

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ**

УДК 532.546.3

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЬЕЗОПРОВОДНОСТИ ПОРИСТОГО ОБРАЗЦА
МЕТОДОМ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ВОЛН ДАВЛЕНИЯ В
ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ**

©2026 г. А. О. Храмов*, М. Н. Овчинников, А. Г. Гаврилов

Казанский федеральный университет

Россия, 420008, Казань, ул. Кремлевская, 18

**e-mail: hao73@yandex.ru*

Поступила в редакцию 29.09.2025 г.

После доработки 16.11.2025 г.

Принята к публикации 17.12.2025 г.

Статья посвящена определению фильтрационных параметров нефтяного пласта методом фильтрационных волн давления. Рассмотрено применение метода в лабораторных условиях в случае прямолинейно-параллельной фильтрации. Описана лабораторная установка для исследования образцов пористых сред с автоматизированной системой управления лабораторным экспериментом. Установка позволяет исследовать образцы размерами до $145 \times 10 \times 6$ см³, задавая расход жидкости, изменяющийся по гармоническому закону с периодами воздействия от единиц секунд и измеряя давления в различных точках образца. По полученным временным рядам расхода жидкости и давления может быть вычислена пьезопроводность образца с погрешностью 3%. Представлены результаты экспериментального исследования песка с помощью установки и расчета пьезопроводности.

1. ВВЕДЕНИЕ

Проектирование разработки нефтяных месторождений предполагает знание фильтрационных параметров пласта (ФПП), в частности пьезопроводности. Действительно, знание этих параметров позволяет определить оптимальное расположение скважин и режимы их работы, тем самым повышая эффективность нефтеизвлечения. Для определения этих параметров обычно проводятся гидродинамические исследования – полевые и лабораторные. В первом случае проводится натурный эксперимент на реальном пласте, во втором осуществляются исследования керна, либо модели пласта [1]. Лабораторный эксперимент может быть полезен как для измерения фильтрационных параметров, так и для исследования процесса фильтрации (течения флюидов через пористые среды), верификации фильтрационных моделей.

Гидродинамические методы исследования скважин (ГДИ) как методы определения ФПП подразделяются на стационарные и нестационарные. При этом в скважинных условиях обычно используются нестационарные методы, а в лабораторных условиях – стационарные. Среди нестационарных методов основными являются метод кривой восстановления давления (КВД) и его модификации и метод фильтрационных волн давления (ФВД) [2]. Метод ФВД заключается в задании на одной из скважин (возмущающей) периодических изменений расхода жидкости и давления и одновременном измерении давления на реагирующих скважинах. По полученным зависимостям расхода жидкости и давлений в скважинах от времени могут быть вычислены параметры пласта. Этот метод обладает рядом преимуществ, среди них помехоустойчивость [3, 4], возможность исследования неоднородности параметров пласта [1, 5] и верификации моделей фильтрации [6]. Вместе с тем он более трудоемкий, и успешная его реализация предполагает автоматизацию эксперимента.

В настоящей работе рассматривается вопрос определения пьезопроводности. Она представляет собой комплексный параметр, характеризующий динамическое перераспределение давления в пласте или лабораторном образце и включающий в себя проницаемость пористой среды k , динамическую вязкость жидкости μ пористость горной породы m и упругие характеристики – сжимаемости горной породы β_c и жидкости $\beta_{ж}$ [7],

$$\chi = \frac{k}{\mu(m\beta_{ж} + \beta_c)}. \quad (1)$$

Пьезопроводность может быть определена только в условиях нестационарной фильтрации. В настоящей работе фильтрация рассматривается в рамках модели упругого режима с использованием уравнения пьезопроводности [8]

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \chi \Delta p, \quad (2)$$

основанного на законе Дарси

$$\mathbf{w} = -\frac{k}{\mu} \text{grad } p, \quad (3)$$

где \mathbf{w} – скорость фильтрации.

Отметим, что определению пьезопроводности в лабораторных условиях посвящено весьма небольшое число работ [9–11], основанных, как правило, на создании переходного гидродинамического режима в образце [12].

В настоящей работе рассмотрено определение пьезопроводности в лабораторных условиях на оригинальной установке, позволяющей создавать волны давления в протяженной модели пласта и регистрировать несколькими манометрами значения давления в различных его точках.

Отметим, что подобные исследования могут быть актуальны не только для нефтегазовой промышленности, но и при разработке технологий, использующих фильтрацию флюидов в химической промышленности.

1. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная установка предназначена для исследования прямолинейно-параллельной фильтрации жидкостей. Модель пласта представляет собой герметичный контейнер, в который помещается образец пористой среды (рис. 1), она является модификацией установки, использованной в работе [6]. Максимальные размеры образца таковы: длина – 1.45 м, ширина – 0.1 м, высота – 0.06 м.

Рис. 1. Лабораторная установка для определения

Герметичность достигается за счет ровной поверхности бортиков из эпоксидной смолы и вакуумной резины (использована резина марки 5 мм 7889 ТУ 38105116-81). Резина прокладывается между бортиками и крышкой из оргстекла, сверху крышка накрывается металлической рамкой, прижимаемой струбцинами.

В контейнере для прокачки рабочей фильтрующейся жидкости существуют входное и выходное отверстия, связанные через расширительную емкость и перистальтический нагнетающий насос в единую систему. Схема движения флюида в экспериментальной установке изображена на рис. 2.

Рис. 2. Схема движения флюида в экспериментальной установке

При подаче жидкости в экспериментальную ячейку насос берет ее из расширительной емкости, которая изначально наполняется жидкостью. Пройдя через пористый образец, жидкость сливается обратно в эту же емкость. Таким образом, жидкость циркулирует в экспериментальной установке.

На входе и выходе контейнера установлены мелкоячеистые ограничительные сетки на медной основе, ограничивающие движение пористой среды (в данном эксперименте – песка).

К контейнеру с помощью входной соединительной трубки подключен перистальтический насос марки Watson Marlow 620Du с функцией управления напряжением. Насос позволяет задавать объемный расход жидкости от $1.7 \cdot 10^{-6}$ до $3 \cdot 10^{-4}$ м³/с с точностью дозирования 0.5%.

Частота оборотов двигателя насоса управляется напряжением, подаваемым на его вход с модуля аналогового вывода AIM731. Данный модуль может формировать напряжение на выходе в диапазоне от –10 до +10 В с основной приведенной погрешностью 0.04%.

По длине контейнера на различных расстояниях от входной трубки располагаются 12 трубок для манометров. Расстояния между трубками для манометров составляет 0.12 м,

расстояние от левой границы образца до первой трубки равно 0.09 м. Трубки с внутренней стороны, контактирующей с образцом, защищены мелкоячеистыми ограничительными сетками на медной основе для обеспечения защиты манометров от проникновения мусора (частиц сыпучей пористой среды). Трубки расположены в нижней части контейнера – приварены к его дну, т. е. манометры устанавливаются вверх рабочей полостью, благодаря чему отсутствует необходимость предварительно заполнять манометры фильтрующейся жидкостью, пузырек воздуха удаляется сам собой – уходит вверх. Для перехода к иной фильтрующейся жидкости достаточно выкрутить манометр из трубки, протереть его полость скрученной тканью или ватой и вкрутить обратно.

В настоящей работе были использованы восемь манометров марки Honeywell MLN050PAB01A, позволяющие измерять давление до 340 кПа с погрешностью 0.25%. У данных манометров предусмотрена металлическая изоляция внутренних чувствительных элементов от агрессивных сред. Манометры расположены на расстояниях от левой границы образца, равном соответственно 0.09, 0.33, 0.57, 0.81, 1.05, 1.17, 1.29, 1.41 м,.

Сигналы с манометров подаются на каналы модулей аналогового ввода AIM728. Модули AIM728 могут измерять напряжение, подаваемое на их входы, в диапазоне от –20 до +20 В с основной приведенной погрешностью 0.01%.

Для управления и анализа результатов лабораторных гидродинамических исследований была разработана автоматизированная система управления лабораторным экспериментом, позволяющая исследовать процессы прямолинейно-параллельной фильтрации. Основное назначение системы – исследование параметров модельного пласта в лабораторных условиях методом ФВД.

Основным узлом шкафа контроллера является контроллер СРМ902 фирмы Fastwel. Контроллер представляет собой компактное вычислительное устройство с интерфейсом скоростной шины, посредством которой происходит обмен данными с модулями ввода-вывода. Модули ввода-вывода являются подчиненными устройствами контроллера. Модули ввода осуществляют преобразование входных электрических сигналов в цифровой код, передаваемый контроллеру. Модули вывода генерируют выходные электрические сигналы, соответствующие цифровому коду, полученному от контроллера.

Структурная схема комплекса технических средств представлена на рис. 3.

Рис. 3. Структурная схема комплекса технических средств и обмена данными

Программа для контроллера СРМ902 [13] позволяет задавать изменения объемного расхода жидкости, подаваемой насосом в образец, вида сдвинутого гармонического сигнала (без откачки жидкости),

$$Q = \frac{M}{2} (1 - \cos(2\pi ft + \varphi_0)) = M \sin^2\left(\frac{2\pi ft + \varphi_0}{2}\right), \quad (4)$$

где M – размах изменений расхода жидкости (он равен удвоенной амплитуде для изменений гармонического вида и вводится из соображений удобства, в рассматриваемой установке он является разницей между максимальным и минимальным значениями объемного расхода жидкости), f – частота гармонических колебаний расхода жидкости, φ_0 – начальная фаза гармонических колебаний расхода жидкости.

Также программа позволяет регистрировать показания восьми манометров в реальном времени.

Программа по протоколу Modbus TCP получает с автоматизированного рабочего места (АРМ) следующие данные:

- размах колебаний объемного расхода жидкости в единицах $\text{м}^3/\text{с}$;
- частоту колебаний в единицах Гц;
- начальную фазу колебаний в радианах;
- состояние работы насоса (TRUE – включен, FALSE – отключен).

В соответствии с этими данными и калибровочными коэффициентами насоса программа генерирует гармонический сигнал, который с модуля АИМ731 подается на вход насоса в единицах напряжения В.

На АРМ программа передает генерируемый сигнал в единицах (л/мин) объемного расхода жидкости в реальном времени.

С модулей АИМ728 программа получает сигналы манометров, преобразует их в единицы давления Па и передает на АРМ оператора по протоколу Modbus TCP.

Программа позволяет проводить лабораторные гидродинамические исследования методом ФВД с заданными параметрами гармонического сигнала. Также есть возможность получения стационарного течения. Для этого достаточно задать нулевую частоту и начальную фазу π . В этом случае требуемый постоянный расход жидкости будет равен заданному размаху. Для исследования методом КВД после установления течения необходимо отключить насос путем изменения состояния работы насоса с TRUE на FALSE.

2. РАСЧЕТ ПЬЕЗОПРОВОДНОСТИ

Рассмотрим случай задания волн давления с левой границы пласта по расходу жидкости и поддержания постоянного давления с правой.

Начальное условие

$$P(x, 0) = P_0. \quad (5)$$

Граничное условие слева по расходу жидкости в виде периодической функции

$$-\sigma \frac{k}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \Big|_{x=0} = q_0 - q_1 \cos(\omega t), \quad (6)$$

где $q_0 - q_1 \cos(\omega t)$ – хорошая аппроксимация функции расхода жидкости при задании квазигармонических колебаний (см. рис. 3), σ – площадь сечения, $\beta = (m\beta_{\text{ж}} + \beta_{\text{с}})$ – упругоёмкость, ω – циклическая частота, χ – пьезопроводность, k – проницаемость, μ – вязкость в законе Дарси.

Граничное условие справа

$$P(L, t) = P_A, \quad (7)$$

где L – длина образца.

Обозначим

$$\lambda_n = \frac{\pi(2n+1)}{2L}. \quad (8)$$

Решение для давления будет выглядеть следующим образом (использована работа [14]):

$$\begin{aligned} P(x, t) = & (P_0 - P_A) \frac{2}{L} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\cos(\lambda_n x)}{\lambda_n} \cos(\pi n) \exp(-\lambda_n^2 \chi t) + P_A \frac{2}{L} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\cos(\lambda_n x)}{\lambda_n} \cos(\pi n) + \\ & + q_0 \frac{2}{L\sigma\beta} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\cos(\lambda_n x)}{\lambda_n^2 \chi} [1 - \exp(-\lambda_n^2 \chi t)] - q_1 \frac{2}{L\sigma\beta} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\cos(\lambda_n x)}{\omega^2 + (\lambda_n^2 \chi)^2} \{ \lambda_n^2 \chi \cos(\omega t) + \\ & + \omega \sin(\omega t) - \lambda_n^2 \chi \exp(-\lambda_n^2 \chi t) \}. \end{aligned} \quad (9)$$

Введем параметры

$$\gamma_1 = \frac{2}{L} \frac{q_1}{\sigma\beta} \chi \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\cos(\lambda_n x)}{\omega^2 + (\lambda_n^2 \chi)^2} \lambda_n^2 \chi, \quad (10)$$

$$\gamma_2 = \frac{2}{L} \frac{q_1}{\sigma\beta} \chi \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\cos(\lambda_n x)}{\omega^2 + (\lambda_n^2 \chi)^2} \omega. \quad (11)$$

Тогда для периодической составляющей давления в произвольной точке решение можно записать в виде

$$\begin{aligned} A \cos(\omega t - \varphi) = & \sqrt{\gamma_1^2 + \gamma_2^2} \cos[\omega t - \varphi], \\ \varphi = & \arctg\left(\frac{\gamma_2}{\gamma_1}\right). \end{aligned} \quad (12)$$

В реальном эксперименте, считая систему линейной, проводим фурье-разложение экспериментально полученных сигналов и рассматриваем их фазы для первой гармоники. Зная из эксперимента фазы φ , можно определить пьезопроводность по измерениям на каждом датчике со своей разностью фаз или по разности фаз для одной и той же волны для разных манометров.

Фурье-анализ позволяет выделить полезный гармонический сигнал с заданным периодом во временном ряде измеренных давлений, что обуславливает помехоустойчивость метода [4].

3. РЕЗУЛЬТАТ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Пример реализации эксперимента показан на рис. 4. В качестве экспериментального образца здесь выступает песок с размерами гранул менее 1 мм. Фильтрующая жидкость – вода.

Рис. 4. Пример реализации метода волн давления

Все элементы установки и используемый флюид до начала и в ходе проведения экспериментов находились при одной и той же комнатной температуре, чтобы исключить фактор изменения пьезопроводности, связанный с перераспределением температуры между флюидом и модельным пористым пластом в процессе эксперимента.

В ходе заполнения контейнера песок максимально уплотняется, его пористость в таком случае составляет 0.35. Утрамбовка песка в установке осуществляется путем прогонки фильтрующей жидкости через него (расход воды при этом задается максимально возможным), за счет чего он смещается в сторону выходной трубки. Со стороны входа образуется полость, после чего контейнер открывается, и эта полость заполняется песком. Далее контейнер снова закрывается, и процедура повторяется до тех пор, пока песок не перестанет смещаться при прохождении через него жидкости (на практике 2–4 раза).

Так, при заполнении контейнера песком обеспечивается и удаление пустот между материалом и верхней крышкой, поскольку он насыпается до верхнего края вакуумной резины, уже лежащей на бортиках контейнера. При закрытии и прижатии крышки (струбцинами) он также оказывается дополнительно прижатым к крышке (оргстеклу). А далее под воздействием потока жидкости песок уплотняется, уходя в правую часть контейнера и все больше прижимаясь к стенкам, в том числе к верхней крышке. Также в процессе утрамбовки песка происходит и равномерное начальное заполнение контейнера жидкостью.

На рис. 4 демонстрируются зависимости давлений от времени для манометра №3 ($x = 0.57$ м) при периодах $T = 30$ с и $T = 60$ с, а также зависимости расходов жидкости от времени на входе в систему ($x = 0$). Все эти зависимости носят квазигармонический характер и соответствуют общим представлениям о росте амплитуды волн давления с ростом периода возмущений; видны задержка сигнала по давлению на начальном этапе задания возмущений и устойчивость разности фаз между расходом жидкости и давлением.

Фурье-анализ показал, что разности фаз между расходом и давлением φ (из уравнения (12)) для первых гармоник отдельных периодов находятся в диапазоне 1.001–1.093, что соответствует расчетным значениям пьезопроводности $\chi = 0.109 \pm 0.003$ м²/с (при достоверности 95%).

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренная в настоящей работе лабораторная экспериментальная установка позволяет исследовать процесс нестационарной фильтрации жидкости путем задания переменного расхода жидкости и измерения отклика по давлению на это действие в различных точках модельного пористого пласта. В частности, речь идет о возможности реализации метода фильтрационных (гармонических) волн давления, который обладает рядом преимуществ по сравнению с другими методами исследования пористых сред. Наличие нескольких разнесенных в пространстве манометров позволяет изучать также неоднородные среды и исследовать особенности фильтрации в таких средах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Овчинников М.Н.* Интерпретация результатов исследований пластов методом фильтрационных волн давления. Казань: ЗАО “Новое знание”, 2003.
2. *Бузинов С.Н., Умрихин И.Д.* Исследование пластов и скважин при упругом режиме фильтрации. Москва: Недра, 1964.
3. *Морозов П.Е.* // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2011. № 4(3). С. 996. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21121291>
4. *Zhou Y.Q., Lim D., Cipola F., Cardiff M.* // Water Resources Research. 2016. V. 52. P. 2141.
5. *Cardiff M., Bakhos T., Kitanidis P. K., Barrash W.* // Water Resources Research. 2013. V. 49. P. 5395.
6. *Трусов А.В., Овчинников М.Н., Марфин Е.А.* // Георесурсы. 2012. № 4(46). С. 44.
7. *Николаевский В.Н.* Механика пористых и трещиноватых сред. Москва: Недра, 1984.
8. *Щелкачев В.Н.* Основы и приложения теории неустановившейся фильтрации. Москва: Нефть и газ, 1995.
9. *Барышников Н.А., Елисеев С. В., Зенченко Е. В., Лагутин Ю.В., Турунтаев С.Б.* // Динамические процессы в геосферах. 2016. № 8. С. 35. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28114564>
10. *Дрягин В.В., Жаков С. В.* РФ Патент 2796995С1, 2022.
11. *Курленя М. В., Сердюков С. В., Ткач Х. Б.* РФ Патент 23646U1, 2002.
12. *Шмонов В.М., Мальковский В.И., Жариков А.В.* // ПТЭ. 2011. № 5. С. 129. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16862751>
13. *Храмов А.О., Овчинников М.Н., Гаврилов А.Г., Деркач А.И., Маценко В.А.* РФ Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2024614087, 2024.
14. *Полянин, А.Д.* Справочник по линейным уравнениям математической физики. Москва: Физматлит, 2001.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Лабораторная установка для определения фильтрационных параметров пласта методом фильтрационных волн давления: 1 – контейнер с помещенным в него образцом (песком), 2 – перистальтический насос, 3 – контроллер с модулями ввода/вывода.

Рис. 2. Схема движения флюида в экспериментальной установке.

Рис. 3. Структурная схема комплекса технических средств и обмена данными.

Рис. 4. Пример реализации метода волн давления: кривые 1, 3 – зависимости задаваемого расхода жидкости от времени соответственно при $T = 30$ с и $T = 60$ с; кривые 2, 4 – зависимости давления на манометре №3 от времени соответственно при $T = 30$ с и $T = 60$ с.

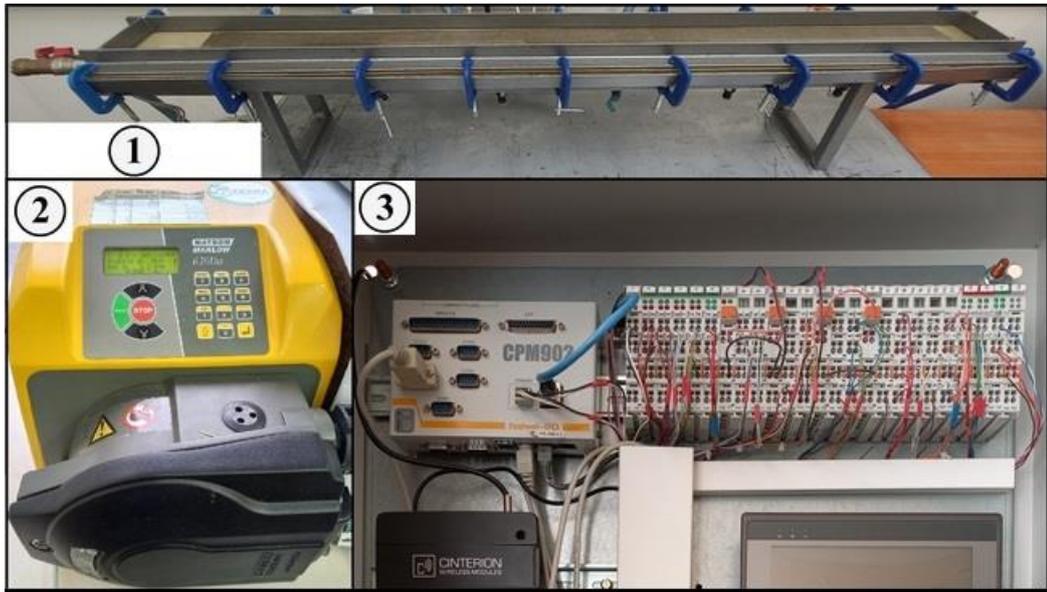


Рис. 1

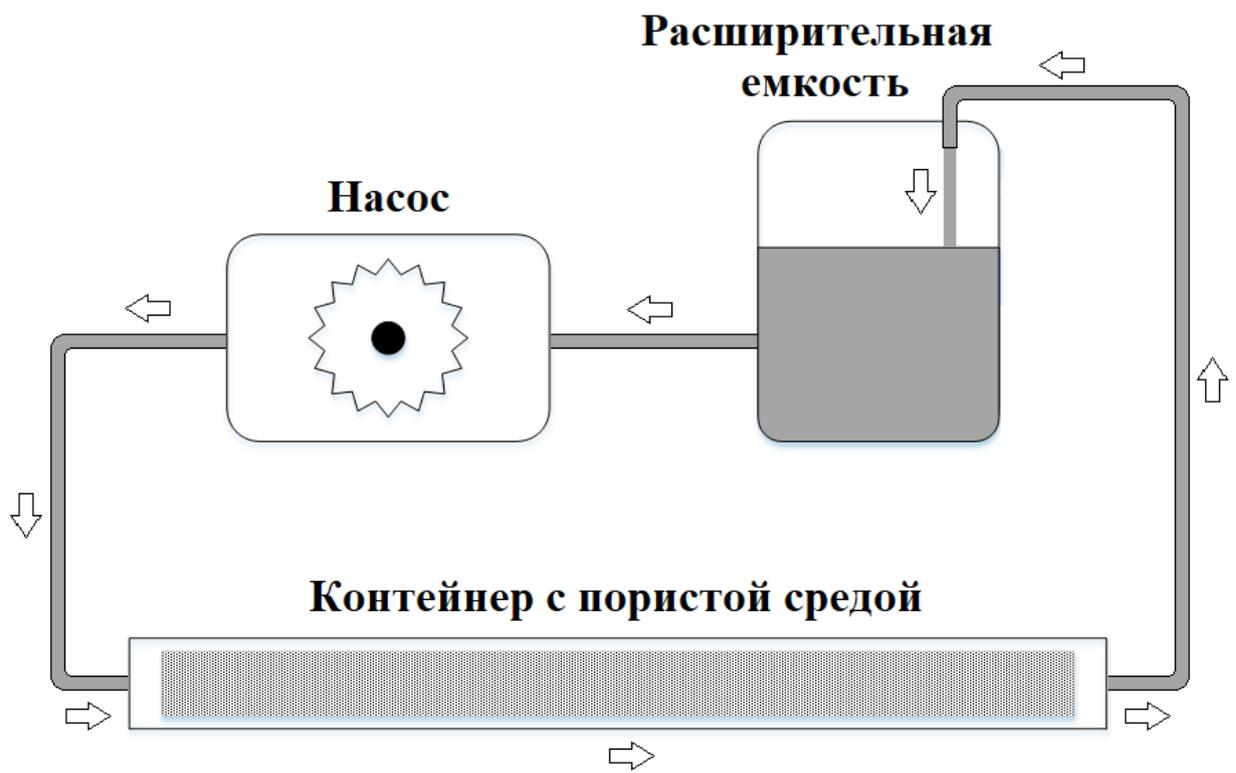


Рис. 2

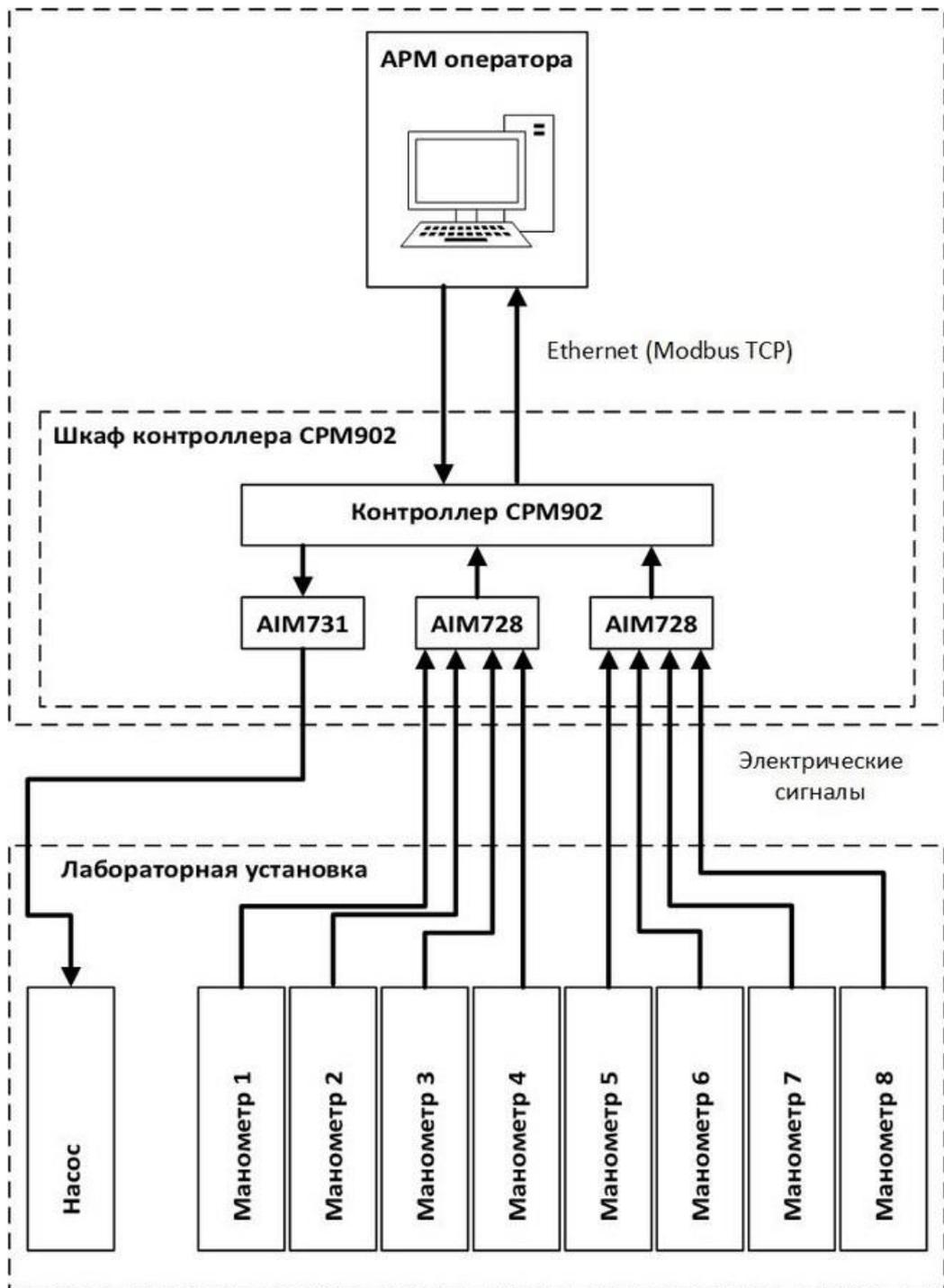


Рис. 3

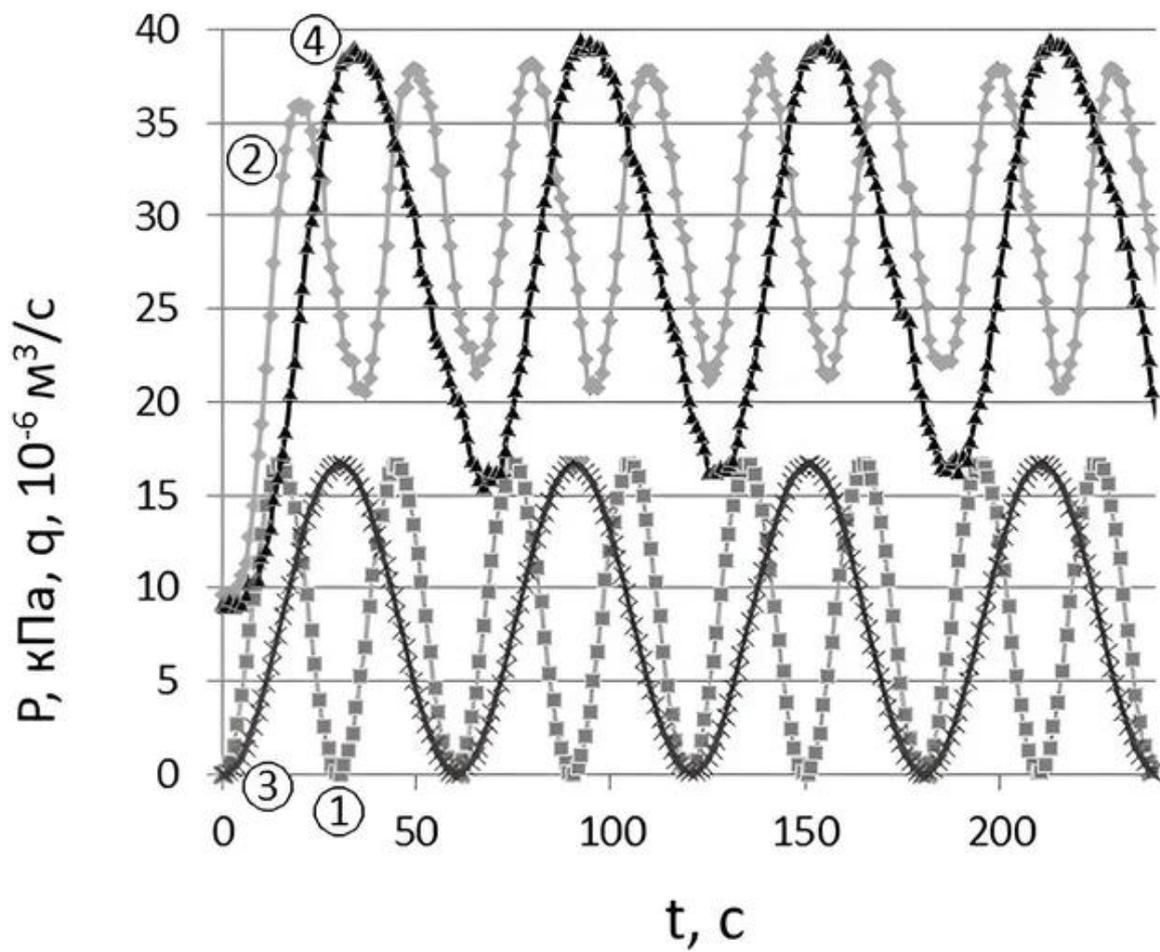


Рис. 4.