

УДК 622.333.03:556.3

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА НАГНЕТАНИЯ ПРИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ

И.Г. Однокопылов, В.В. Гнеушев*, Д.А. Сизиков*, В.В. Шишляев*

Томский политехнический университет

*ОАО «Газпром промгаз», г. Москва

E-mail: odivan@yandex.ru

Совершенствование методик исследований пластов трещино-поровых коллекторов средней и низкой проницаемости является актуальной задачей при выборе технологий разработки метаноугольных месторождений. Рассматриваются технические решения автоматизации процесса управления нагнетанием флюида при проведении гидродинамических исследований угольных пластов на репрессии (инжект-тест).

Ключевые слова:

Гидродинамические исследования скважин, метаноугольные месторождения, угольные пласты, автоматизация, инжект-тест, асинхронный электропривод.

Key words:

Well test analysis, coalbed methane reservoirs, coal seams, automation, injection-falloff test, induction motor drive.

Угольный пласт представляет собой нетрадиционный коллектор трещиновато-пористого типа с двойной пористостью. Микропористость матрицы угля, содержащая на поверхности сорбированный метан, характеризуется значениями проницаемости в 10^{-9} мкм², макропористая проницаемость, сформированная системой трещин эндогенной отделимости и слоистости, — кливажем. Размеры пустот колеблются от нескольких ангстрем до миллиметров и определяют широкий диапазон значений проницаемости углей, достигающих 0,1 мкм². При рассмотрении конкретного геолого-структурного элемента метаноугольного месторождения можно сделать вывод, что на значения проницаемости оказывают влияние много факторов, таких как напряженно-деформированное состояние массива, метаморфизм, микрокомпонентный состав и физико-механические свойства углей.

В условиях открытых гидрогеологических систем, к которым относится большинство метаноугольных месторождений Кузбасса, пластовое давление близко к гидростатическому. При снижении давления в угольном пласте до критического давления десорбции начинается процесс фазового перехода метана из сорбированного состояния в свободное. Газ диффузионным потоком направляется в трещины различного порядка с последующей фильтрацией к скважине. Постепенно понижая уровень воды в скважине ниже наиболее глубокого продуктивного пласта, формируется депрессионная воронка, в пределах которой основным флюидом в пластах является метан. Поэтому фильтрационные свойства вскрытых пластов угля определяют зону влияния скважины, динамику выхода скважины на максимальные дебиты и, как следствие, применяемые технологии разработки месторождений.

Определение проницаемости угольных пластов и оценка состояния околоскважинного пространства на всех этапах поисково-разведочных работ и

разработки метаноугольных месторождений является одной из основных геолого-промысловых задач. Предпочтительным методом получения необходимой информации о фильтрационных характеристиках угольных пластов являются гидродинамические исследования скважин (ГДИС) [1–3].

Данные, полученные при гидродинамических исследованиях, используются как исходные для гидродинамического моделирования, позволяют выбирать технологии интенсификации притока газа и осуществлять выбор оптимального режима работы технологического оборудования скважины на периоды ее освоения и эксплуатации.

При исследовании большого количества объектов в разведочных скважинах важно выбрать оптимальный метод ГДИС, который позволит получить в сжатые сроки корректные значения фильтрационных характеристик продуктивных горизонтов. На начальных этапах разработки месторождений до вызова притока флюида из угольных пластов, когда основная система трещинных каналов заполнена пластовой жидкостью, эффективным методом исследования фильтрационных характеристик угольных пластов является инжект-тест. Целью данной статьи является рассмотрение особенностей проведения гидродинамических исследований на репрессии в средне- и низкопроницаемых коллекторах, а также составление возможных вариантов автоматизации процесса нагнетания, что повысит эффективность и точность инъекционного теста.

Инжект-тест реализуется нагнетанием жидкости в пласт на протяжении определенного периода времени и последующим закрытием скважины и регистрацией кривой изменения забойного давления. В научных работах [4, 5] зарубежные специалисты отмечают, что при проведении таких испытаний фильтрационный поток в системе трещин считается однофазным, интерпретация таких исследований значительно упрощается по сравне-

нию с технологиями ГДИС при многофазном потоке, которые учитывают относительные фазовые проницаемости. Схема компоновки подземного оборудования, используемого при проведении инжест-теста, представлена на рис. 1.

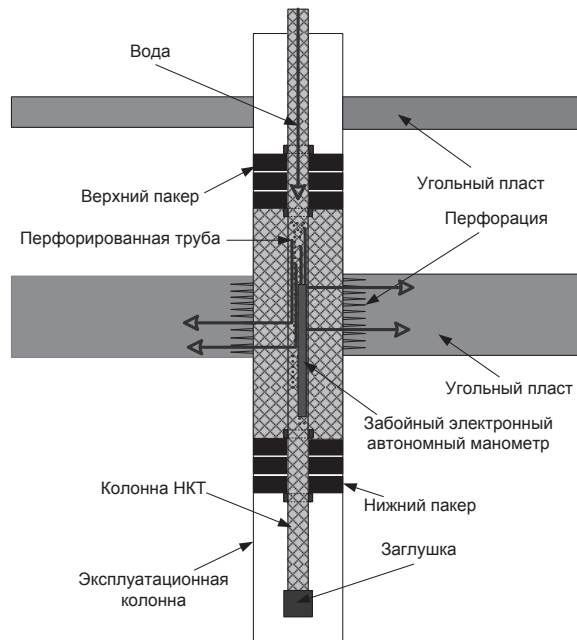


Рис. 1. Схема компоновки подземного оборудования, используемого при проведении инжест-теста

Для осуществления правильной интерпретации гидродинамических исследований, проводимых в скважинах, необходимо иметь надежные входные параметры, определяющие физические свойства горного массива, вмещающего угольные пласты и фильтрующиеся в нем флюиды. При планировании ГДИС необходимо определить время нагнетания жидкости в угольный пласт, время регистрации кривой падения давления, расходы жидкости при закачке.

При математическом описании гидродинамических процессов, происходящих в пласте во время испытания, предполагается, что пласт является горизонтальным с постоянной мощностью, бесконечным по протяженности, однородным и изотропным по своей структуре и без нарушений (экранов, сбросов и т. д.) в зоне исследования.

Первым шагом при планировании инжест-теста является оценка времени влияния объема ствола скважины.

Для снижения влияния объема ствола скважины необходимо проводить заполнение колонны насосно-компрессорных труб (НКТ) (рис. 1) технической жидкостью до устья. При полностью заполненной НКТ, постоянная ствола в скважине определяется по формуле:

$$C = 0,785 D_{\text{НКТ вн.}}^2 L_{\text{пл}} c_{\text{ж}}, \quad (1)$$

где $D_{\text{НКТ вн.}}$ — внутренний диаметр НКТ, м; $L_{\text{пл}}$ — длина компоновки оборудования до исследуемого пласта, м; $c_{\text{ж}}$ — коэффициент сжимаемости флюида, 1/атм.

Для расчета времени, когда эффект влияния объема ствола скважины при регистрации падения давления перестанет быть значимым, применяется следующее уравнение:

$$t = \frac{22105C \exp(0,14s)}{(k \cdot h / \mu)}, \quad (2)$$

где C — коэффициент влияния ствола скважины, м³/атм (1); k — проницаемость пласта, мД; h — мощность пласта, м; μ — вязкость жидкости, сПз; s — скин-фактор.

Для того чтобы уменьшить риск получения непредставительных данных вследствие влияния объема ствола скважины или образования трещин при закачке в уравнение (2) необходимо подставить минимально-ожидаемое значение проницаемости. Длительность периода падения давления должна быть, по возможности, в 5–10 раз больше рассчитанного времени влияния объема ствола скважины.

Для того чтобы определить максимальный расход жидкости при закачке можно воспользоваться следующим уравнением:

$$q_{\text{ж}} = \frac{kh(P_{\text{з}} - P_{\text{пл}})}{18,41B\mu[\ln(R_{\text{др}} / r_{\text{скв}}) + s - 3/4]}, \quad (3)$$

где $P_{\text{пр}}$ — пластовое давление, атм; $P_{\text{з}}$ — максимальное возможное забойное давление в период закачки, атм; $R_{\text{др}}$ — радиус дренирования скважины при исследовании, м.

Необходимо отметить, что если расход жидкости подобран правильно и будет поддерживаться постоянным, то устьевое давление в скважине при проведении испытания будет оставаться избыточным, что устранил изменение коэффициента влияния ствола скважины, а самое главное, упростит последующую интерпретацию данных ГДИС.

В период закачки при создании возмущения в прискважинной зоне необходимо проводить непрерывный мониторинг устьевого и забойного давления и поддерживать постоянный расход жидкости. Поскольку угольные пласты обладают низкой проницаемостью и высокой сжимаемостью поро-во-трещинного пространства (в пределах от $1,5 \cdot 10^{-4}$ до $0,5 \cdot 10^{-4}$ 1/кПа), то даже незначительная закачка жидкости в исследуемый объект приводит к раскрытию трещинных каналов, в результате чего происходит изменение скорости фильтрации потока жидкости в системе скважина–пласт и замечаются изменения в работе насосного оборудования.

Существующие способы проведения инжест-теста, используемые в настоящее время, предполагают участие оператора, который должен в течение длительного времени с помощью вентиля поддерживать необходимый расход и давление в системе. Та как ранее решения подобных задач не рассматривались, для автоматизации процесса нагнетания при гидродинамических исследованиях авторами были разработаны схемы с использованием мехатронных узлов, которые позволяют с высокой точностью автоматизировать процесс инжестиро-

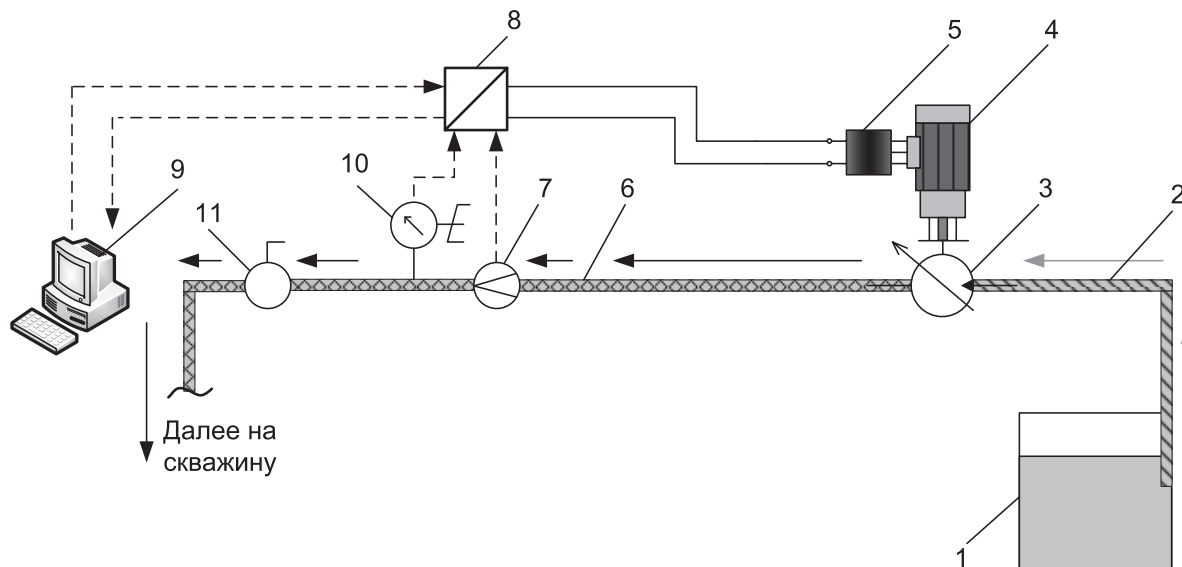


Рис. 2. Схема автоматизации процесса нагнетания при гидродинамических исследованиях скважин методом репрессии с использованием регулируемого насоса высокого давления

вания. Рассмотрим автоматизацию процесса нагнетания подробнее.

Одним из простых решений автоматизации гидродинамических исследований скважин на репрессии является использование регулируемого насоса высокого давления. Схема автоматизации представлена на рис. 2.

Из емкости 1 по трубопроводу низкого давления 2 вода подводится к регулируемому насосу высокого давления 3, приводимого в движение асинхронным двигателем (АД) 4, скорость которого регулируется преобразователем частоты 5. Далее по трубопроводу высокого давления

6 жидкость направляется через расходомер 7 в скважину. Данные с расходомера 7 снимаются, обрабатываются программируемым логическим контроллером 8, в котором формируется задание для преобразователя частоты 5. Для визуального отображения информации в реальном времени и записи данных в определенном формате используется персональный компьютер 9. После достижения в скважине необходимого давления, снимаемого электронным манометром 10, нагнетательный трубопровод закрывается при помощи шарового крана 11. Процесс инжективирования закончен.

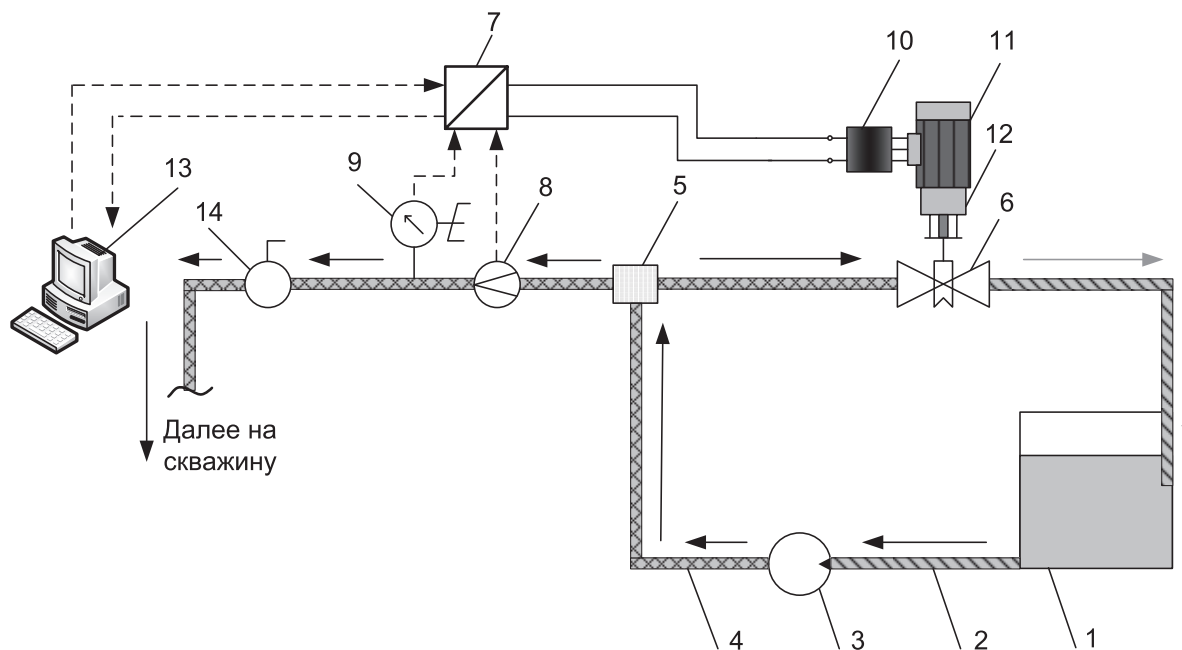


Рис. 3. Схема автоматизации процесса нагнетания при гидродинамических исследованиях скважин (инжект-тест) с использованием проходного регулировочного клапана

Данная схема является простой и логичной, с одной стороны, но она обладает существенным недостатком. Существующие общепромышленные насосы не смогут обеспечить малый расход при высоком давлении. Расход должен фиксироваться расходомером 7 и составлять 50...300 л/ч при давлении более 10 МПа. Проектирование глубоко регулируемого электропривода насоса высокого давления является трудоемкой и неоправданной задачей.

На рис. 3 представлена схема автоматизации гидродинамических исследований скважин методом инжектирования с использованием проходного регулировочного клапана. Схема работает следующим образом.

Из емкости 1 по трубопроводу низкого давления 2 жидкость подводится к нерегулируемому насосу высокого давления 3, далее по трубопроводу высокого давления 4 жидкость подводится к тройнику 5, разделяющему жидкость на два потока – рабочий и сбросной.

Рабочий поток жидкости после тройника направляется через расходомер в скважину. Так как производительность нерегулируемого насоса больше требуемого расхода нагнетания жидкости в скважину, то часть жидкости направляется по обратному трубопроводу через проходной регулировочный клапан 6 в емкость 1. Таким образом, изменяя количество сбрасываемой жидкости, можно поддерживать расход нагнетания жидкости в скважину на определенном уровне.

Контроль расхода нагнетания жидкости, поступающей в скважину, обеспечивает программируемый логический контроллер 7, основываясь на данных, получаемых с расходомера 8 и датчика давления 9. Сигналы снимаются, обрабатываются,

и формируется задание на преобразователь частоты 10, который, в свою очередь, управляет асинхронным двигателем 11. Далее двигатель через понижающий редуктор 12 поворачивает шток регулировочного клапана 6, тем самым изменяя количество проходящей жидкости. Для визуального отображения информации в реальном времени и записи данных используется персональный компьютер 13.

После достижения в скважине необходимого давления, снимаемого электронным манометром 9, нагнетательный трубопровод закрывается при помощи шарового крана 14.

Предложенная схема обладает рядом недостатков, таких как низкий КПД системы, т. к. большая часть жидкости, подаваемая насосом 3, сбрасывается обратно в емкость 1. Расходомер 8 должен быть точным прибором, позволяющим измерять небольшой расход жидкости (50...300 л/ч) при высоком давлении (более 10 МПа). В этом случае приведенная схема позволяет с высокой точностью проводить процесс инжектирования, а электро- и гидрооборудование, необходимое для его реализации, является доступным.

Для исключения дорогостоящего расходомера, который включен в трубопроводе высокого давления, можно видоизменить схему путем переноса расходомера в сбросной трубопровод. Измененная схема представлена на рис. 4. Данная схема позволяет использовать более дешевый расходомер 8, который будет измерять более высокий расход с меньшим давлением, но информацию о реальном расходе жидкости, поступающей в скважину, будем узнавать косвенно. Косвенное измерение расхода несколько снизит точность процесса нагнетания.

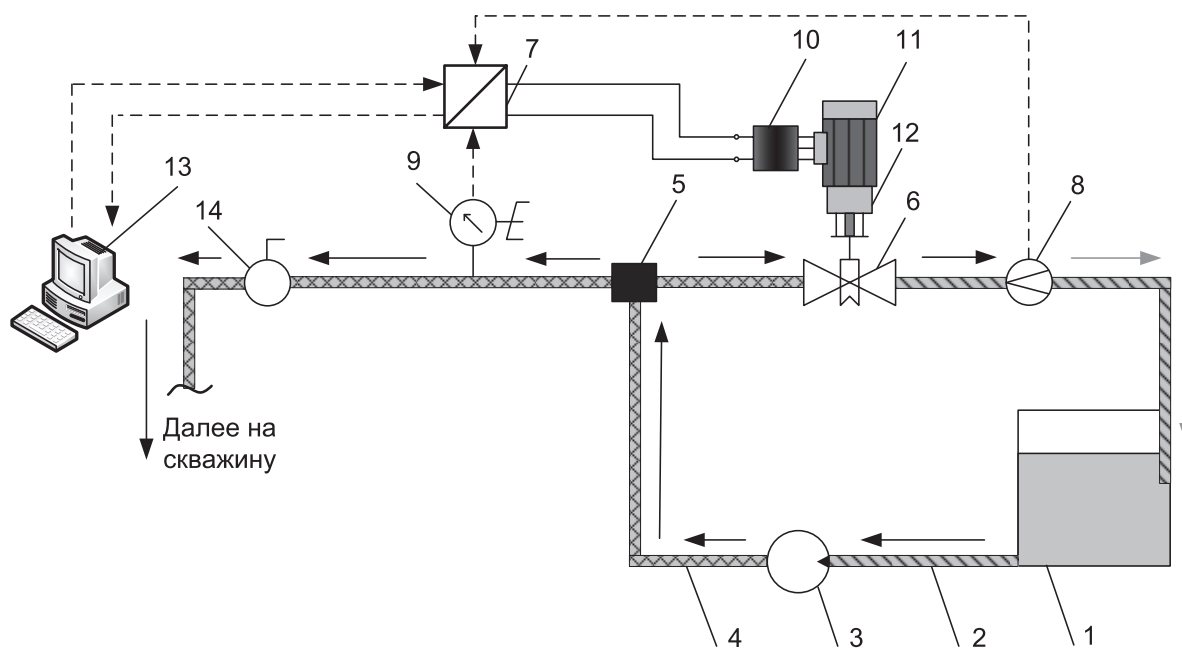


Рис. 4. Схема автоматизации процесса нагнетания при гидродинамических исследованиях скважин (инжект-тест) с использованием проходного регулировочного клапана

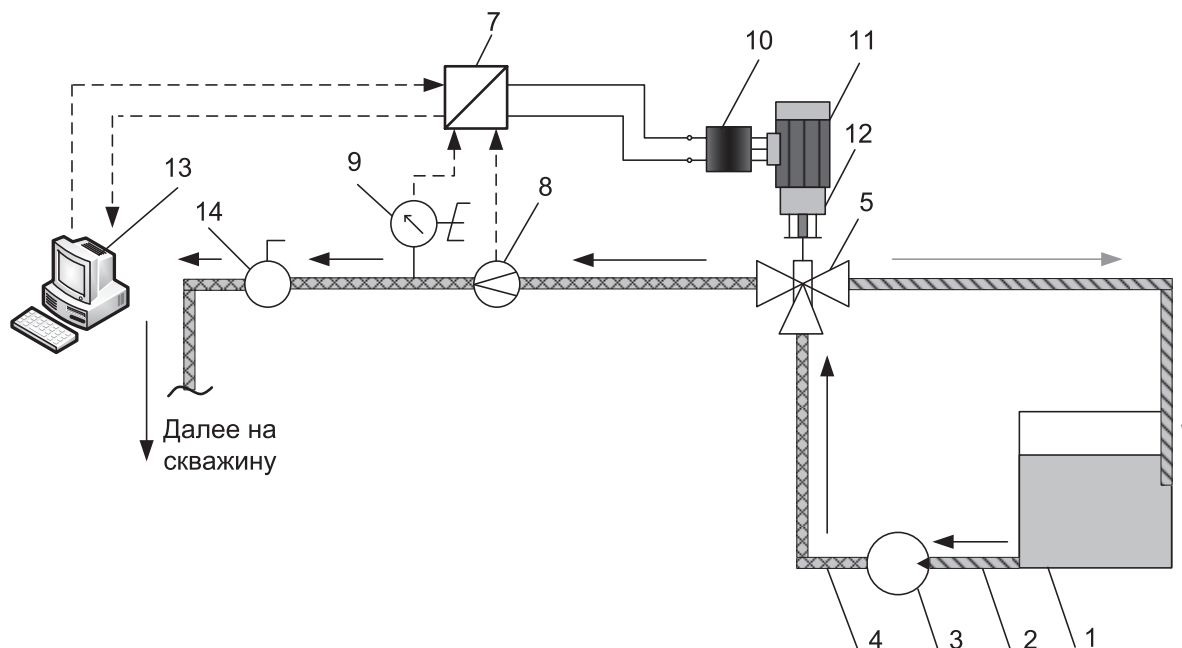


Рис. 5. Схема автоматизации процесса нагнетания при гидродинамических исследованиях скважин (инжект-тест) с использованием регулирующего трехходового клапана

На рис. 5 представлена схема автоматизации гидродинамических исследований скважин нагнетанием с использованием регулирующего трехходового клапана. Тройник 5 и регулировочный клапан 6 (рис. 4) совмещены в одном устройстве – трехходовой клапан 5 (рис. 5), который регулирует разделение потока жидкости на рабочий и сбросной. Данный механический узел облегчает схему автоматизации процесса инжектирования в целом, но является дорогостоящим и уступает схемам, приведенным на рис. 3 и 4.

Выводы

В низкопроницаемых трещинно-поровых коллекторах метаноугольных месторождений для определения проницаемости хорошо зарекомендовал себя инжект-тест, позволяющий наиболее достоверно определять фильтрационные параметры пластов со значительной экономией времени проведения опыта и затрат на исследования.

По опыту интерпретации данных гидродинамических исследований, наиболее успешными признаются те испытания, при которых в период закачки расход жидкости поддерживается постоянным на протяжении всего теста.

Анализ разработанных схем автоматизации гидродинамических исследований скважин методом инжектирования показал в первом приближении, что наиболее простым, но в тоже время эффективным, является использование проходного регулирующего клапана, что позволит с достаточной точностью управлять величиной расхода при проведении испытаний. Для этого необходимо разработать регулируемый электропривод, который позволит бы с высокой точностью изменять и поддерживать количество проходящей жидкости в скважину в ходе испытаний. Применение программируемого логического контроллера позволит вести сбор и обработку информации с датчиков и сформировать соответствующее задание для регулирования положения клапана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов С.В., Кругман Р.Н. Природная проницаемость угольных пластов и методы ее определения. – М.: Недра, 1978. – 122 с.
2. Saulsberry J.L., Schafer P.S., Schraufnagel R.A. A Guide to Coalbed Methane Reservoir Engineering // Gas Research Institute Report GRI-94/0397. – Chicago, Illinois, 1996. – P. 342–345.
3. Останин В.А., Пешков В.Е., Крохалев И.В. Обоснование рационального комплекса гидродинамических исследований водоносных горизонтов // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321. – № 1. – С. 129–132.
4. Hopkins C.W., Frantz J.H., Flumerfelt R.W., Spivey J.P. Pitfalls of Injection/Falloff Testing in Coalbed Methane Reservoirs // Permian Basin Oil and Gas Recovery Conference. – Midland, Texas, 23–26 March, 1998. – P. 16–20.
5. Taco G., Kamenar A., Edgoose J. Comparison of Permeabilities and Skin Damages Results from Flow Build-up and Injection Falloff Tests in CBM Reservoirs // Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition. – Brisbane, Queensland, Australia, 18–20 October, 2010. – P. 6–10.

Поступила 25.01.2013 г.