIC CRACKS

© 2025 R.R. Kopeykin, V.A. Leventsov

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

The waterflood-induced hydraulic fracturing phenomenon has a significant impact on oil and gas production processes, so ignoring this effect can lead to both positive and negative consequences. The article provides a brief description of a single-phase hydrogeomechanical two-dimensional model of self-induced hydraulic fracturing growth. An important difference from the standard model used in the interpretation of well test analysis is the physically substantiated possibility of technogenic fracture growth. Objective assessment and comparison of physico-mathematical models of varying complexity, as well as the quality of their adaptation to real data is a task of primary importance. The paper provides an overview of existing accuracy indicators, also called adequacy indicators. Using these indicators, it is possible to assess the quality of model adaptation. On the example of the waterflood-induced hydraulic fracturing phenomenon, a quantitative assessment of physical and mathematical models of varying complexity was carried out using indicators of the quality of their adaptation to historical data. The use of quantitative metrics made it possible to conduct an objective comparative analysis of the two models. *Key words:* indicators of model accuracy, indicators of model adequacy, indicators of model adaptation quality, waterflooding process, reservoir pressure maintenance, man-made fracture, waterflood-induced hydraulic fracturing, poroelastic effect.

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-2-88-96

EDN: GJGIGV

REFERENCES

1. Kopejkin R.R. Modelirovanie gidrodinamicheskikh issledovaniy skvazhin s uchetom avtoGRP v ryadnoj sisteme razrabotki / R.R. Kopejkin, Abdullin R.F., S.A. Kalinin, R.F., B.N. Starovojtova, A.N. Bajkin, S.V. Golovin // Neftyanoe hozyaistvo. – 2023. – №12. – S. 30-35.
2. GOST R 53712-2009. Mestorozhdeniya neftnyane i gazoneftnyane. Programmnye sredstva dlya proektirovaniya. Osnovnye trebovaniya: nacional'nyj standart Rossijskoj Federacii: data vvedeniya 2011-01-01 / Federal'noe agentstvo po tekhnicheskomu regulirovaniyu. – Izd. oficial'noe. – Moskva: Standartinform, 2010. – 11 s.
3. GOST R 57700.37-2021. Komp'yuternye modeli i modelirovanie. Cifrovye dvojniki izdelij. Obshchie polozheniya.
4. GOST R 57412-2017. Komp'yuternye modeli v processah razrabotki, proizvodstva i ekspluatacii izdelij. Obshchie polozheniya. – М.: Standartinform, 2018. – 14 s.
5. Kopejkin, R.R. Issledovanie povedeniya indikatornoj krivoj nagnetatel'noj skvazhiny s avto-GRP / R.R. Kopejkin, M.M. Hasanov // XIII Vserossijskij S'ezd po teoreticheskoy i prikladnoj mekhanike: sbornik tezisov dokladov v

- 4 tomah, 21–25 avgusta, 2023 g., Sankt-Peterburg. T. 4. Materialy simpoziumov i Istoricheskoy sessii. – SPb.: POLITEH-PRESS, 2023. – S. 377–379.
6. Coussy O. Poromechanics. – Chichester: J.Wiley & Sons Ltd, 2004. – 360 pp. – DOI:10.1002/0470092718.
7. Dontsov E., Peirce A.P. Comparison of toughness propagation criteria for blade-like and pseudo-3D hydraulic fractures // Eng. Fract. Mech. – 2016. – V. 160. – P. 238–247. – <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2016.04.023>.
8. Kremeneckij, M.I. Gidrodinamicheskie i promyslovo-tehnologicheskie issledovaniya skvazhin / M.I. Kremeneckij, A.I. Ipatov. – M.: MAKSPRESS, 2008. – 476 s.
9. Two-dimensional models for waterflooding induced hydraulic fracture accounting for the poroelastic effects on a reservoir scale / A.N. Baykin, R.F. Abdullin, E.V. Dontsov, S.V. Golovin // Geoenergy Sci. Eng. – 2023. – V. 224. – P. 211600. – <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2023.211600>.
10. Kalinin, S.A. Analiz sliyaniya treshchin avtoGRP v ryadnoj sisteme razrabotki s pomoshch'yu matematicheskogo modelirovaniya / S.A. Kalinin, A.N. Bajkin, R.F. Abdullin, B.N. Starovojtova, I.Sh. Bazyrov, R.R. Kopejkin, S.V. Golovin, E.N. Kichigin // Neftyanoe hozyajstvo. – 2022. – №12. – S. 40–45.
11. GOST R 53554-2009. Poisk, razvedka i razrabotka mestorozhdenij uglevodorodnogo syr'ya. Terminy i opredeleniya.
12. GOST R ISO 9000-2015. Sistemy menedzhmenta kachestva. Osnovnye polozheniya i slovar'. – M.: Standartinform, 2015. – 14 s.
13. GOST 15467-79. Upravlenie kachestvom produkcii. Osnovnye ponyatiya. Terminy i opredeleniya. – M.: Standartinform, 2009. – 22 s.
14. Prikaz MPR RF № 61 ot 21.03. 2007 g. Rekomendacii po proektirovaniyu razrabotki gazoneftnykh mestorozhdenij.
15. Vremennyy reglament ocenki kachestva i priemki trekhmernykh cifrovyykh geologo-gidrodinamicheskikh modelej, predstavlyaemykh pol'zovatelyami nedr v sostave tekhnicheskikh proektov razrabotki mestorozhdenij uglevodorodnogo syr'ya na rassmotrenie CKR Rosnedr po UVS» (utverzhdenyy Protokolom ot 19.04.2012 N 5370 CKR Rosnedra po UVS).
16. GOST 28195-89. Ocenka kachestva programmykh sredstv. Obshchie polozheniya. – M.: Standartinform, 2018. – 30 s.
17. GOST 28806-90. Kachestvo programmykh sredstv. Terminy i opredeleniya. – M.: IPK izdatel'stvo standartov, 2001. – 14 s.
18. GOST R 56923-2016. Informacionnye tekhnologii. Sistemnaya i programmaya inzheneriya. Upravlenie zhiznennym ciklom. – M.: Standartinform, 2016. – 108 s.
19. GOST R ISO/MEK 12119-2000. Informacionnaya tekhnologiya. Pakety programm. Trebovaniya k kachestvu i testirovanie. – M.: Standartinform, 2005. – 18 s.
20. GOST R ISO/MEK 9126-93. Informacionnaya tekhnologiya. Ocenka programmykh produkcii. Harakteristiki kachestva i rukovodstva po ih primeneniyu. – M.: IPK Izdatel'stvo standartov, 2004. – 12 s.
21. RD 153-39.0-047-00 Reglament postoyanno dejstvuyushchih geologo-tehnologicheskikh modelej gazoneftnykh mestorozhdenij: data vvedeniya 2019-07-01.
22. GOST R 57700.13-2018. Chislennoe modelirovanie fizicheskikh processov. Chislennoe modelirovanie mnogofaznoj fil'tracii. Verifikaciya PO. – M.: Standartinform, 2018. – 20 s.
23. GOST R 57700.17-2018. Chislennoe modelirovanie fizicheskikh processov. Chislennoe modelirovanie dozvukovykh techenij vyazkikh zhidkostej i gazov. Validaciya PO. – M.: Standartinform, 2018. – 36 s.
24. GOST R 57700.15-2018. Chislennoe modelirovanie fizicheskikh processov. Chislennoe modelirovanie laminarnykh techenij vyazkikh zhidkostej i gazov. Validaciya PO. – M.: Standartinform, 2018. – 16 s.
25. GOST R 57700.25-2020 Komp'yuternye modeli i modelirovanie. Procedury validacii. – M.: Standartinform, 2020. – 12 s.
26. GOST 15895-77 (ST SEV 547-84). Statisticheskie metody upravleniya kachestvom produkcii. Terminy i opredeleniya. – M.: Izdatel'stvo standartov, 1991. – 48 s.
27. GOST R 50779.0-95. Statisticheskie metody. Osnovnye polozheniya. – M.: Standartinform, 2008. – 8 s.
28. GOST R 50779.46-2012. Statisticheskie metody. Upravlenie processami. Chast' 4. Ocenka pokazatelej vosproizvodimosti i prigodnosti processa. – M.: Standartinform, 2014. – 46 s.
29. GOST R 50779.70-2018. Statisticheskie metody. Procedury vyborochnogo kontrolya po al'ternativnomu priznaku. Vvedenie v standarty serii GOST R ISO 2859. – M.: Standartinform, 2018. – 16 s.
30. GOST R ISO 22514-2-2015 Statisticheskie metody. Upravlenie processami. Chast' 2. Ocenka prigodnosti i vosproizvodimosti processa na osnove modeli ego izmeneniya vo vremeni. – M.: Standartinform, 2016. – 28 s.
31. GOST R ISO 3534-2-2019. Statisticheskie metody. Slovar' i uslovnye oboznacheniya. Chast' 2. Prikladnaya statistika. – M.: Standartinform, 2019. – 108 s.
32. Tejlor, Dzh. Vvedenie v teoriyu oshibok / Dzh. Tejlor. Per. s angl. – M.: Mir, 1985. – 272 s., il.
33. GOST R 59898-2021. Ocenka kachestva sistem iskusstvennogo intellekta. Obshchie polozheniya. – M.: Rossijskij institut standartizacii, 2021. – 20 s.
34. Regression-metrics // GeeksforGeeks.–URL: <https://www.geeksforgeeks.org/regression-metrics/> (data obrashcheniya 26.09.2024).
35. Performance metrics in machine learning [complete guide] // neptune.ai. –URL: <https://neptune.ai/blog/performance-metrics-in-machine-learning-complete-guide> (data obrashcheniya 21.09.2024).
36. Uchebnik po mashinnomu obucheniyu // Yandex Obrazovanie. – URL: <https://education.yandex.ru/handbook/ml/article/metriki-klassifikacii-i-regressii> (data obrashcheniya 27.09.2024).
37. 10 regression metrics for machine learning & practical how to guide // Spot intelligence. – URL: <https://spotintelligence.com/2024/03/27/regression-metrics-for-machine-learning/> (data obrashcheniya 27.09.2024).