

УДК 519.63

Математическое моделирование нестационарного течения однофазной жидкости в однопоровых коллекторах с использованием web-технологий*

Мазитов А.А.¹, Губайдуллин И.М.¹, Тишкин В.Ф.^{1,2}

Институт нефтехимии и катализа РАН¹, ИПМ им. М.В. Келдыша РАН²

Аннотация: Наиболее эффективным методом изучения фильтрационных свойств пласта и жидкостей являются гидродинамические исследования скважин. Для математического моделирования течения нефти, а также анализа и интерпретации данных гидродинамических исследований скважин предлагается использовать web-приложение. Теоретической основой для приложения служит математическая модель течения однофазной жидкости в однопоровом коллекторе, для которой построен вычислительный алгоритм решения. Разностная схема получена с использованием конечных разностей. Полученная система уравнений решена методом скалярной прогонки.

Ключевые слова: математическое моделирование, метод конечных разностей, метод скалярной прогонки, web-приложения.

1. Актуальность

Увеличение темпа отбора флюида из продуктивного пласта и поддержание пластового давления являются приоритетными целями на всех стадиях разработки нефтяного месторождения. Планирование работ по эффективному освоению и оптимальной эксплуатации нефтяной скважины носит комплексный характер, связанным с гидродинамическими процессами, происходящими при течении жидкости в системе «скважина-пласт». Наиболее эффективным методом изучения продуктивных свойств пластов и жидкостей являются гидродинамические исследования скважин (ГДИС). Средствами ГДИС проводится замер совокупности характеристик коллектора с использованием глубинных или устьевых приборов, а также последующая обработка замеров и интерпретация полученных данных (продуктивность, фильтрационные свойства жидкостей, тип коллектора и т. д.) [1].

В ГДИС пласт представляется в виде системы. Основной задачей является определение параметров этой системы. В качестве входных данных выступает изменение режима работы скважины, а выходных – реакция системы, выражающаяся в виде изменения динамики пластового давления. Анализ и интерпретация результатов исследования проводятся путем построения кривых падения или восстановления давления на основе теоретических моделей, которые базируются на классических уравнениях и законах.

Для анализа и интерпретации результатов ГДИС существует ряд программных средств. Подавляющее большинство таких программ являются настольными приложениями, распространяющимися по платным лицензиям. Многие из них имеют

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 21-71-20047 - Разработка теоретических основ и создание высокопроизводительных алгоритмов для двухфазных математических моделей фильтрации жидкости в коллекторах трещиновато-порового типа

перегруженный интерфейс, что вызывает сложности при эксплуатации. Кроме того, значительная часть – зарубежное программное обеспечение. В настоящее время остро стоит вопрос о переходе на отечественные программные продукты. В виду вышеизложенного, для решения задач математического моделирования течения нефти, а также для анализа и интерпретации результатов ГДИС предлагается использовать web-приложения.

В последние годы web-разработка активно развивается, появляются новые технологии, с помощью которых можно реализовывать сложные пользовательские сценарии. Web-приложения выделяются простой реализацией, легкостью применения, высокой производительностью, их основными характеристиками являются: доступность, надежность, безопасность, масштабируемость, гибкость, кроссплатформенность. Они могут быть развернуты как в существующей сетевой инфраструктуре, так и удаленно – подключением к серверу.

Таким образом, математические постановки задач с учетом нестационарного течения жидкости во всех его элементах: пластах, трубах скважин и проточных каналах, разработка эффективных численных методов и алгоритмов, их решения с применением современных web-технологий, являются актуальными [2].

2. Постановка задачи

Рассматривается добывающая скважина, гидродинамическое исследование которой проводится методом кривой восстановления давления. Скважина эксплуатирует терригенный коллектор, содержащий один вид пористости. Коллектор обладает высокой пористостью и низкой проницаемостью. Пласт является неограниченным. Течение флюида в пласте – горизонтальное, перетоки между пропластками отсутствуют. Воздействие соседних скважин отсутствует, либо не оказывает влияние. Скважина работает на установившемся режиме с постоянным забойным давлением. На границе контура поддерживаются постоянные давление и температура. Для проведения исследования измерительный прибор спускается на глубину верхних дыр перфорации. Расчет динамики давления и температуры проводится в пространственно-одномерном случае.

Течение нефти описывается системой дифференциальных уравнений в частных производных:

$$\phi c_t \frac{\partial P}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{k}{\mu} r \frac{\partial P}{\partial r} \right) \quad (1)$$

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) - c\rho u \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \epsilon \frac{\partial P}{\partial r} \right) + \eta \phi c\rho \frac{\partial P}{\partial t} \quad (2)$$

Первое уравнение описывает процесс перераспределения давления в пласте, второе – процесс теплопереноса в жидкости. Первоначальным шагом решения исходной системы является приведение его к системе линейных алгебраических уравнений, для этого используется метод конечных разностей, в котором дифференциальные выражения заменяются разностными. Таким образом получаются трехточечные уравнения, которые решаются методом скалярной прогонки [3].

Задача является нестационарной, поэтому метод скалярной прогонки применяется для определения пространственного распределения давления и температуры пласта на каждом временном слое. Задача решена последовательно, на первом этапе – уравнения для давления, на втором – для температуры.

3. Используемые технологии

Для автоматизации решения поставленной задачи разработано web-приложение. Входными данными для приложения являются данные о параметрах модели: фильтрационные свойства пласта (пористость, проницаемость и т. д.) и свойства жидкости (вязкость, плотность и т. д.), а выходными – графики, отражающие зависимости пластового давления и температуры от времени или пространства.

Конечный вид приложения определяют инструменты, выбранные для его разработки. Инструментами разработки являются парадигма программирования, язык программирования, инструментальная среда разработки, технологии разработки.

Приложение реализует клиент-серверную архитектуру. Серверная часть (BackEnd) выполняется на удаленном компьютере, она написана на языке программирования Python с использованием микрофреймворка Flask, который является простым в освоении, позволяет масштабировать ядро под разные задачи, имеет инструменты для отладки и тестирования, а также сопровождается подробной документацией. Серверная часть с помощью стандартных драйверов обменивается данными с базой данных, реализованной средствами СУБД PostgreSQL. Клиентская часть (FrontEnd) выполняется в браузере, она написана на языке программирования JavaScript. Для создания пользовательского интерфейса используется платформа vue.js, которая отлично подходит для разработки как одностраничных приложений, так и сложных коммерческих платформ. Клиентская и серверная части между собой обмениваются через RestApi по протоколу HTTP. Сборка проекта осуществляется в виде двух докер-контейнеров под серверами nginx.

Литература

1. Деева Т.А., Камартдинов М.Р., Кулагина Т.Е., Мангазеев П.В. Гидродинамические исследования скважин: анализ и интерпретация данных. Томск. 2009. 243 с.
2. Bobreneva Yu.O., Mazitov A.A., Gubaydullin I.M. Researching the mechanisms of fluid flow in the fracture-porous reservoir based on mathematical modeling // Computational Mathematics and Information Technologies. 2018. Vol.2, No.2. P. 133-143.
URL: <https://doi.org/10.23947/2587-8999-2018-2-2-133-143>
3. Мазитов А.А., Бобренёва Ю.О., Губайдуллин И.М., Повещенко Ю.А. Математическое моделирование многофазного потока в однопоровом коллекторе // В сборнике Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2022. № 62. С. 1-14.
URL: <https://doi.org/10.20948/prepr-2022-62>

MSC 35K55

Mathematical modeling of unsteady single-phase fluid flow in single-pore reservoirs using web-technologies

A.A. Mazitov¹, I.M. Gubaydullin¹, V.F.Tishkin^{1,2}

Institute of Petrochemistry and Catalysis¹, Keldysh Institute of Applied Mathematics²

Abstract: The most effective method for studying the filtration properties of the reservoir and fluids are hydrodynamic studies of wells. For mathematical modeling of oil flow, as well as analysis and interpretation of data from hydrodynamic studies of wells, it is proposed to use a web application. The theoretical basis for the application is a mathematical model of the flow of a single-phase fluid in a single-pore reservoir, for which a computational solution algorithm has been developed. The difference scheme was obtained by the finite difference method, which is solved by the scalar sweep method.

Keywords: mathematical modeling, finite difference method, scalar sweep method, web applications.

References

1. Deeva T.A., Kamartdinov M.R., Kulagina T.E., Mangazeev P.V. *Gidrodinamicheskiye issledovaniya skvazhin: analiz i interpretatsiya dannykh.* Tomsk. 2009. 243 p.
2. Bobreneva Yu.O., Mazitov A.A., Gubaydullin I.M. Researching the mechanisms of fluid flow in the fracture-porous reservoir based on mathematical modeling // *Computational Mathematics and Information Technologies.* 2018. Vol.2, No.2. P. 133-143.
URL: <https://doi.org/10.23947/2587-8999-2018-2-2-133-143>
3. Mazitov A.A., Bobreneva Yu.O., Gubaydullin I.M. Mathematical modeling of a multiphase flow in a single-pore reservoir // *Keldysh Institute PREPRINTS.* 2022. No.62. P. 1-14.
URL: <https://doi.org/10.20948/prepr-2022-62>