

Влияние способов нормировки целевой функции на результаты автоадаптации численной модели месторождения углеводородов

Еремян Г.А., Рукавишников В.С.

Центр подготовки и переподготовки специалистов нефтегазового дела Томского политехнического университета, Томск, Россия
eremyanga@hw.tpu.ru

Аннотация

Статья посвящена одному из аспектов формулировки целевой функции для проведения автоматизированной адаптации геолого-гидродинамических моделей месторождений углеводородов, а именно нормировке невязок. Для проведения автоадаптации необходимо задание целевой функции, которая описывает невязку расчета с историей и служит ориентиром для алгоритма оптимизации в поиске решений. Целью данной работы является изучение влияния способа нормировки на результаты адаптации на примере синтетической модели залежи и модели реального нефтяного месторождения. Новизна исследования заключается в имитации заколонного перетока в одной из добывающих скважин синтетической модели. Заколонный переток выступает в роли шума в данных истории работы скважины. Результаты данного исследования помогли понять, какой способ нормировки целевой функции более эффективен при адаптации и почему.

Материалы и методы

Основными методами в работе являются численное геолого-гидродинамическое моделирование, системный анализ и вычислительный эксперимент с использованием синтетической модели нефтяной залежи и секторной модели реального нефтяного месторождения, расположенного в Сибири.

Ключевые слова

геолого-гидродинамическое моделирование, нефтяное месторождение, численная модель, целевая функция, нормировка невязок, автоматизированная адаптация, автоадаптация модели, алгоритмы оптимизации, качество адаптации

Благодарность

Авторы выражают искреннюю благодарность Томскому политехническому университету и ООО «Газпромнефть НТЦ» за возможность проведения настоящего исследования в рамках совместного научно-исследовательского проекта на тему «Создание методологии адаптации геолого-гидродинамических моделей, управляемой геологическими неопределенностями», а также за разрешение опубликовать полученные результаты работы.

Для цитирования

Еремян Г.А., Рукавишников В.С. Влияние способов нормировки целевой функции на результаты автоадаптации численной модели месторождения углеводородов // Экспозиция Нефть Газ. 2020. № 6. С. 81–86. DOI: 10.24411/2076-6785-2020-10112

Поступила в редакцию: 17.11.2020

OIL PRODUCTION

UDC 622.276:532:519.876 | Original Paper

Influence of the objective function normalization method on the reservoir model history matching result

Eremyan G.A., Rukavishnikov V.S.

Petroleum Learning Centre of Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia
eremyanga@hw.tpu.ru

Abstract

The article is devoted to the mismatch normalization as one of the aspects of the objective function formulation for automated history matching of hydrocarbon reservoir models. To carry out history matching, it is necessary to define the objective function that describes the discrepancy between simulation results and observed data. Objective function guides the optimization algorithm to move in the right direction across the model parameter space in the search for solutions. The aim of the work is to compare the influence of the normalization method on history matching results using the example of a synthetic model and a model of a real oil field. The novelty of this study is in the introduction of a behind-the-casing crossflow simulated in one of the production wells of the synthetic model. The crossflow acts as noise in the well observed data. The results of this research allowed to understand which method of the objective function normalization is more effective for history matching and why.

Materials and methods

The main methods in this study are numerical reservoir simulation, system analysis and computational experiment using a synthetic reservoir model and a sector model of a real oil field located in Siberia.

Keywords

reservoir simulation, oil field, numerical model, objective function, mismatch normalization, automated history matching, optimization algorithms, history matching quality

For citation

Eremyan G.A., Rukavishnikov V.S. Influence of the objective function normalization method on the reservoir model history matching results. Exposition Oil Gas, 2020, issue 6, P. 81–86. (In Russ). DOI: 10.24411/2076-6785-2020-10112

Received: 17.11.2020

Введение

Современная разработка и эксплуатация месторождений углеводородов (УВ) не обходится без геолого-гидродинамического моделирования, неотъемлемой частью которого является адаптация параметров модели на исторические показатели работы скважин. Роль адаптации заключается в приведении расчетных показателей разработки месторождения в соответствие с наблюдаемыми. Адаптация модели производится путем варьирования значений параметров модели, характеризующих геологические и фильтрационные свойства пласта в пределах присущих им неопределенности.

Для проведения автоматизированной адаптации необходимо задание целевой функции, которая описывает невязку расчета с историей и позволяет алгоритму оптимизации двигаться в верном направлении в поиске решений.

Проблематика выбора целевой функции для автоадаптации изучалась рядом исследователей. В работе Бертолини А.К. [3] описывается влияние 8 разных видов целевой функции на качество и скорость адаптации. Рассматриваемые целевые функции отличались нормировкой, способом взвешивания и математическим выражением невязки. В работе Речунгура Р.У. [11] описывается адаптация модели реального месторождения на данные истории разработки и данные сейсморазведки. В исследовании Бута Р. [4] используется единая целевая функция в виде метода наименьших квадратов (МНК), включающая компоненты исследуемой и наблюдательной скважин в рамках гидродинамических исследований скважин (ГДИС). Исследователь пришел к выводу, что для корректного учета влияния данных каждой скважины необходимо использовать нормировку данных на погрешности и применять весовые коэффициенты. В работе Шакарами А. [12] применена единая целевая функция в виде среднеквадратического отклонения, нормированная на разницу между максимальным и минимальным измеренным значением для каждой скважины и компонента. В публикации Бозаркуны З. [5] предложено использование метрики Хаусдорфа в качестве

целевой функции. Значительное количество публикаций посвящено исследованиям по оптимальному заданию и группированию целей для адаптации посредством многокритериального подхода [2, 6, 7, 8].

Однако на сегодняшний день не существует единого обоснованного подхода к заданию вида целевой функции, который бы обеспечивал достижение задач адаптации с наименьшими вычислительными затратами. Одним из важных аспектов при задании целевой функции является выбор способа нормировки невязок. Целью данной работы является изучение влияния способа нормировки на результаты адаптации на примере синтетической модели залежи и модели реального нефтяного месторождения. Новизна исследования заключается в имитации заколонного перетока в одной из добывающих скважин синтетической модели. Заколонный переток выступает в роли шума в данных истории работы скважины. Результаты данного исследования помогли понять, какой способ нормировки целевой функции более эффективен при адаптации и почему.

Расчет целевой функции

Целевая функция в виде суммарного среднеквадратического отклонения рассчитывается по следующей формуле:

$$GOF = \sum_{i=1}^n \sum_{q=1}^m w_i w_q \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n w_k (S_{q,ik} - O_{q,ik})^2}{\sum_{k=1}^n w_k}}, \quad (1)$$

где GOF — глобальная целевая функция, S — расчетное и O — историческое значение компонента q идентификатора i на временном шаге k , w — весовые коэффициенты, n — число шагов, $norm$ — нормировка невязок на погрешности измерений σ либо на исторические значения O .

В коммерческих гидродинамических симуляторах с возможностью автоадаптации расчет целевой функции автоматизирован. Однако пользователю необходимо задать компоненты, способ нормировки и весовые коэффициенты для целевой функции, прежде чем переходить к процессу оптимизации.

Подходы и методы, используемые в работе

Алгоритм расчета целевой функции включает в себя нормировку невязок. Основными способами нормировки являются нормировка на погрешность измерения или на историческое значение. На рисунке 1 представлены графики аналитического расчета невязок с разными способами нормировки. В верхней части рисунка — динамика показателей разработки месторождения, сплошными линиями показаны расчетные значения, точками — исторические. Красными кругами обведены невязки по дебиту нефти и дебиту воды в начале и конце разработки.

Погрешности измерений характеризуют расхождение в абсолютных величинах. Для разных типов данных погрешности разные, зависят от типов приборов, принципа измерения, фактического износа комплектующих, от величины измеряемых параметров и прочего. Важным преимуществом данного варианта нормировки является возможность задавать разный уровень погрешности для разных компонентов целевой функции. Как правило, дебиты жидкости имеют существенно более высокую точность измерения, чем забойные и пластовые давления.

Нормировка на историческое значение вносит вклад в целевую функцию пропорционально относительному расхождению расчета от измерения. С одной стороны, такой вариант нормировки может быть проще и удобнее. Простота в том, что не требуется задавать погрешности измерений. Удобство в том, что разнородные компоненты целевой функции одинаково описываются одним видом расхождения.

Отсутствие возможности задавать разный уровень погрешностей для разных компонентов целевой функции относится скорее к недостаткам, так как не позволяет достигать желаемый уровень допустимого расхождения расчета с историей.

Существует и более значительный недостаток нормировки на историческое значение. С инженерной точки зрения картина изменений значения нормированной невязки справа лучше отражает качество адаптации, то есть близость показателей разработки (рис. 1).

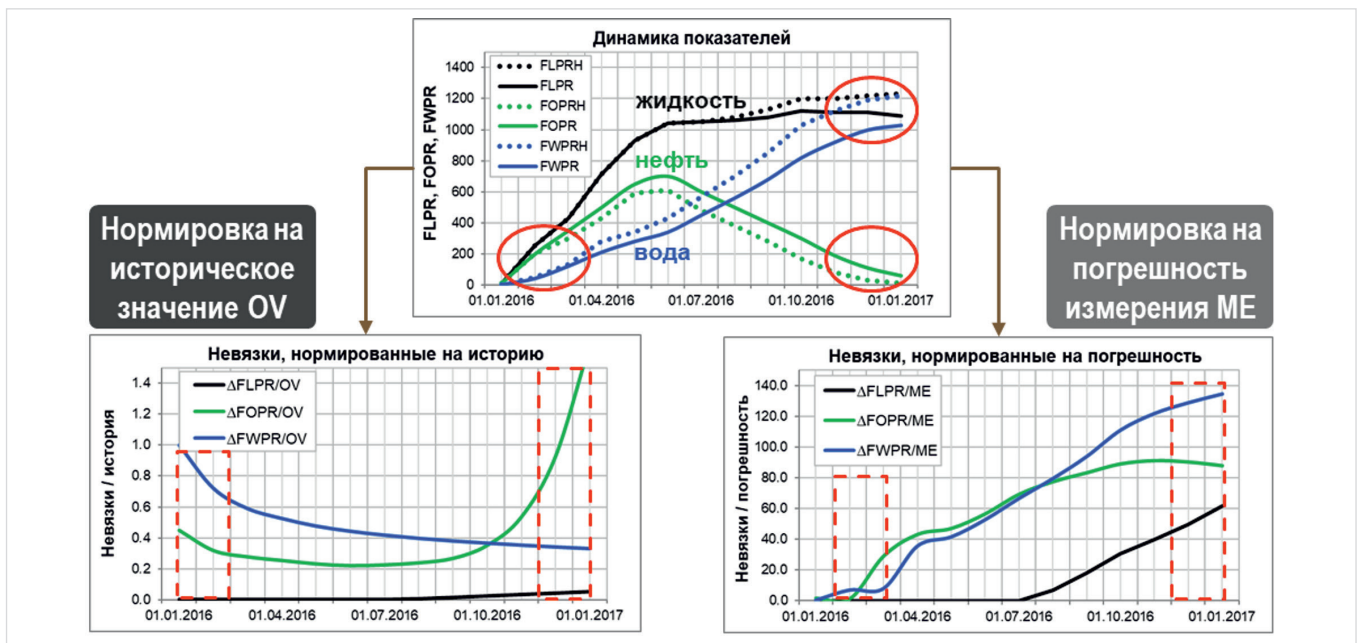


Рис. 1. Способы нормировки целевой функции
Fig. 1. Objective function normalization methods

Невязки растут от начала к концу рассматриваемого периода. В варианте нормировки на историю (слева) виден скачок нормированных невязок в самом начале и в самом конце, причем маленькое расхождение нефти в конце вносит большой вклад, так как историческое значение мало. Большое расхождение по дебиту воды в конце периода наоборот вносит самый маленький вклад в значение целевой функции, что нелогично с инженерной точки зрения.

Для проверки аналитических умозаключений проведены вычислительные эксперименты на построенной синтетической модели и модели реального нефтяного месторождения, расположенного в Сибири. Синтетическая модель SRM-6 состоит из 6 скважин, из которых 3 добывающие и 3 нагнетательные. Имитируется разработка методом заводнения с 7 годами истории. В качестве параметров адаптации выбрано 8 параметров, отвечающих за проницаемость, водонасыщенность и уровень зеркала свободной воды.

Секторная модель реального месторождения состоит из 49 скважин, из которых 31 добывающая и 18 нагнетательных. Месторождение разрабатывается методом заводнения с 16 годами истории: с 2001 по 2017 год. В качестве параметров адаптации выбрано 20 переменных, характеризующих существующие геологические и петрофизические неопределенности [1, 9, 10].

В качестве оптимизационного алгоритма в работе использовалась эволюционная стратегия. В работе все численные эксперименты проводились при одинаковых настройках алгоритма оптимизации, менялась только нормировка целевой функции.

Результаты расчетов на синтетической модели

При расчетах на модели SRM-6 была осуществлена имитация заколонного перетока в добывающей скважине P2. Обводненность резко выросла до 99,9% и держалась на протяжении трех месяцев с сентября по ноябрь 2011 года. Дебит нефти упал до 0,001 м³/сут. Затем после ремонтно-изоляционных работ в декабре 2011 года дебит нефти вернулся к уровню до заколонного перетока. Значение целевой функции в ходе адаптации уменьшалось, как и положено при оптимизации (рис. 2).

Однако, как показали результаты, на шагах расчета, где историческое значение на порядки меньше расчетного, происходит большой вклад в целевую функцию за счет деления на малую величину. В целевой функции модели 5-й итерации (зеленая линия) на сентябрь 2011 года создается пиковое значение нормированной невязки по дебиту нефти равное 155 000, в то время как на остальных шагах времени данная величина варьируется в пределах 1. Данный эффект приводит к тому, что оптимизатор, пытаясь минимизировать значение целевой функции, игнорирует адаптацию на других участках, где отсутствует описанный эффект (рис. 3).

С каждой итерацией значение целевой функции уменьшается, но показатели работы скважин всё хуже воспроизводятся моделью, то есть такая целевая функция не характеризует качество адаптации (рис. 2, 3). Сравнение результатов адаптации с нормировкой на исторические значения и нормировкой на погрешности измерений (по умолчанию равны 1) (рис. 4). Из одного и того же набора моделей первого приближения (исходная популяция) получены совершенно разные результаты

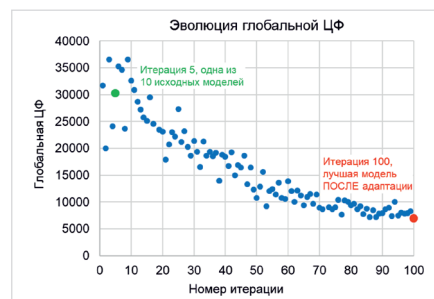


Рис. 2. Эволюция целевой функции, нормированной на исторические значения
Fig. 2. Evolution of the objective function normalized to the observed values

адаптации. Поведение дебитов и давлений согласуется с общим ухудшением адаптации при нормировке на историю и общим улучшением адаптации при нормировке на погрешности. Данный пример ярко демонстрирует важность формулировки целевой функции для результатов решения оптимизационной задачи и, что более важно, для получения качественного результата с инженерной точки зрения.

На практике дебиты и приемистости измеряются расходомерами в обязательном порядке. Особое внимание уделяется точному измерению дебитов нефти, поскольку именно ради добычи и реализации углеводородов разрабатывается месторождение.

Результаты расчетов на модели реального месторождения

Для проверки выводов, полученных в результате численных экспериментов на синтетической модели SRM-6, была проведена

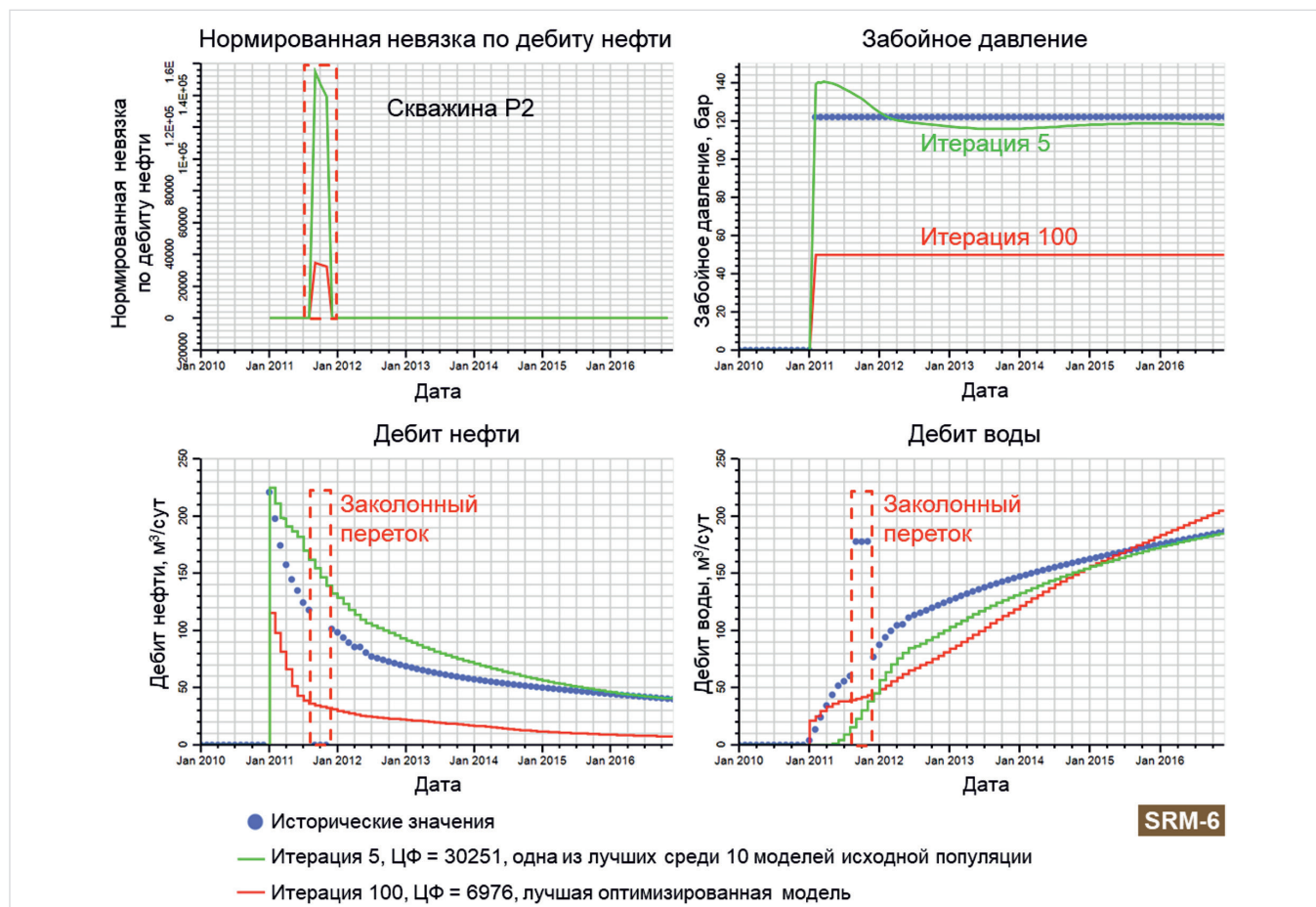


Рис. 3. Пример ухудшения качества адаптации при использовании целевой функции, нормированной на исторические значения
Fig. 3. Example of history matching quality deterioration when using the objective function normalized to the observed values

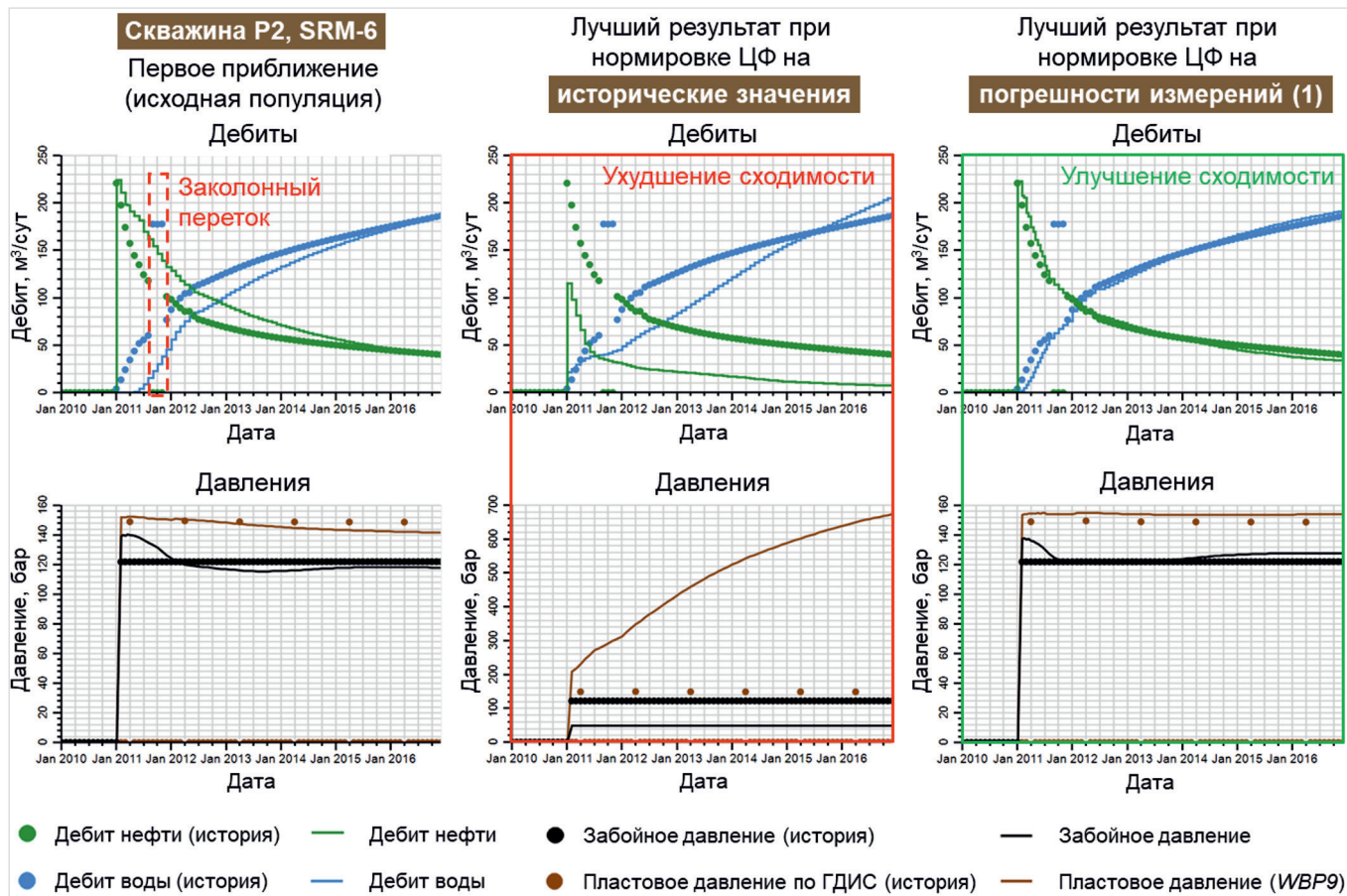


Рис. 4. Сравнение результатов адаптации на примере скважины P2 при разных нормировках целевой функции
 Fig. 4. Comparison of history matching results for P2 well when using objective function normalized to the observed values and to the measurement errors

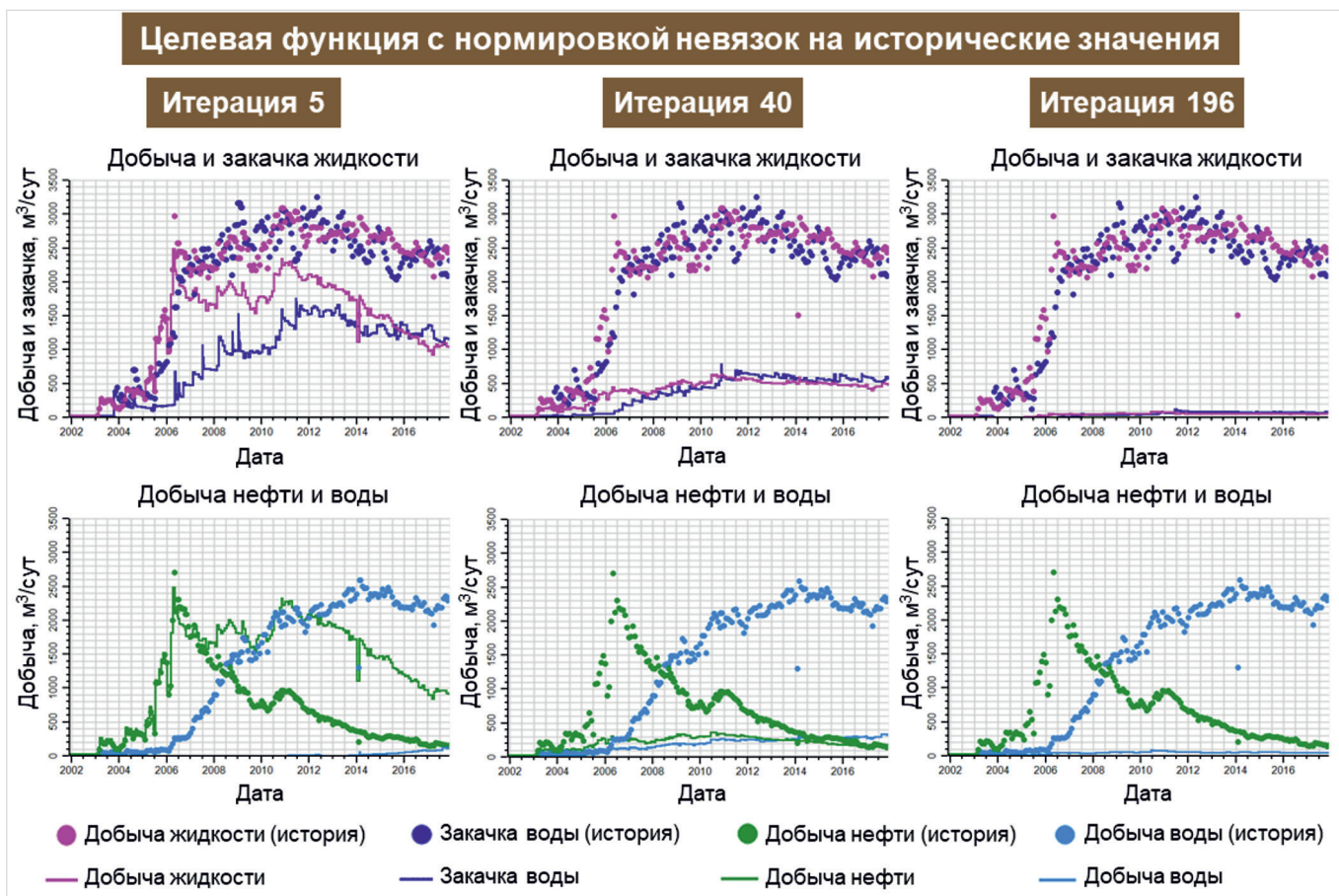


Рис. 5. Эволюция показателей разработки сектора в случае адаптации с нормировкой целевой функции на исторические значения
 Fig. 5. Evolution of the sector development indicators in case of history matching with objective function normalized to the observed values

адаптация секторной модели реального нефтяного месторождения с нормировкой на исторические значения и на погрешности измерений. По умолчанию погрешности измерений для всех типов данных равны 1. Всего проведено 2 цикла оптимизации по 200 итераций в каждом.

На рисунке 5 показаны результаты адаптации с целевой функцией, нормированной на исторические значения. Значения целевой функции, как и положено, минимизируются в

течение оптимизации. Для оценки фактического качества адаптации построены графики показателей разработки месторождения для моделей на итерациях 5, 40 и 196. По данным показателям очевидно, что качество адаптации ухудшается в процессе оптимизации.

Причиной полученного неуспешного результата является наличие очень малых значений по истории работы некоторых скважин сектора. В таком случае при делении расчетного значения на очень малое значение

истории происходит пиковый вклад в значение целевой функции. Далее весь процесс оптимизации работает на минимизацию вклада, созданного этим пиком, поскольку он выше, чем все остальные невязки (рис. 6).

В рассмотренном случае адаптации несоразмерно большой вклад создают дебиты нефти и воды скважин I7, I9 и I18. Наиболее ярким примером служит скважина I9, вносящая огромный вклад в целевую функцию за счет всего лишь одной точки исторического

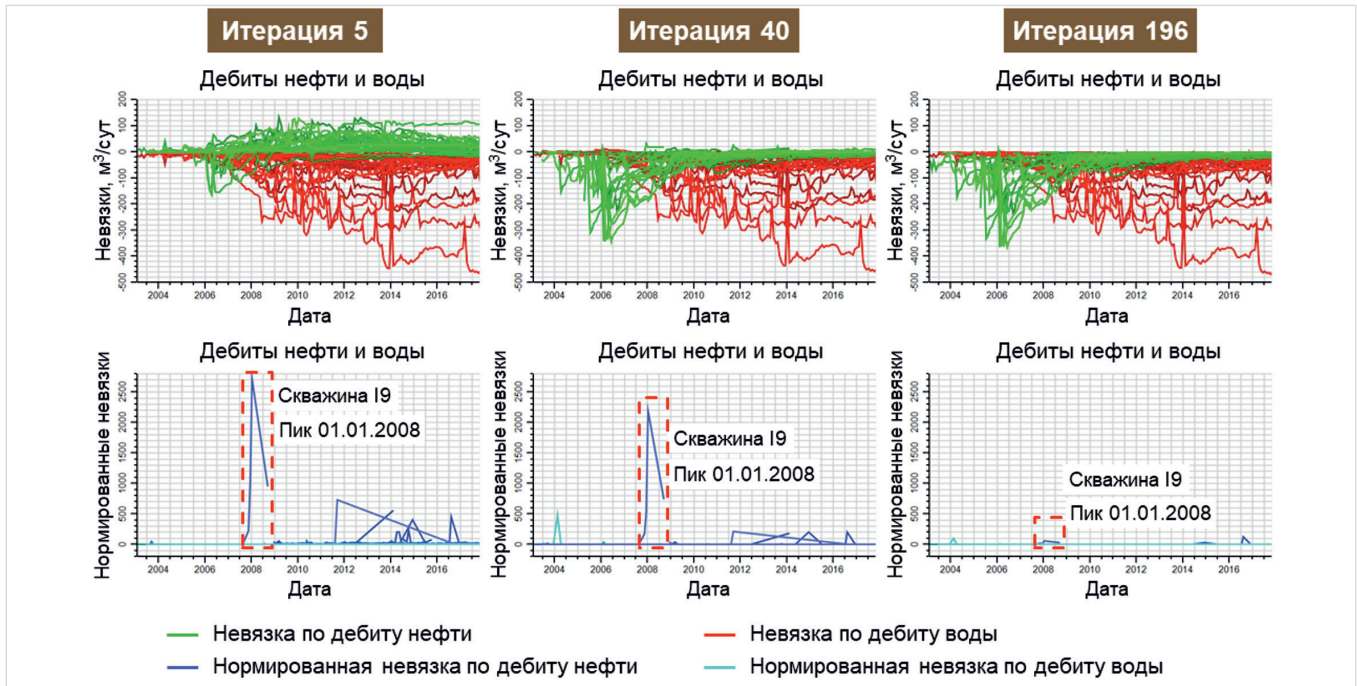


Рис. 6. Эволюция невязок при адаптации с целевой функцией, нормированной на исторические значения
Fig. 6. Mismatch evolution in case of history matching with the objective function normalized to the observed values

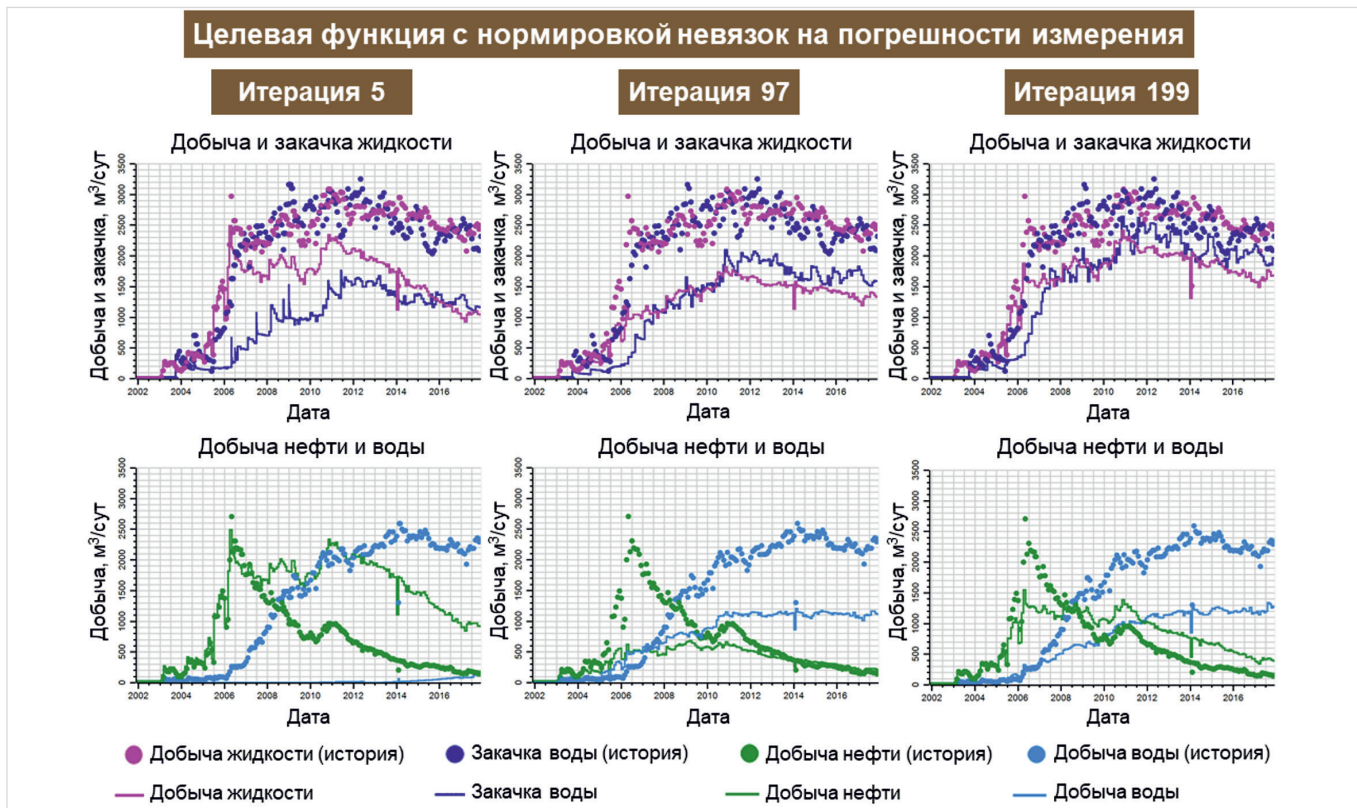


Рис. 7. Эволюция показателей разработки сектора в случае адаптации с нормировкой целевой функции на погрешности измерений
Fig. 7. Evolution of the sector development indicators in case of history matching with objective function normalized to the measurement errors

дебита нефти, равного 0,1 м³/сут на момент 01.01.2008 года незадолго до перевода скважины из режима добычи в нагнетательный фонд. Нормированная невязка при этом создает пик величиной в несколько тысяч, в то время как большинство остальных нормированных невязок варьируется в пределах 10.

Результаты адаптации секторной модели реального месторождения с использованием целевой функции, нормированной на погрешности измерений (равны 1 по умолчанию), представлены на рисунке 7.

В данном случае с каждой итерацией уменьшаются не только значения целевой функции, но и расхождения между расчетными и историческими показателями разработки месторождения. Результаты итерации 199 говорят о том, что к концу заданного цикла оптимизации объема добытой и закаченной жидкости довольно близки к историческим. Соблюдение материального баланса является обязательным условием для использования модели в качестве надежного прогностического инструмента. Полного совпадения добычи и закачки в цикле из 200 адаптаций не достигнуто, нужно больше итераций. Однако динамика на улучшение адаптации обнадеживающая.

Итоги

Как показали результаты численных экспериментов, при нормировке целевой функции на исторические значения адаптация модели может стать невозможной. Происходит это при делении расчетного значения на существенно меньшее историческое значение. Чем больше скважин и данных, тем больше подобный риск при нормировке на историю.

Выводы

При выборе целевой функции рекомендуется задавать погрешности измерения для компонентов целевой функции на основе физического и инженерного понимания, что позволит автоадаптации быть обоснованной не только с математической точки зрения. Кроме этого, исключается риск получения проблем с оптимизацией при нормировке на малую величину из данных истории.

При нормировке целевой функции на погрешности измерения есть риск получить несоизмеримые между собой вклады компонентов в целевую функцию в том случае, когда величины разнородных данных истории в численном выражении сильно отличаются друг от друга. В подобном случае предлагается использовать весовые коэффициенты для компонентов целевой функции.

Представленные результаты являются частью исследования по разработке методики выбора оптимальной целевой функции для автоадаптации. Дальнейшим направлением работ является изучение степени и характера влияния на эффективность целевой функции математического выражения невязок, компонентного состава и способов взвешивания целевой функции.

Литература/References

1. Шишаев Г.Ю., Матвеев И.В., Еремян Г.А., Демьянов В.В., Кайгородов С.В. Геологически обоснованная автоматизированная адаптация гидродинамических моделей на примере реального месторождения // Нефтяное хозяйство. 2020. № 6. С. 58–61. Shishaev G.Y., Matveev I.V., Eremyan G.A., Demyanov V.V., Kaygorodov S.V. Geologically plausible computer-aided history matching on the example of one of the oil fields. Oil Industry, 2020, issue 6, P. 58–61. (In Russ).
2. Almeida F.L.R., Formentin N.H., Maschio C., Davolio A., Schiozer J.D. Influence of Additional Objective Functions on Uncertainty Reduction and History Matching. Denmark, Copenhagen, 2018, 11–14 June, SPE Europec featured at 80th EAGE Conference, SPE-190804-MS.
3. Bertolini A.C., Schiozer J.D. Influence of the objective function in the history matching process. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2011, Vol. 78, issue 1, P. 32–41. (In English).
4. Booth R., Bertolini A.C., Morton K.L., Fitzpatrick A.J. Design of objective function for interference well testing. Brazil, Rio de

Janeiro, 2013, 29–31 October, Offshore Technology Conference, OTC-24513-MS.

5. Bouzarkouna Z., Nobakht B., Karim N.A. Better formulation of objective functions for history matching using hausdorff distances. Spain, Madrid, 2015, 1–4 June, EUROPEC 2015, SPE-174302-MS. 2015.
6. Carneiro J., Azevedo L., Pereira M. High-dimensional geostatistical history matching. Computational Geosciences, 2018, Vol. 22, issue 1, P. 607–622.
7. Ferreira C.J., Davolio A., Schiozer D.J. Use of a probabilistic and Multi-Objective history matching for uncertainty reduction for the norne benchmark case. France, Paris, 2017, 12–15 June, SPE Europec featured at 79th EAGE Conference. SPE-185837-MS
8. Hutahaean J.J., Demyanov V.V., Christie M.A. On optimal selection of objective grouping for multiobjective history matching. SPE Journal, vol. 22, issue 04, 17 p. SPE-185957-PA.
9. Matveev I.V., Shishaev G.Y., Eremyan G.A. et al Geology driven history matching. Russia, Moscow, 2019, 22–24 October, SPE Russian Petroleum Technology Conference. SPE-196881-MS.
10. Matveev I., Shishaev G., Eremyan G., Konoshonkin D., Demyanov V., Kaygorodov S. Geology realism control in automated history matching. United Kingdom, Edinburgh, 2020, 14–17 September, Conference Proceedings, ECMOR XVII, Vol. 2020, P. 1–9.
11. Rwechungura R.W., Dadashpour M., Kleppe J. Advanced history matching techniques reviewed. Bahrain, Manama, 2011, 25–28 September, SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference. SPE-142497-MS.
12. Shahkarami A., Mohaghegh S.D., Gholami V., Haghight S.A. Artificial intelligence (AI) assisted history matching. Colorado, Denver, 2014, 17–18 April, SPE Western North American and Rocky Mountain Joint Meeting. SPE-169507-MS.

ENGLISH

Results

As shown by the results of the numerical experiments, when normalizing the objective function to the observed values, obtaining the history matched models closely reproducing the historical data may become impossible. This happens when normalizing a simulated value to a significantly lower observed value while defining the objective function. The more wells and data, the greater this risk.

Conclusions

It is recommended to set measurement errors for the components of the objective function based on physical and engineering understanding, which will make history matching justified not only from a mathematical point of view.

In case of normalizing the objective function to the measurement errors, there is a risk of getting incomparable contributions of components to the objective function because the data of different types may have significantly different magnitude. In such cases use of weight coefficients for objective function components may compensate for their different magnitudes.

The presented results are a part of the research aiming to develop a methodology for optimal objective function formulation for history matching. A further area of work is the research of influence of the other objective function formulation aspects on the efficiency of the objective function for history matching. In particular, it is necessary to study the influence of the mathematical expression of the mismatch, inclusion of components and weighing methods.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Еремян Грачик Араикович, инженер-исследователь, Центр подготовки и переподготовки специалистов нефтегазового дела Томского политехнического университета, Томск, Россия.
Для контактов: eremyanga@hw.tpu.ru

Рукавишников Валерий Сергеевич, директор, Центр подготовки и переподготовки специалистов нефтегазового дела Томского политехнического университета, Томск, Россия.

Eremyan Grachik AraiKovich, research engineer, Petroleum Learning Centre of Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia.
Corresponding author: eremyanga@hw.tpu.ru

Rukavishnikov Valeriy Sergeevich, director, Petroleum Learning Centre of Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia.