

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования**

**КАЗАНСКИЙ (ПРИВОЛЖСКИЙ) ФЕДЕРАЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

**ИНСТИТУТ ГЕОЛОГИИ И НЕФТЕГАЗОВЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ**

*Кафедра геологии нефти и газа имени академика А.А.
Трофимука*

*Кафедра разработки и эксплуатации месторождений
трудноизвлекаемых углеводородов*

**Э.И. ФАХРУТДИНОВ, В.А. МИЛЮТИНА, М.Д. ЛЕУХИНА,
Х.С.М. АБДЕЛЬРЕХИМ АБДАЛЛА**

**МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОТКРЫТОЙ ПОРИСТОСТИ
В ПОРОДАХ-КОЛЛЕКТОРАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ПОРОЗИМЕТРА СМП-ПГ**

Учебно-методическое пособие

Казань - 2025

УДК 550.8.02

ББК 26.343.1

Печатается по решению учебно-методической комиссии

Института геологии и нефтегазовых технологий

Протокол №... от 2025 г.

*Заседания кафедры разработки и эксплуатации
месторождений трудноизвлекаемых углеводородов*

Протокол №12 от 03.04.2025 г.

Научный редактор

Доцент, канд.геол.-минер.наук., Петрова Д.И.

Рецензент

Доцент, к.т.н., Д.Р. Хаярова

Доцент, к.т.н., А.Р. Гимаева

Учебно-методическое пособие по выполнению практических работ для бакалавров направления 05.03.01 «Геология» и 21.03.01 «Нефтегазовое дело» по курсу «Физика нефтяного пласта» / Фахрутдинов Э.И., Милютин В.А., Леухина М.Д., Абдельрехим Абдалла Х.С.М. – Казань: Казанский университет, 2025. – 14 с.

Учебно-методическое пособие составлено для бакалавров направления «Геология» и «Нефтегазовое дело». Практическая работа позволяет освоить одну из основных методик обработки геолого-промыслового материала (оценка емкостных свойств пород-коллекторов) и служит основой для выполнения курсовых и выпускных квалификационных работ. А также может быть использована для других направлений по тематике «Геология нефти и газа», «Петрофизика».

Содержание

Введение.....	4
1. Определение пористости горных пород.....	6
2. Физические основы метода.....	6
3. Аппаратура, оборудование и материалы.....	9
4.Методика выполнения практической работы.....	10
5.Порядок проведения расчётов и оформления результатов....	13
Вопросы для самоконтроля.....	13
Тестирование знаний.....	15
Список литературы.....	17

Настоящее учебно-методическое пособие посвящено методике определения открытой пористости в породах-коллекторах в рамках курса «Физика нефтяного пласта» (бакалавриат, направление «Нефтегазовое дело» и «Геология», профиль подготовки «Геология и освоение месторождений нефти и газа»). Студент должен освоить компетенцию планирования и выработки стратегии проведения поисково-разведочных работ на нефть и газ, в том числе с использованием цифровых технологий.

Данное учебно-методическое пособие посвящено рассмотрению методов определения открытой пористости горных пород. В нем будут представлены теоретические основы различных методов, детальное описание методик проведения экспериментов, особенности обработки и интерпретации результатов, а также примеры практического применения полученных данных.

Пористость является одной из важнейших физических характеристик горных пород, определяющей их способность вмещать и пропускать флюиды (жидкости и газы). Знание пористости необходимо для решения широкого круга геологических задач, таких как:

- Оценка запасов полезных ископаемых (нефти, газа, воды и др.).
- Прогнозирование фильтрационных свойств горных пород при разработке месторождений.
- Изучение процессов переноса и аккумуляции рудных элементов.
- Оценка устойчивости горных массивов при строительстве и эксплуатации инженерных сооружений.
- Геологическое моделирование и интерпретация геофизических данных.

Среди различных типов пористости (общая, эффективная, динамическая и др.) особое значение имеет открытая пористость, характеризующая объем пор, доступных для проникновения

флюидов извне. Именно открытая пористость определяет фильтрационные свойства горных пород и их способность к насыщению различными жидкостями и газами.

Целью данного пособия является предоставление студентам необходимого инструментария для проведения качественных и достоверных измерений открытой пористости горных пород, а также для анализа и интерпретации полученных результатов в контексте решения геологических задач.

1.Определение пористости горных пород

Цель работы: Определение открытой пористости горных пород методом насыщения образца газом с использованием порозиметра СМП-ПГ для оценки фильтрационно-ёмкостных свойств коллекторов.

Использование порозиметра СМП-ПГ позволяет получить точные и надежные данные о пористости за счет насыщения образца газом под контролируемым давлением.

Задачи:

1. Освоить методику работы с порозиметром СМП-ПГ, включая калибровку прибора.
2. Провести измерение объёма пор и расчёт общей пористости.
3. Проанализировать полученные данные, оценить погрешности и сравнить результаты с нормативными значениями.

2.Физические основы метода

Пористость (n) — это отношение объёма пор ($V_{пор}$) к общему объёму образца горной породы ($V_{общ}$):

$$n = \frac{V_{пор}}{V_{общ}} * 100\% \quad (1)$$

- **Общая (абсолютная, физическая или полная) пористость**, которая определяется разностью между объемом образца и объемом составляющих его зерен, т.е. включающую связанные и несвязанные между собой поры. Определение коэффициента общей пористости сопряжено с обязательным дроблением образца породы до составляющих его зерен.
- **Открытая пористость** или пористость насыщения, включающая все сообщающиеся между собой поры, в которые проникает данная жидкость (газ) при данном давлении (вакууме).
- **Закрытая пористость** — это отношение объема всех замкнутых пор породы к его объему, включая объем всех пор; обозначают ее через m_3 и выражают в %. Также возможно определить ее значение, как разница между общей и открытой пористостью.

- **Эффективная пористость** — это объем поровой системы способной вместить нефть и газ за вычетом остаточной водонасыщенности.
- **Динамическая пористость**, включает только ту часть поровых каналов, которая занята подвижной жидкостью. Не учитывается при этом объем субкапиллярных пор (диаметром менее 0,0002 мм), в которых движение жидкости не происходит, объем пор, занятых неподвижной пленкой, обволакивающей зерна породы, и объем застойной жидкости в местах контакта зерен, где жидкость удерживается молекулярно-поверхностными силами.

Практически любая порода состоит из минерального и порового объема. Поровый объем оценивается пористостью — относительным объемом пустот (пор), заключенных в единице объема породы между минеральными частицами или их агрегатами. Различают пористость общую и открытую (эффективную).

Пористость общая (n) — относительный объем всех пор, имеющих в единице объема породы

$$n = \frac{V_n}{V_0 + V_n} * 100\% \quad (2)$$

где V — объем пор, м³;

V_0 — объем минерального скелета, м³.

Общая пористость выражается в процентах или долях единицы.

В зависимости от происхождения различают следующие виды пор:

- 1) поры между зёрнами обломочного материала (межкристаллические) — это первичные поры, образовавшиеся одновременно с формированием породы;
- 2) поры растворения - образовались в результате циркуляции подземных вод;

3) пустоты и трещины, образованные за счёт процессов растворения минеральной составляющей породы активными флюидами и образование карста;

4) поры и трещины, возникшие под влиянием химических процессов, например, превращение известняка (CaCO_3) в доломит (MgCO_3) - при доломитизации идёт сокращение объёмов породы на 12 %;

5) пустоты и трещины, образованные за счёт выветривания, эрозионных процессов, закарстовывания.

Объём пор зависит от:

- формы зёрен;
- сортировки зёрен (чем лучше отсортирован материал, тем выше пористость);
- размера зёрен;
- укладки зёрен – при кубической укладке пористость составляет 47,6%, при ромбической укладке – 25,96%;
- однородности и окатанности зёрен;
- вида цементирования.

Не все виды пор заполняются флюидами: газами, нефтью. Часть пор бывает изолирована, в основном, это внутренние поры.

3.Аппаратура, оборудование и материалы

Порозиметр гелиевый СМП-ПГ (рис.1) предназначен для измерений объёма и открытой пористости газовольюметрическим методом.



Рис. 1. Порозиметр гелиевый СМП-ПГ

Принцип действия порозиметра основан на вытеснении инертного газа анализируемым образцом из измерительной камеры. По изменению показаний датчика давления при открытии камеры сравнения оценивается объем вытесненного газа, равный объему твердой фазы анализируемого пористого образца, введенного в измерительную камеру. На основе данных об измерении объема твердой фазы образца и его геометрических параметров производится расчет открытой пористости образца.

Порозиметр состоит из следующих блоков: измерительные камеры, камеры сравнения известного объема, блок измерения температуры и давления газа, блок манифольда, система пневматических клапанов, контроллер управления, а также периферийные блоки, отвечающие за функционирование основных.

4.Методика выполнения практической работы

1. На рабочем ПК откройте программу «SMP_PH».
2. Ознакомьтесь с интерфейсом программы (рис. 2).

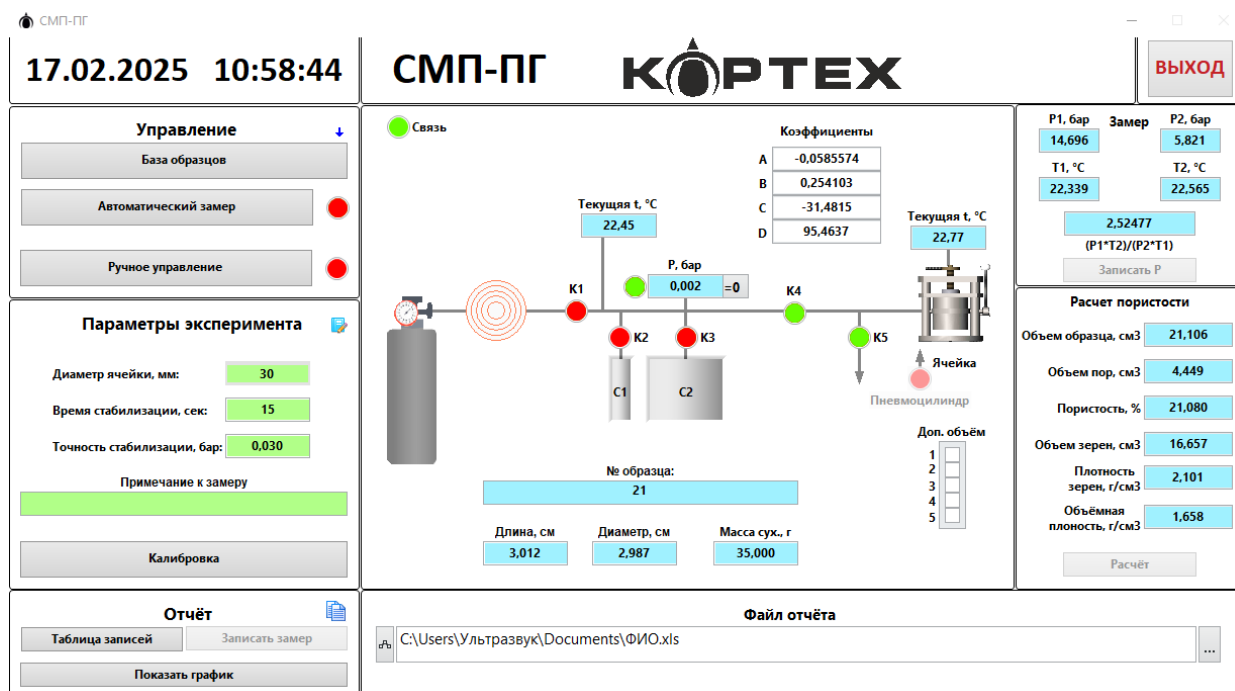


Рис. 2. Интерфейс программы СМП-ПГ Кортех

3. Загрузите подготовленную калибровочную кривую. Для этого нажмите кнопку «Калибровка» – «Этот компьютер-Документы» – выберите файл 30 mm.cal – нажмите кнопку «Прописать» (рис. 3).

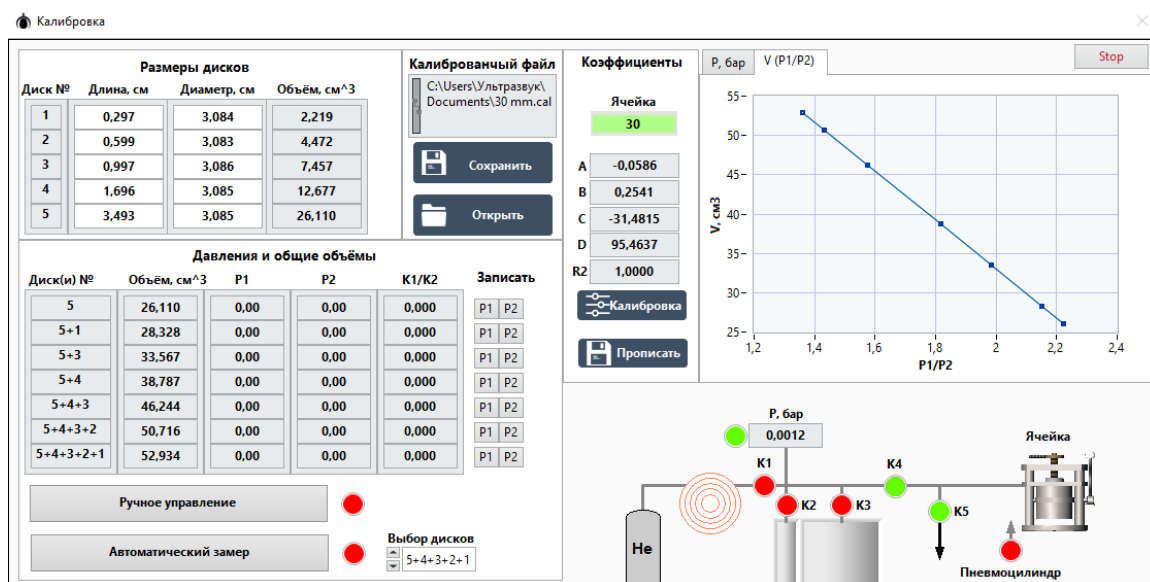


Рис. 3. Настройки калибровки Порозиметра

Калибровка порозиметра была выполнена ранее при помощи калибровочных дисков, в результате, при открытии калибровки должны быть выставлены калибровочные коэффициенты (рис. 4):

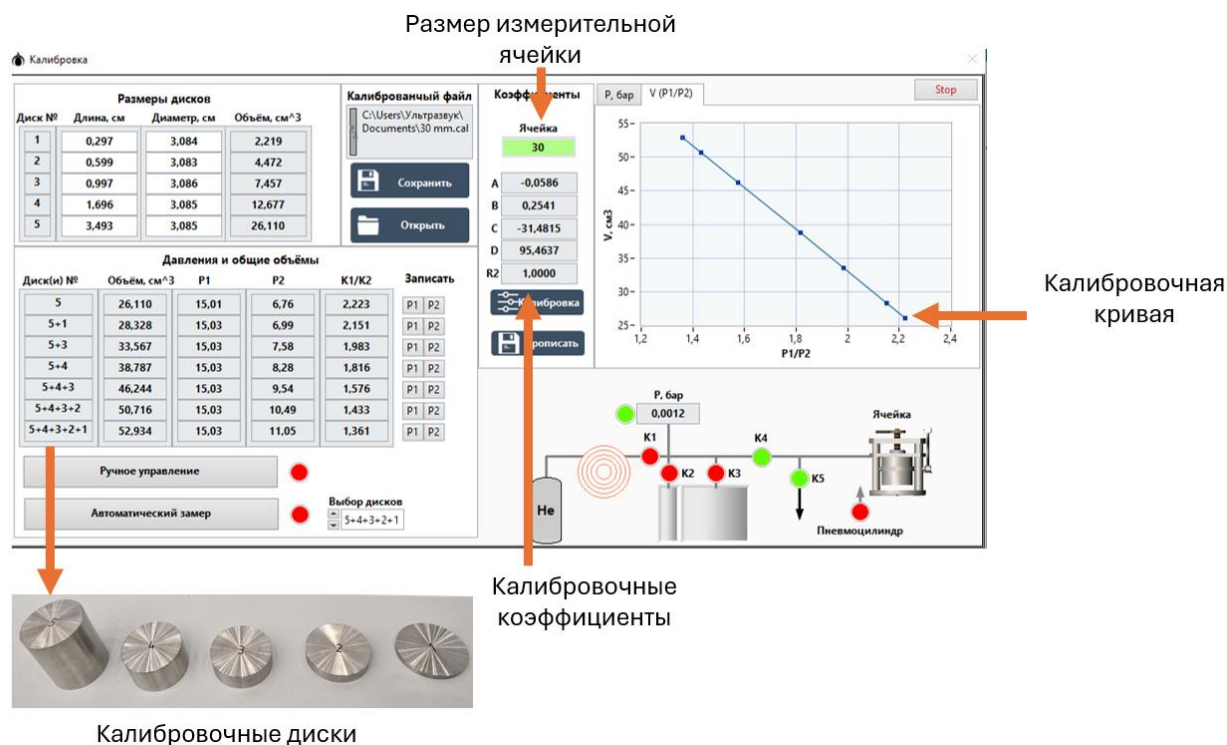


Рис. 4. Параметры калибровки

4. Далее необходимо прописать следующие параметры измерения (данные параметры могут варьироваться в зависимости от требуемых результатов), диаметр используемой ячейки составляет **30 мм**:

Параметры эксперимента

Диаметр ячейки, мм:

Время стабилизации, сек:

Точность стабилизации, бар:

Примечание к замеру

Рис. 5. параметры эксперимента

5. В разделе «Управление» необходимо измерить и прописать следующие данные для керна: длина (см), диаметр (см), масса сухого образца (г).

База образцов

База образцов

База

21

Загрузить Сохранить

Габариты образца

Цилиндрический

№ образца: 21

Масса сух., г: 35,000

Длина, см: 3,012

Диаметр, см: 2,987

Ширина, см: 0,000

Объём, см³: 0,000

Замер выполнен

Новый

Следующий

Удалить

Рис. 6. Параметры кернового материала

6. Далее необходимо поместить керн в измерительную ячейку. Керн необходимо аккуратно опускать в ячейку под наклоном во избежание повреждений.

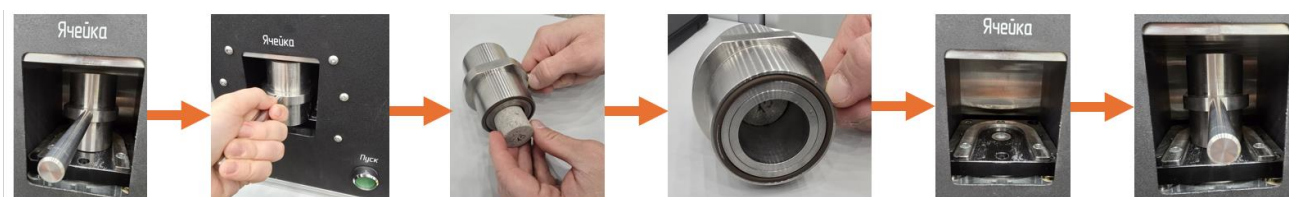


Рис. 7. Порядок установки керна в измерительную ячейку

7. Для запуска изменения в разделе «Управление» нажмите кнопку «Автоматический замер».

Управление ↓

База образцов

Автоматический замер

Ручное управление

Рис. 8. Зафиксируйте полученные результаты.

5.Порядок проведения расчётов и оформления результатов

При оформлении результатов необходимо зафиксировать следующие параметры (Таблица 1).

№ обр.	Длина, см	Диаметр, см	Масса, г	P1, бар	P2, бар	Объём образца, см ³	Объём пор, см ³	Объём зёрен, см ³	Плотность зёрен, г/см ³	Объёмная плотность, г/см ³
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

Вопросы для самоконтроля

1. Что такое открытая пористость материала? Чем она отличается от общей и закрытой пористости?
2. В чем заключается принцип работы порозиметра СМП-ПГ? Какие физические явления лежат в основе метода?
3. Какие типы жидкостей используются в порозиметре СМП-ПГ и почему? Какие требования к ним предъявляются?
4. Какие параметры необходимо задать в программе СМП-ПГ перед началом измерения?
5. Как подготовить образец к измерению на порозиметре СМП-ПГ? Почему важна правильная подготовка?
6. Какие факторы могут повлиять на точность и достоверность результатов измерения открытой пористости?
7. Как интерпретировать результаты, полученные на порозиметре СМП-ПГ (графики, таблицы)? На что следует обращать внимание?
8. Где может быть использован метод определения открытой пористости с помощью порозиметра СМП-ПГ (области применения)?
9. Какие преимущества и недостатки имеет метод СМП-ПГ по сравнению с другими методами определения пористости?
10. Какие меры безопасности необходимо соблюдать при работе с порозиметром СМП-ПГ и используемыми жидкостями?
11. Объясните, на каком физическом законе основан метод газовой пикнометрии. Запишите формулу, связывающую давление и объём.

12. Какие типы пород характеризуются высокой и низкой пористостью? Приведите примеры.
13. Как связаны пористость и проницаемость горной породы? Приведите примеры пород с высокой пористостью, но низкой проницаемостью.
14. Опишите устройство гелиевого порозиметра. Какие основные компоненты входят в его состав?

Тестирование знаний

1. Какой принцип лежит в основе метода СМП-ПГ для определения открытой пористости?

- а) Определение объема твердой фазы по разнице между общим объемом и объемом закрытых пор.
- б) Измерение объема жидкости, проникающей в открытые поры образца.
- в) Определение плотности образца методом гидростатического взвешивания.
- г) Измерение электрической проводимости насыщенного образца.

2. Какой газ обычно используется в порозиметре СМП-ПГ в качестве рабочей жидкости?

- а) Водород.
- б) Азот.
- в) Гелий.
- г) Аргон.

3. Что непосредственно измеряется порозиметром СМП-ПГ для определения объема открытых пор?

- а) Вес образца до и после насыщения жидкостью.
- б) Разница давлений в измерительной камере до и после заполнения пор газом.
- в) Изменение температуры образца при заполнении пор жидкостью.
- г) Объем газа, необходимый для заполнения открытых пор образца.

4. Какой параметр необходимо знать для расчета открытой пористости с использованием данных порозиметра СМП-ПГ?

- а) Диаметр зерен породы.
- б) Минеральный состав породы.
- в) Объем образца.
- г) Температуру окружающей среды.

5. Какая основная погрешность может возникнуть при определении открытой пористости методом СМП-ПГ?

- а) Неполное удаление воздуха из пор образца.
- б) Ошибка в измерении массы образца.
- в) Изменение объема образца в процессе насыщения жидкостью.
- г) Неправильная калибровка прибора.

Литература

1. Амелин И. Д., Андриасов Р. С., Гиматудинов Ш. К. и др. Эксплуатация и технология разработки нефтяных и газовых месторождений. – М.: Недра, 2014. – 354 с.
2. Быкова Н.Е., Максимова М.И., Фурсова А.Я. Справочник по нефтепромысловой геологии. – М.: Недра, 2015. – 524 с.
3. Гиматудинов, Ш. К. Физика нефтяного и газового пласта / Ш. К. Гиматудинов, А. И. Ширковский. – Москва : Недра, 2014. – 311 с.
4. Cui, G., et al. "Pore structure characterization of tight sandstone reservoirs using high-pressure mercury intrusion porosimetry and nuclear magnetic resonance." *Fuel* 235 (2019): P.1155-1166.
5. Tiab D., Donaldson E.C. "Petrophysics: Theory and Practice of Measuring Reservoir Rock and Fluid Transport Properties" 3rd edition. — Gulf Professional Publishing, 2011. — 976 p.

Учебное издание

Фахрутдинов Эдуард Ирекович

Милютин Валерия Андреевна

Леухина Мария Дмитриевна

Абдельрахим Абдалла Халед Сайед Мохамед

**МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОТКРЫТОЙ
ПОРИСТОСТИ В ПОРОДАХ-КОЛЛЕКТОРАХ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОРОЗИМЕТРА СМП-ПГ**

Учебно-методическое пособие