

УДК 532.546

АВТОМАТИЗАЦИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ФЛЮИДОНАСЫЩЕННЫХ ПЛАСТОВ МЕТОДОМ ВОЛН ДАВЛЕНИЯ

В.Л. Одиванов, А.Г. Гаврилов, М.Н. Овчинников

Аннотация

В статье рассматриваются возможные приложения разработанного сотрудниками кафедры радиоэлектроники Казанского государственного комплекса гидродинамических экспериментов, проводимых в промышленных условиях. Данный комплекс включает реализацию метода фильтрационных волн давления и использование автоматизированной системы управления экспериментами. Он позволяет выявить тип фильтрационной модели исследуемого пласта, рассчитать значения его фильтрационных параметров, что необходимо для принятия управленческих решений по оптимизации разработки нефтяного месторождения.

Ключевые слова: фильтрация жидкостей, поле давлений, пористые среды, фильтрационные волны, контрольно-измерительные системы.

1. Основы и возможности метода фильтрационных волн давления

Современная технология разработки нефтяного месторождения предполагает использование регулярно обновляемых баз данных о текущем состоянии фильтрационных параметров геологически и гидродинамически обособленных участков нефтяного пласта и результатах оптимизационных мероприятий по их выработке. При этом общая схема работ по выработке участка нефтенасыщенного пласта в части гидродинамических экспериментов и воздействий состоит из трех этапов:

- 1) проведение промышленных гидродинамических экспериментов с целью определения соответствующей модели вырабатываемого участка;
- 2) определение фильтрационных параметров пласта (ФПП), анализ баз данных по динамике этих параметров и использование их при построении постоянно действующей модели (ПДМ) участка;
- 3) управление разработкой участка путем задания стационарных и нестационарных режимов работы совокупности нагнетательных и эксплуатационных скважин по выбранным оптимизирующим схемам задания вариантов разработки индивидуально для каждой скважины.

Реализация метода фильтрационных волн давления (ФВД) заключается в задании и регистрации на одной скважине (или группе скважин) периодических возмущений в виде изменения расхода жидкости. Одновременно регистрируются отклик на это возмущение в виде изменения давления на этой же скважине (режим самопрослушивания) и отклики в виде изменения давления на соседних скважинах (межскважинное прослушивание, или фильтрационная «томография», пласта). Первые аналитические выражения расчёта ФПП для линейных фильтрационных моделей по методу ФВД были получены и исследованы С.Н. Бузиновым и И.Д. Умрихиным [1] и развиты Ю.М. Молоковичем [2], массовые промышленные эксперименты были проведены Н.Н. Непримеровым, позже продолжены

А.В. Штаниным [2]. При моделировании и интерпретации результатов исследования пласта нестационарными гидродинамическими методами обычно используется эволюционное уравнение пьезопроводности (или его модификации), описывающее пространственно-временное изменение давления, вида

$$\tau_q \frac{\partial^2 p(r, t)}{\partial t^2} + \frac{\partial p(r, t)}{\partial t} = \chi \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial}{\partial r} \left(p(r, t) + \tau_p \frac{\partial p(r, t)}{\partial t} \right), \quad (1)$$

где $p(r, t)$ – давление, χ – пьезопроводность, τ_q, τ_p – постоянные размерности времени. В соответствии с этой моделью в случае создания периодических изменений давления в одной или нескольких скважинах пласта в нём будут распространяться волны давления с фазовой скоростью, зависящей от частоты

$$V_f = \frac{\sqrt{\chi \omega}}{\left(\frac{1 + \omega^2 \tau_q^2}{1 + \omega^2 \tau_p^2} \right)^{1/4} \cos \left(\frac{1}{2} \arctg \left(\frac{1 + \omega^2 \tau_p \tau_q}{\omega(\tau_p - \tau_q)} \right) \right)}. \quad (2)$$

Отсюда путем исследования формы сигналов ФВД и дисперсионной кривой можно выявить тип фильтрационной модели, определяемый структурой пористой среды [3]. Расчёты гидропроводности ε и комплекса χ/r_c^2 в рамках классической фильтрационной модели пласта (при $\tau_q = \tau_p = 0$), являющейся аналогом уравнения диффузии по закону Фика, при установившемся режиме фильтрации в условиях самопрослушивания скважины осуществляются из решения уравнений:

$$\frac{1}{2\pi\varepsilon} \frac{q_n}{X_{cn}} \left(\frac{\text{Ker}^2(X_{cn}) + \text{Kei}^2(X_{cn})}{\text{Ker}_1^2(X_{cn}) + \text{Kei}_1^2(X_{cn})} \right)^{1/2} = P_{cn}, \quad (3)$$

$$\delta_{cn} = \arctg \frac{\text{Ker}(X_{cn}) \text{Kei}_1(X_{cn}) - \text{Ker}_1(X_{cn}) \text{Kei}(X_{cn})}{\text{Ker}_1(X_{cn}) \text{Ker}(X_{cn}) + \text{Kei}_1(X_{cn}) \text{Kei}(X_{cn})} - \frac{\pi}{4}. \quad (4)$$

Для межскважинного прослушивания используются формулы:

$$\frac{1}{2\pi\varepsilon} \frac{q_n}{X_n} \left(\frac{\text{Ker}^2(X_n) + \text{Kei}^2(X_n)}{\text{Ker}_1^2(X_{cn}) + \text{Kei}_1^2(X_{cn})} \right)^{1/2} = P_{rn}, \quad (5)$$

$$\Delta_n = \arctg \frac{\text{Kei}(X_n) \text{Ker}_1(X_{cn}) - \text{Ker}(X_n) \text{Kei}_1(X_{cn})}{\text{Ker}_1(X_n) \text{Ker}(X_{cn}) + \text{Kei}_1(X_{cn}) \text{Kei}(X_n)} - \frac{\pi}{4}. \quad (6)$$

Здесь $X_{cn} = r_c(\omega_n/\chi)^{1/2}$, $X_n = r_*(\omega_n/\chi)^{1/2}$, $\text{Ker}_1(x)$, $\text{Ker}(x)$, $\text{Kei}(x)$, – функции Кельвина 0 и 1 порядков; P_{c0} – постоянная составляющая давления; P_{cn} – амплитуда n -й гармоники давления на возмущающей скважине; q_n – амплитуда n -й гармоники дебита на возмущающей скважине; P_n – амплитуда n -й гармоники давления на реагирующей скважине; δ_{cn} , Δ_n – разность фаз между n -ми гармониками дебита и давления на возмущающей и реагирующей скважинах соответственно; χ – пьезопроводность пласта; ε – гидропроводность пласта; r_c – приведенный радиус скважины; r_* – расстояние между скважинами по пласту. Значения величин P_{c0} , P_{cn} , q_n , δ_{cn} , P_n , Δ_n определяются в результате гармонического анализа при математической обработке экспериментальных кривых $q(t)$, $P_c(t)$ и $P_*(t)$, и служат для расчёта гидродинамических параметров χ , ε , r_c .

Проведенные оценки относительных погрешностей при расчетах фильтрационных параметров в условиях неустановившегося режима волн давления показывают, что в межскважинном пространстве они не превышают в большинстве актуальных

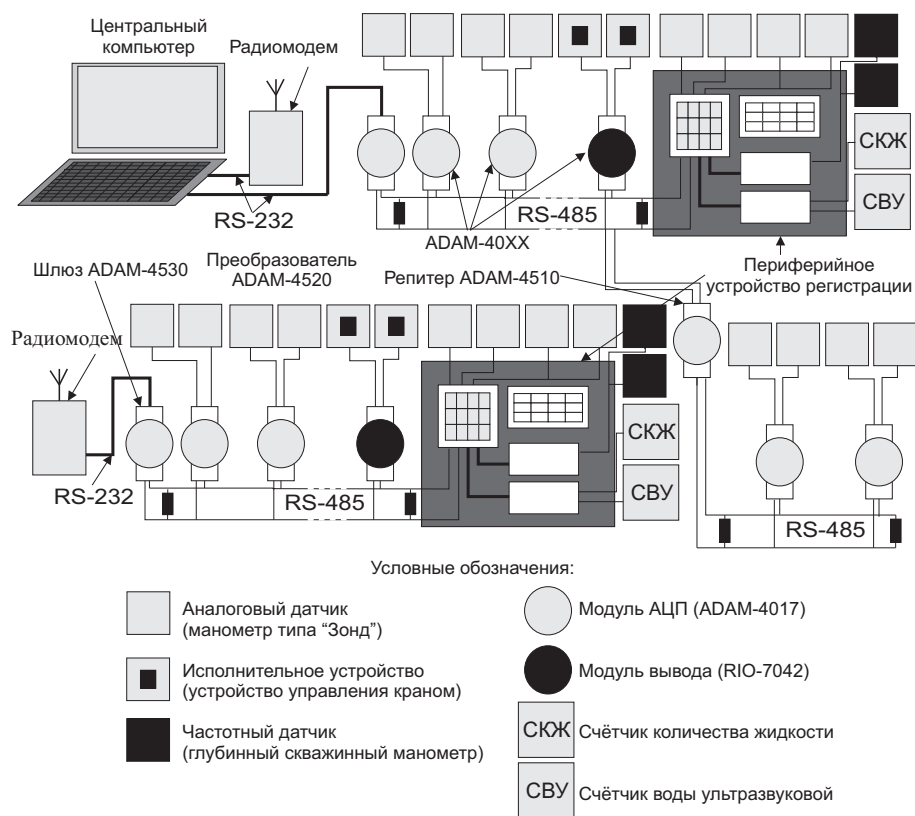


Рис. 1. Аппаратная конфигурация комплекса распределенной регистрации

случаев 10% при учете результатов измерений, начиная со второго периода задания колебаний. Отметим также, что при проведении экспериментов с различными периодами воздействия и получении частотной зависимости параметров можно на основе ряда предположений оценить местоположение фронта закачиваемой воды [4] и некоторые другие характеристики исследуемого интервала пласта в направлениях между конкретными скважинами. Метод ФВД позволяет также определить диапазон оптимальных частот воздействия на трещиновато-пористые коллекторы с целью увеличения обмена жидкостей в системе «блоки – трещины» [5].

2. Автоматизация экспериментов в полевых условиях

Для управления гидродинамическими экспериментами сотрудниками Казанского государственного университета было разработано несколько вариантов автоматизированных систем. На рис. 1 приведена схема аппаратной конфигурации одной из последних версий программно-аппаратного комплекса. Функции элементов этого комплекса состоят в следующем.

- Центральный компьютер осуществляет управление экспериментом и регистрацию данных. Он связан локальной сетью с другими компьютерами, на которых также установлены программные приложения комплекса.
- Радиомодемы обеспечивают связь с обслуживаемыми объектами. Со стороны центрального компьютера радиомodem подключается к последовательному порту, а со стороны объекта – к линии RS-485 через шлюзовой модуль ADAM-4530.

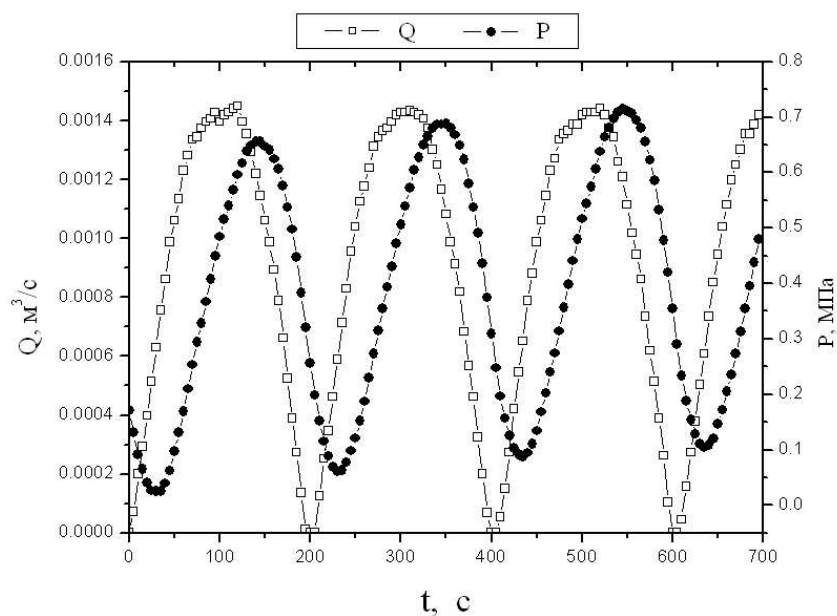


Рис. 2. Реализация квазипериодических временных зависимостей расхода и давления при периоде воздействия $T = 202$ с

- Измерительные модули ADAM-4017, ADAM-4080 осуществляют преобразование сигналов аналоговых или частотных датчиков в цифровую форму для передачи по RS-485 центральному компьютеру.

- Управляющие модули ADAM-40XX предназначены для управления подключенными исполнительными устройствами, в частности шаговым двигателем устройства управления потоком.

Для проведения экспериментов по гидродинамическому зондированию призабойной зоны системы «пласт–скважина» в режиме самопрослушивания в составе комплекса имеется устройство управления потоком жидкости, включающее в себя специальный кран [6], регулирующий во времени расход проходящей через него жидкости по закону, близкому к гармоническому. Кран приводится во вращение шаговым двигателем с редуктором, что позволяет задавать период вращения с высокой точностью в диапазоне от десятков секунд до полутора суток. Для иллюстрации работы программно-аппаратного комплекса и возможностей методики ФВД представим результаты экспериментов по гидродинамическому зондированию межскважинных интервалов, проведенного на опытном участке Центрально-Азнакаевской площади Ромашкинского месторождения. Самопрослушивание системы «пласт–скважина» методом ФВД рассмотрим на примере исследования одной из нагнетательных скважин этого же участка. Интерпретация полученных результатов проведена в рамках модели классического упругого режима фильтрации. Пример регистрируемых графиков зависимостей расхода жидкости $Q(t)$ и давления $P(t)$ в скважине в режиме периодического самопрослушивания при периоде воздействия $T = 202$ с представлен на рис. 2. Условия проведения этого эксперимента: регистрируемые параметры – давление и дебит на устье скважины; режим работы скважины – нагнетание воды от насосной станции; управление расходом – с помощью устройства управления потоком; периоды воздействия – от 100 с до 6 ч.

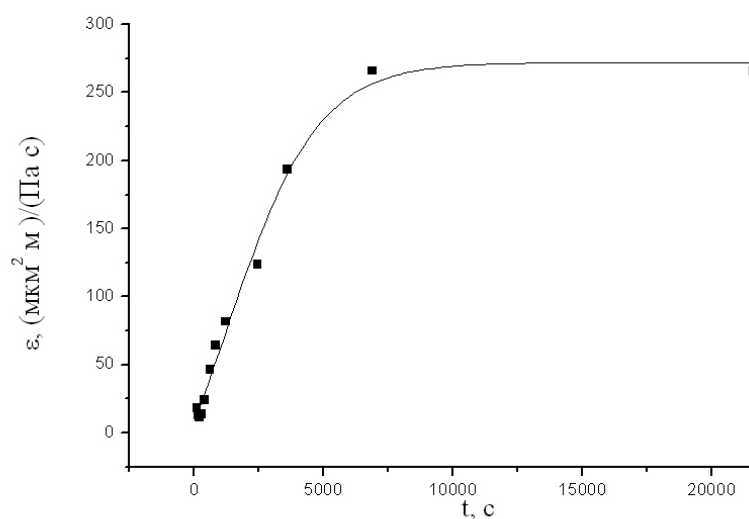


Рис. 3. Расчетная по данным экспериментов (квадраты) и модельная (сплошная линия) гидропроводности призабойной зоны исследуемой скважины (ϵ) при различных периодах воздействия (T)

На рис. 3 приведен график, показывающий изменение гидропроводности вблизи этой же скважины по мере увеличения периода воздействия, что эквивалентно в режиме самопрослушивания для данной системы увеличению радиуса зоны фильтрационного зондирования. В данном случае наблюдаемый рост расчётной гидропроводности при увеличении периода воздействия говорит об ухудшенных фильтрационных свойствах призабойной зоны скважины вблизи самой скважины.

Ниже приведены результаты экспериментов по межскважинному прослушиванию пласта. В рассматриваемой системе из 6 скважин с рабочими пластами на глубине 1750 м: № 1 – нагнетательная скважина, задающая периодические изменения давления в пласте (возмущающая скважина, на которой регистрируются дебит и давление); №№ 2–6 – реагирующие скважины, в них регистрируются отклики по давлению; период воздействия – 2 сут; время дискретизации при регистрации данных по всем каналам – 5 мин. Графики исходных данных давления на устьях реагирующих скважин вместе с графиками расхода и давления на задающей скважине приведены на рис. 4. При расчете ФПП были получены результаты, приведенные в табл. 1.

Из таблицы видно, что значения гидропроводностей и пьезопроводностей в различных межскважинных интервалах отличаются на десятки процентов, что демонстрирует возможности метода ФВД по определению макромасштабных неоднородностей пластов. Таким образом, рассмотренная методика проведения гидродинамических экспериментов в натуральных условиях с использованием системы радиоэлектронных устройств и датчиков позволяет решить комплекс задач по определению текущих значений фильтрационных параметров пластов, оценить состояние призабойной зоны отдельных скважин, выявить диапазоны оптимальных частот воздействия на трещиновато-пористые коллекторы и неоднородности распределения фильтрационных параметров в межскважинном пространстве. Помехоустойчивость и большая информативность метода ФВД по сравнению с стандартным методом кривых восстановления давления позволяют эффективно использовать полученные с его применением сведения о распределениях фильтрационных параметров пластов при построении постоянно действующих компьютерных моделей

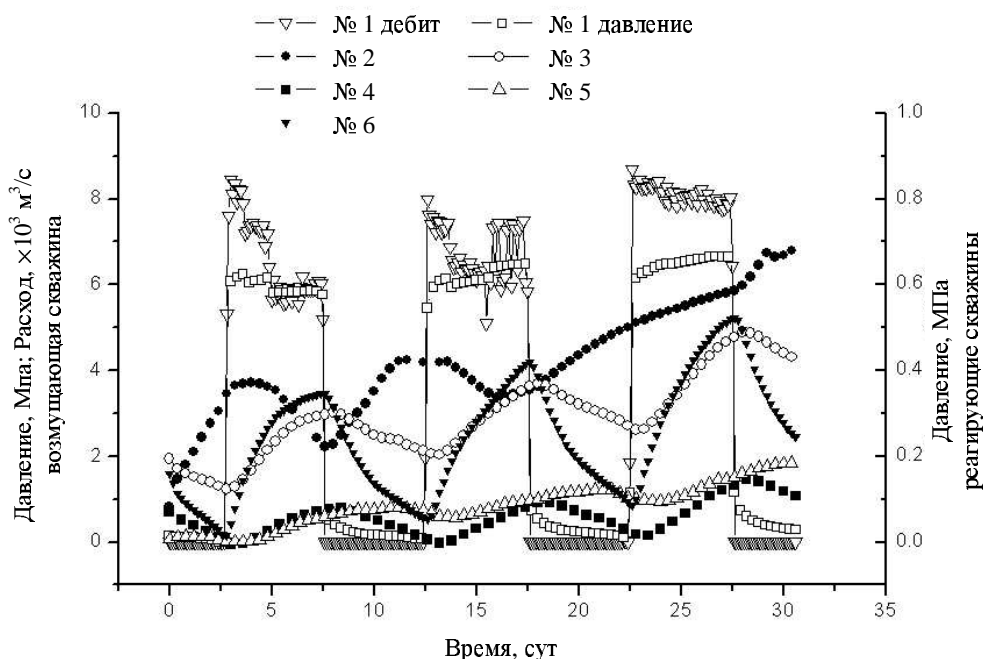


Рис. 4. Реализация одновременно регистрируемых изменений во времени давления и расхода на возмущающей скважине и давлений на реагирующих скважинах

Табл. 1

Расчётные значения фильтрационных параметров в межскважинных интервалах

Параметр/Скважина	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6
Расстояние между забоями скважин, м		805	370	600	555	755
Гидропроводность интервала, $\times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{Па}\cdot\text{с}$	0.214	0.228	0.209	0.226	0.260	0.190
Пьезопроводность интервала, $\text{м}^2/\text{с}$		2.067	3.521	3.298	2.080	1.809

месторождений (ПДМ). ПДМ позволяют рассчитывать и прогнозировать различные варианты разработки нефтяных месторождений и являются важнейшим элементом в системе принятия решений по оптимизации нефтедобычи [7].

Summary

V.L. Odivanov, A.G. Gavrilov, M.N. Ovchinnikov. Automation of Research on Saturated Porous Media by Pressure Waves Method.

The practicable applications of the investigative technique evolved at Kazan State University Radioelectronic Chair in the field of hydrodynamical experiments in natural porous media are considered. This technique developed from filtrational waves of pressure method combined with original automated control system. It enables to verify the filtrational models and calculate the saturated porous media parameters for the purpose of oil development optimization.

Key words: fluid filtration, pressure field, porous media, filtrational waves, control and measuring systems.

Литература

1. Бузинов С.Н., Умрихин И.Д. Исследование нефтяных и газовых скважин и пластов. – М.: Недра, 1984. – 256 с.
2. Молокович Ю.М., Непримеров Н.Н., Пикуза В.И., Штанин А.В. Релаксационная фильтрация. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1980. – 136 с.
3. Овчинников М.Н. Интерпретация результатов исследований пластов методом фильтрационных волн давления. – Казань: Новое знание, 2003. – 84 с.
4. Молокович Ю.М., Шкуро А.С. Использование волн давления для определения границы раздела двух сред, имеющих различные коэффициенты пьезопроводности // Вопросы усовершенствования разработки нефтяных месторождений Татарии: Сб. ст. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1962. – С. 17–38.
5. Молокович Ю.М., Марков А.И., Сулейманов Э.И., Фархуллин Р.Г. Выработка трещиновато-пористого коллектора нестационарным дренированием. – Казань: Регентъ, 2000. – 156 с.
6. Гаврилов А.Г., Матюшкин И.Ф., Штанин А.В. Устройство для регулирования потока жидкости: А.С. 1626035 СССР // И.Б. – 1991. – № 5. – 3 с.
7. Овчинников М.Н., Гаврилов А.Г., Непримеров Н.Н., Штанин А.В. Разработка нефтяного месторождения как комплексная междисциплинарная технология // Научные технологии. – 2004. – Т. 5, № 4. – С. 20–26.

Поступила в редакцию
29.09.09

Одиванов Владимир Леонидович – инженер-исследователь Казанского института биохимии и биофизики КазНЦ РАН.

E-mail: *Odivanov@mail.ru*

Гаврилов Александр Геннадьевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник кафедры радиоэлектроники Казанского государственного университета.

E-mail: *Alexander.Gavrilov@ksu.ru*

Овчинников Марат Николаевич – доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой радиоэлектроники Казанского государственного университета.

E-mail: *Marat.ovchinnikov@ksu.ru*