

ГЕОЭКОЛОГИЯ
(ГЕОЛОГО-МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ)

**ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
СЛАНЦЕВЫХ ОБЪЕКТОВ**

Глебова Любовь Владимировна, старший преподаватель, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Российская Федерация, 119234, г. Москва, ул. Ленинские горы, 1, e-mail: lvglebova@mail.ru

Ли Вэньдун, магистрант, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Российская Федерация, 119234, г. Москва, ул. Ленинские горы, 1, e-mail: liwendong928@qq.com

Син Кай, магистрант, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Российская Федерация, 119234, г. Москва, ул. Ленинские горы, 1, e-mail: 6yiyirichard@gmail.com

Исследование сланцевых объектов осуществляется в лабораторных условиях и на практике с применением специальных технологий, в результате которых увеличивается проницаемость продуктивного горизонта. Сланцевые объекты являются сложной структурой. Размер пор традиционных песчаников и карбонатных резервуаров составляет от 1 до 100 мкм, в то время как поры матрицы сланцевых объектов наноразмерные – от 1 до 200 нм. Нанопоры способны вмещать жидкость в свободной и адсорбированной форме. Количество адсорбированного вещества в сланце составляет от 20–80 % от общего объёма. Механизмы движения жидкости можно представить как проникновение, диффузию Кнудсена и поверхностную диффузию. Рассмотрено три механизма движения – это вязкое течение, диффузия Кнудсена и поверхностная диффузия. Уравнения объёмного потока соответствуют трём механизмам движения, и кажущуюся проницаемость определяем в соответствии с уравнением формулы Дарси. Механизмы движения взаимодействуют друг с другом, поэтому, игнорируя влияние других механизмов, объёмный расход, полученный отдельно, имеет определённую погрешность. Кажущаяся проницаемость, полученная расчётным путём, также неточна. На кажущуюся проницаемость сланцевых объектов влияет множество факторов, таких как температура, давление, радиус пор матрицы сланца, относительная молекулярная масса жидкости, вязкость, коэффициент сжатия и параметры, связанные с поверхностной диффузией.

Ключевые слова: геоэкология, сланцевые объекты, нанопористость, диффузия Кнудсена, поры, поверхностная диффузия, низкопроницаемые породы, методы расчёта, неоднородность, факторы, оптимальный метод расчёта, анализ ошибок, кажущаяся проницаемость

GEOECOLOGICAL EXPERIMENTAL EXCLUSIVE SLATE SLATE

Glebova Lyubov V., Senior Lecturer, Lomonosov Moscow State University, 1 Leninskie Gory St., Moscow, 119234, Russian Federation, e-mail: lvglebova@mail.ru

Li Wendong, undergraduate, Lomonosov Moscow State University, 1 Leninskie Gory St., Moscow, 119234, Russian Federation, e-mail: liwendong928@qq.com

Xing Kai, undergraduate, Lomonosov Moscow State University, 1 Leninskie Gory St., Moscow, 119234, Russian Federation, e-mail: 6yiyirichard@gmail.com

The study of shale objects is carried out in the laboratory and in practice with the use of special technologies, which increase the permeability of the productive horizon. Shale objects are a complex structure. The size of the pores of traditional sandstones and carbonate tanks ranges from 1 to 100 microns, while the pores of the matrix of shale objects are nanoscale from 1 to 200 nm. Nanopores are able to hold fluid, both in free form and in adsorbed. The amount of adsorbed in the slate is between 20–80 % of the total. Fluid movement mechanisms can be imagined as penetration, Knudsen diffusion and surface diffusion. Three mechanisms of movement are considered, it is viscous current, Knudsen diffusion and surface diffusion. The volume flow equations correspond to three motion mechanisms, and the apparent permeability is defined according to the Darcy formula equation. Mechanisms of movement interact with each other, so, ignoring the influence of other mechanisms, the volume consumption received separately, has a certain error. The seeming permeability obtained by the calculated way is also not accurate. The apparent permeability of shale objects is influenced by many factors, such as temperature, pressure, slate matrix pore radius, relative molecular mass of liquid, viscosity, compression factor and parameters associated with surface diffusion.

Keywords: geocology, shale objects, nanoporosity, Knudsen diffusion, pores, surface diffusion, low permeability rocks, calculation methods, heterogeneity, factors, optimal calculation method, error analysis, apparent permeability

В сегодняшних временных рамках исследование пористости сланцевых объектов осуществляется не только в лабораторных условиях, но и с применением специальных технологий, в результате которых увеличивается проницаемость продуктивного горизонта. Вещество в матрице перед входом в трещину представляет собой движение потока не по закону Дарси в наномасштабных порах. В нанопорах вещество залегает в свободной и адсорбированной форме. Количество адсорбированного вещества в сланцевых объектах составляет от 20–80 % от общего объёма. Движение жидкости можно представить как вязкое течение, диффузию Кнудсена и поверхностную диффузию.

Рассмотрим три способа проникновения жидкости в поры – это вязкое течение, диффузия Кнудсена и поверхностная диффузия. Уравнения объёмного потока соответствуют трём видам проникновения, и кажущуюся проницаемость определяем в соответствии с уравнением потока Дарси. Три вида проникновения взаимодействуют друг с другом, поэтому, игнорируя влияние других проникновений, объёмный расход, полученный отдельно, имеет определённую погрешность. Кажущаяся проницаемость, полученная расчётным путём, также неточна.

На кажущуюся проницаемость вещества влияет множество факторов, таких как температура, давление, радиус пор матрицы сланца, относительная молекулярная масса вещества, вязкость, коэффициент сжатия и параметры, связанные с поверхностной диффузией.

Графически анализируя влияние вышеуказанных факторов на кажущуюся проницаемость, вырисовывается кривая анализа чувствительности. Технология расчёта вязкости и коэффициента сжатия сложна, стандартного метода расчёта не существует. Подходящий метод расчёта необходимо выбрать в соответствии с объектом исследования. В заключение выбраны методы расчёта видов вязкостей и факторов сжатия. Методы Саттона и Дранчука – Кассема были выбраны в качестве оптимальных методов расчёта вязкости вещества и коэффициента сжатия соответственно.

Рассмотрим механизм проникновения вещества через поры в фактическом состоянии, вязкий поток свободного вещества в реальном состоянии.

Вязкое течение свободного вещества в нанопорах получим расчётным путём с применением уравнения Хагена – Пуазейля:

$$q_{vs} = -\frac{\pi r^4}{8} \frac{1}{\mu} \frac{dp}{dz}, \quad (1)$$

где q_{vs} – объёмный расход вязкого потока вещества; r – радиус пор матрицы сланцевых объектов, м.

Согласно закону Дарси: $q = \pi r^2 \frac{k}{\mu} \frac{dp}{dz}$.

Проницаемость вязкого потока вещества (k_{vs}):

$$k_{vs} = \frac{r^2}{8}, \quad (2)$$

где k_{vs} – вязкое течение соответствует проницаемости.

Очевидно, что проницаемость вязкого потока связана только с радиусом пор.

Диффузия Кнудсена свободного вещества в реальном состоянии.

После рассмотрения коэффициента сжатия вещества объёмное выражение потока диффузии Кнудсена:

$$q_k = -\pi r^2 D_k \frac{ZRT}{p} \frac{dC}{dz}, \quad (3)$$

где q_k – коэффициент сжатия сланцевого вещества.

$$D_k = \frac{2r}{3} \sqrt{\frac{8ZRT}{\pi M}}, \quad (4)$$

$$C = \frac{p}{ZRT}. \quad (5)$$

Подставляем формулу (5) в формулу (3).

Коэффициент сжатия – это функция давления и температуры. Его можно получить в предположении, что температура постоянна:

$$q_k = -\pi r^2 D_k C_g \frac{dp}{dz}, \quad (6)$$

C_g – коэффициент изотермического сжатия сланцевого вещества, Па^{-1} . Его выражение:

$$C_g = \frac{1}{p} - \frac{1}{Z} \frac{dZ}{dp}. \quad (7)$$

Поверхностная диффузия адсорбированного вещества в реальном состоянии. Плотность сланцевого вещества в том же фактическом состоянии должна учитывать коэффициент сжатия. Выражение объёмного потока поверхностной диффузии можно получить из формулы:

$$q_s = -\pi r^2 D_s \frac{RTZ C_L p_L}{p(p_L + p)^2} \frac{dp}{dz}. \quad (8)$$

Модель кажущейся проницаемости сланцевого вещества в реальных условиях. Добавление объёмных потоков вышеупомянутых трёх видов проникновения, т. е. общее выражение объёмного потока сланцевого вещества, в реальном состоянии:

$$q = q_{vs} + q_k + q_s = -\pi r^2 \frac{1}{\mu} \left[\frac{r^2}{8} + \mu D_k C_g + \frac{\mu D_s RTZ}{p} \frac{C_L p_L}{(p + p_L)^2} \right] \frac{dp}{dz}. \quad (9)$$

Согласно закону Дарси: $q = \pi r^2 \frac{k}{\mu} \frac{dp}{dz}$.

Очевидную проницаемость сланцевого вещества можно получить:

$$k = \frac{r^2}{8} + \mu D_k C_g + \frac{\mu D_s RTZ}{p} \frac{C_L p_L}{(p + p_L)^2}. \quad (10)$$

Метод расчёта вязкости и коэффициента сжатия сланцевого вещества

Применение метода расчёта вязкости. Вязкость сланцевого вещества – это важный физический параметром, что необходимо при расчёте его кажущейся проницаемости. Рассмотрим и сравним методы расчёта вязкости сланцевого вещества с применением литературных источников: метод Дранчук – Первис – Робинсон, постоянный метод, метод остаточной вязкости, метод Демпси, Санджари – Лей – Пеймани (SLP), метод Хейдаряна – Могадаси – Рахими (HMR), Jarrahan – Heidaryan (JH), метод Хейдаран – Могадаси – Саларабади (HMS), метод Ли – Гонсалес – Икин (LGE), Эльшаркавы, метод Londono – Archer – Blasingame (LAB), метод Саттона, метод Хейдаран – Джаррахиана (HJ). Сравним экспериментальные данные и проанализируем применимость различных методов и выберем оптимальный метод расчёта.

Метод расчёта ошибки. Метод расчёта относительной ошибки:

$$RE_i = \frac{|\mu_i - \mu_i^{Carr}|}{\mu_i^{Carr}} \cdot 100\% \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (11)$$

Совокупная относительная ошибка:

$$CRE_i = \sum_{j=1}^i \frac{|\mu_i - \mu_i^{Carr}|}{\mu_i^{Carr}} \cdot 100\% \quad i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, i. \quad (12)$$

Средняя относительная ошибка:

$$ARE_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|\mu_i - \mu_i^{Carr}|}{\mu_i^{Carr}} \cdot 100\% \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (13)$$

В формуле μ_i является ли i -я точка данных вязкости, рассчитанная методом, МПа·с; μ_i^{Carr} является ли i -й точкой данных вязкости метода пластины Карра, МПа·с.

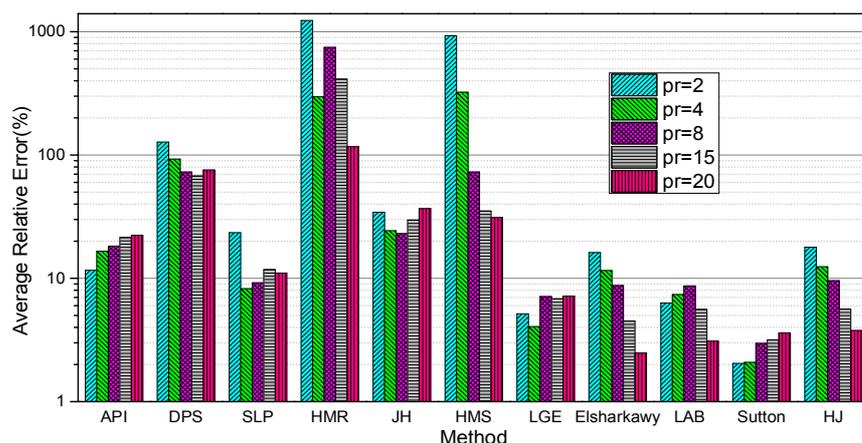


Рис. 1. Гистограмма средней относительной погрешности различных методов расчёта

Из рисунка следует, что использование метода Саттона для расчёта вязкости сланцевого вещества является наиболее точным.

Метод расчёта и диаграмма коэффициента сжатия. Коэффициент сжатия также является важным физическим параметром сланцевого вещества, что также связано с термобарическими условиями. В наших исследованиях коэффициенты сжатия вещества при температурах минус 20 °С, 20 °С, 60 °С и 200 °С были рассчитаны по шести методам. Сравним их со значениями пластин компрессии для вещества и вычислим относительную ошибку различных методов и кумулятивную относительную ошибку.

Проанализируем ошибки. Из рисунков 2 и 3 следует, что ошибка коэффициента сжатия вещества, рассчитанная методом HSM, является самой большой, метод HMR является вторым, разница между методами HY, DPR и DAK невелика, и их ошибка очень мала, среди которых метод DAK является наименьшим.

При расчётах –20 °С метод DAK имеет наименьшую ошибку, при 20 °С и 60 °С метод DPR имеет наименьшую ошибку, при 200 °С метод HY имеет наименьшую ошибку.

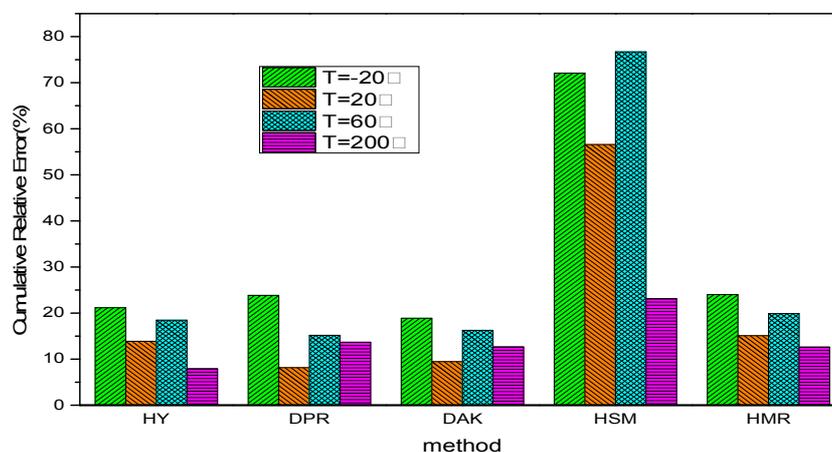


Рис. 2. Гистограмма суммарной относительной погрешности коэффициента сжатия вещества, рассчитанного различными методами при разных температурах

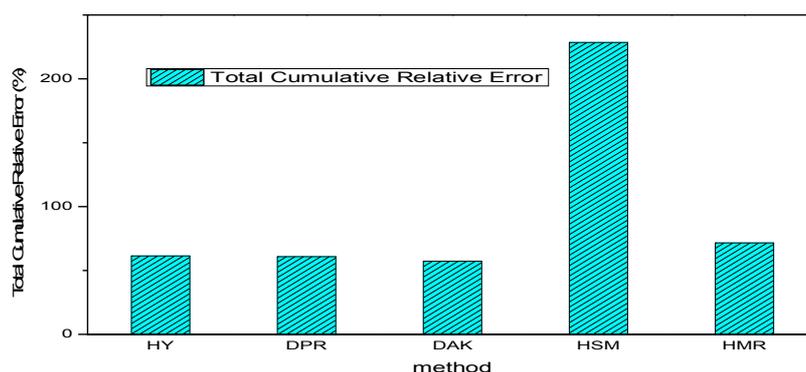


Рис. 3. Гистограмма суммарной относительной погрешности коэффициентов сжатия вещества для различных методов

При расчётах следует учитывать фактическую температуру образования резервуара сланцевого вещества, что соответствует $> 20^{\circ}\text{C}$, и применять метод ДАК или метод DPR.

Расчётное время различных алгоритмов. При расчёте коэффициента сжатия вещества 3 400 точек при различных температурах и давлениях применялись различные методы. Произведён подсчёт времени вычислений и определено среднее значение времени десяти операций, что изображено на рисунке 4.

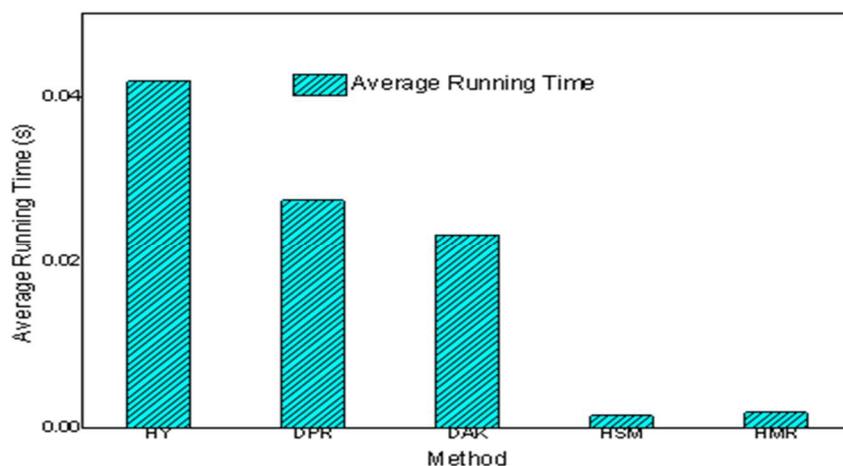


Рис. 4. Гистограмма времени работы различных алгоритмов

Из рисунка 4 следует, что время работы итерационного метода (HY, DPR, ДАК) больше, чем метод подгонки (HSM, HMR).

Расчётное время работы HY является самым продолжительным в трёх итерационных методах, а метод ДАК – немного меньше, чем метод DPR.

Подведём итог, учитывая применимость, значение ошибки и время работы, метод ДАК является одним из оптимальных методов.

Рассмотрим факторы, влияющие на кажущуюся проницаемость сланцевого вещества в реальном состоянии. Важными в расчётах являются приведённые кривые чувствительности температуры, давления, молекулярной массы сланцевого вещества, радиуса пор и параметров поверхностной диффузии, давление Ленгмюра, максимальное количество адсорбции Ленгмюра, равная адсорбционная теплота

Из графиков следует, что, по кривой сравнения, имеется возможность провести анализ чувствительности.

Анализ чувствительности температуры по кажущейся проницаемости. Прослеживается зависимость между кажущейся проницаемостью и температурой, при том, что давления составляют 0,1, 1, 2, 10, 20 и 100 МПа соответственно, что следует из рисунков с 5 по 8.

Очевидно, что кажущаяся проницаемость увеличивается с повышением температуры. Из рисунка 5 следует, что когда давление мало, наклон прямой линии больше, и кажущаяся проницаемость увеличивается быстрее. При этом температура мало влияет на изменение кажущейся проницаемости.

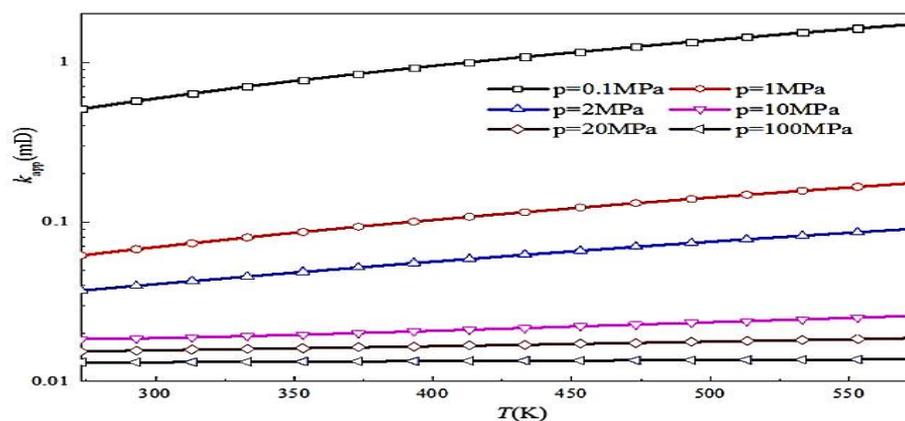


Рис. 5. Влияние температуры на кажущуюся проницаемость

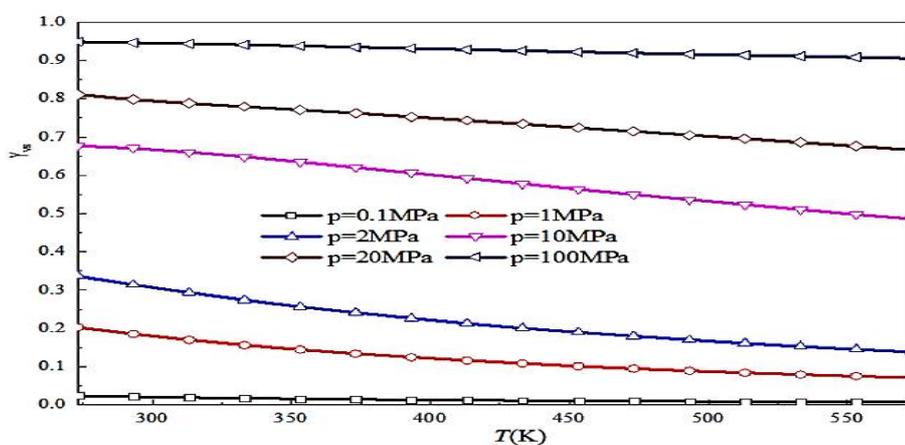


Рис. 6. Влияние температуры на удельный вес проницаемости вязкого потока

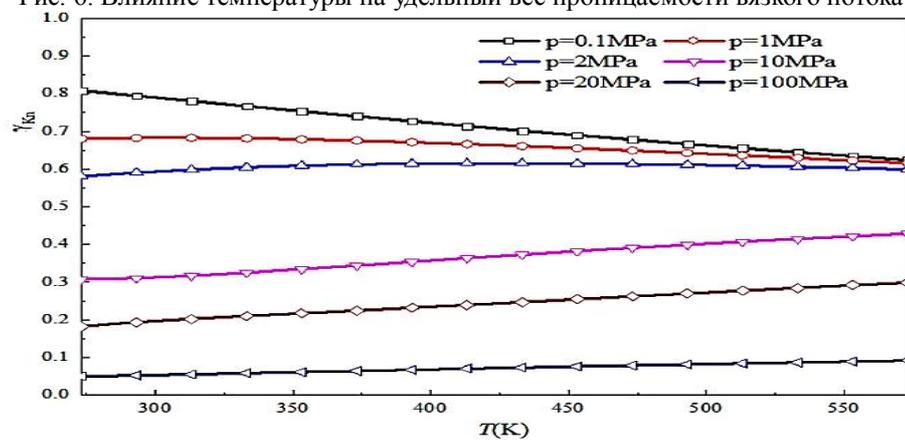


Рис. 7. Влияние температуры на удельный вес диффузионной проницаемости Кнудсена

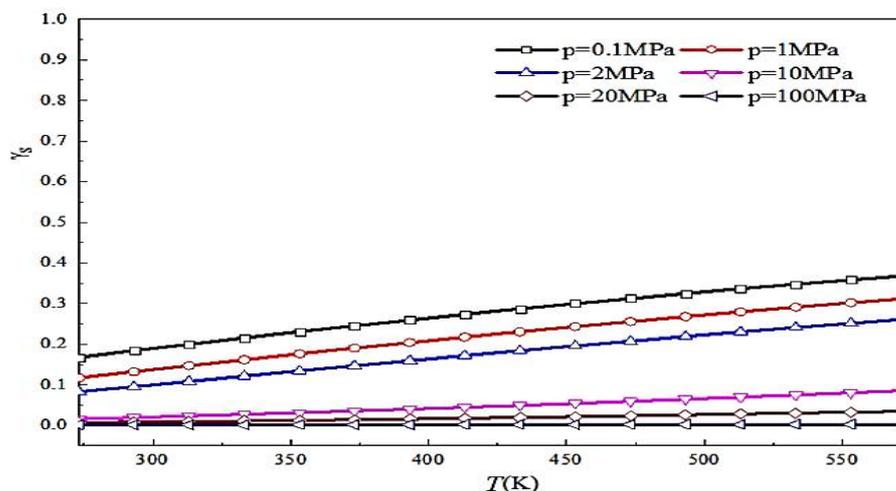


Рис. 8. Влияние температуры на поверхностную диффузионную проницаемость

Проанализируем чувствительность воздействия давления на кажущуюся проницаемость. Кривая кажущейся проницаемости и долей проницаемости трёх вариантов проникновения жидкости как функция давления, когда радиусы пор составляют 1, 5, 20, 50 и 100 нм соответственно, что указано на рисунках с 9 по 12.

Из рисунков следует, что кажущаяся проницаемость уменьшается с увеличением давления. В случае, когда радиус пор мал, проницаемость более чувствительна к изменениям давления и падает быстрее. С увеличением давления удельный вес вязкого потока увеличивается, а доля диффузии Кнудсена и поверхностной диффузии уменьшается. При достижении давления до определённого уровня вязкий поток становится наиболее важным видом проникновения сланцевого вещества.

Когда радиус пор мал, то поверхностная диффузия составляет значительную долю и влияние давления уменьшается.

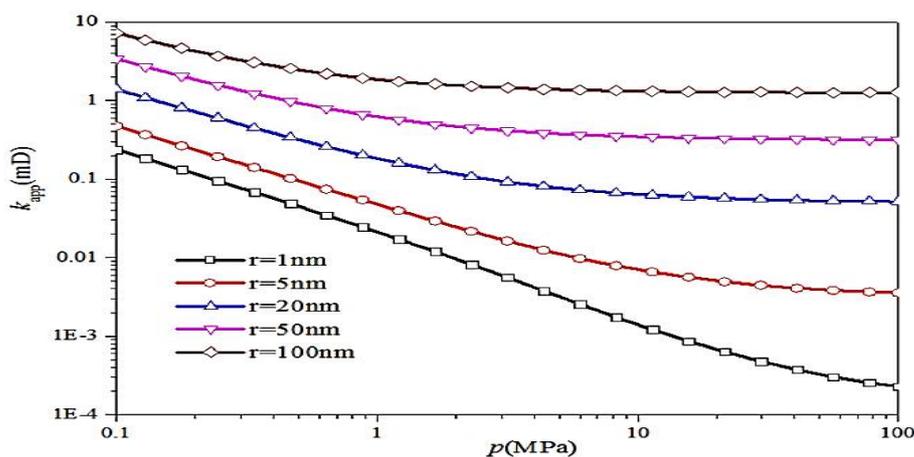


Рис. 9. Влияние давления на кажущуюся проницаемость

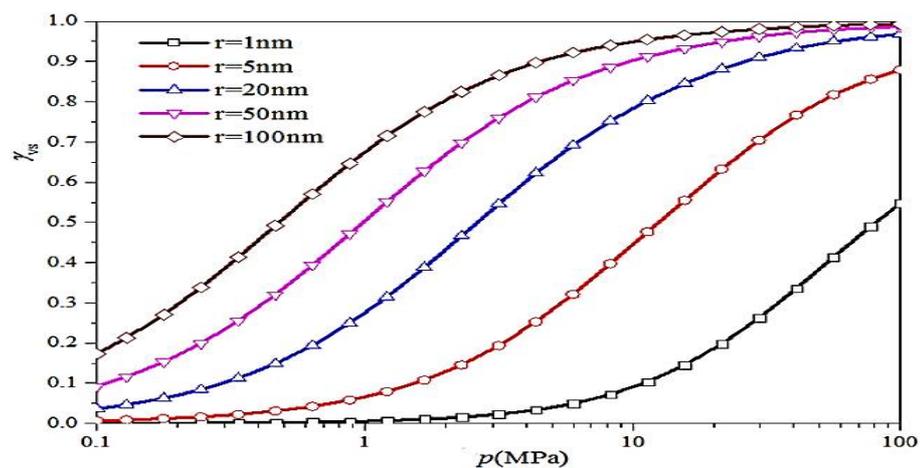


Рис. 10. Влияние давления на удельный вес проницаемости вязкого потока

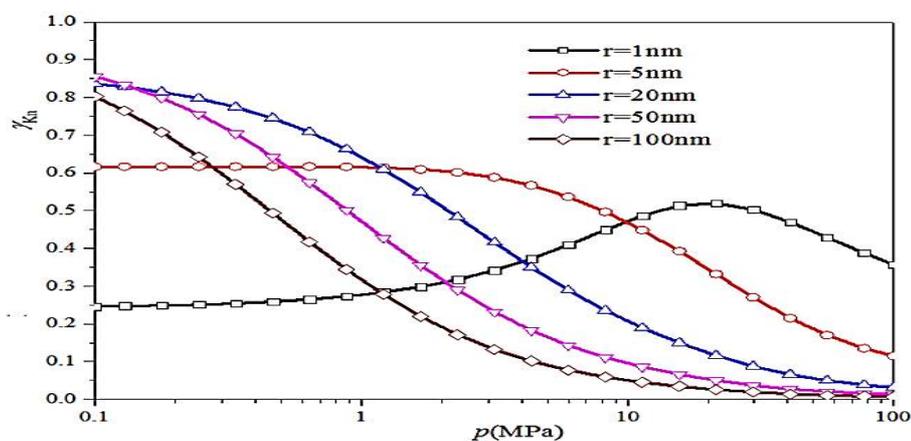


Рис. 11. Влияние давления на удельный вес диффузионной проницаемости Кнудсена

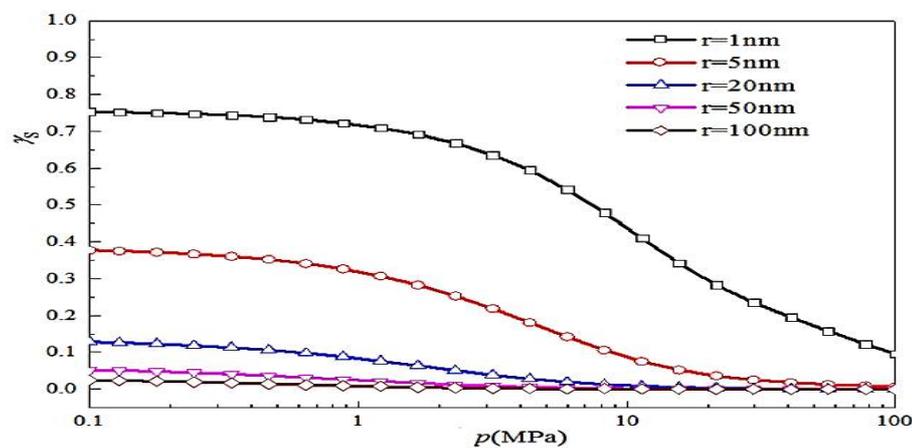


Рис. 12. Влияние давления на диффузионную проницаемость поверхности

Проанализируем чувствительность влияния радиуса пор на кажущуюся проницаемость. Кривые кажущейся проницаемости и удельных весов проницаемости трёх способов проникновения вещества в зависимости от радиуса пор, когда давления составляют 0,1 МПа, 1 МПа, 2 МПа, 10 МПа, 20 МПа и 100 МПа соответственно, что показано на рисунках с 13 по 16.

Радиус пор оказывает большое влияние на кажущуюся проницаемость, что следует из рисунка 13. Следовательно, по мере увеличения молекулярного веса кажущаяся проницаемость значительно возрастет. Чем больше давление, тем быстрее оно увеличивается.

С увеличением радиуса пор удельный вес проницаемости в вязком потоке увеличивается, удельный вес проницаемости диффузионной Кнудсена сначала уменьшается, потом увеличивается, а удельный вес поверхностной диффузионной проницаемости уменьшается, что следует из рисунков 14 и 16.

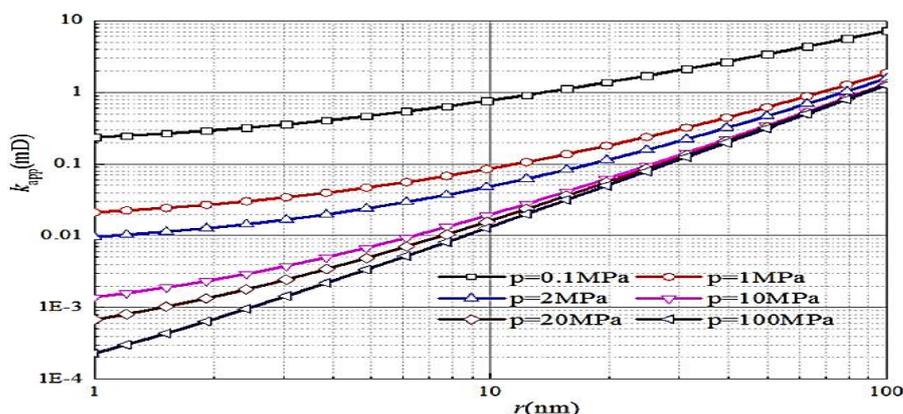


Рис. 13. Влияние радиуса пор на кажущуюся проницаемость

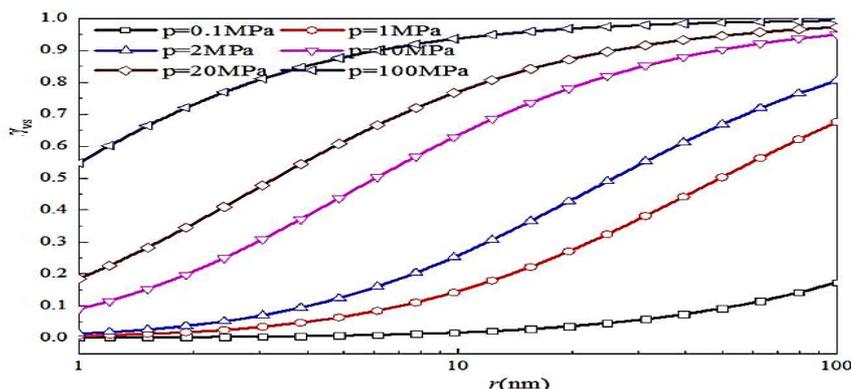


Рис. 14. Влияние радиуса пор на удельный вес проницаемости вязкого потока

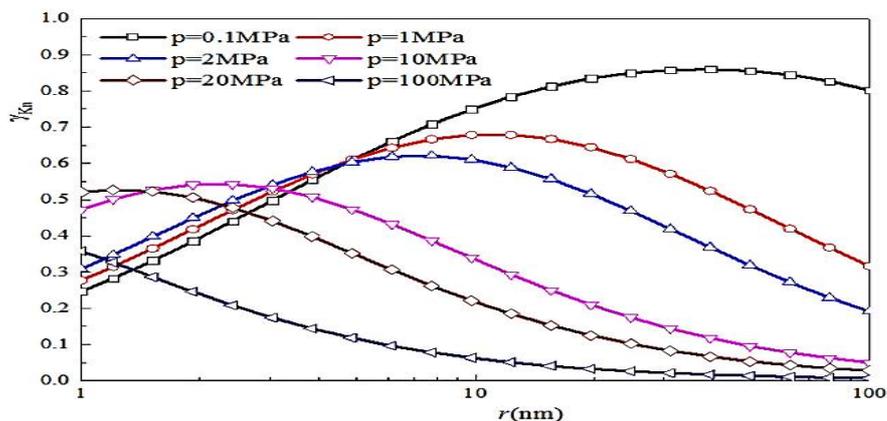


Рис. 15. Влияние радиуса пор на удельный вес диффузионной проницаемости Кнудсена

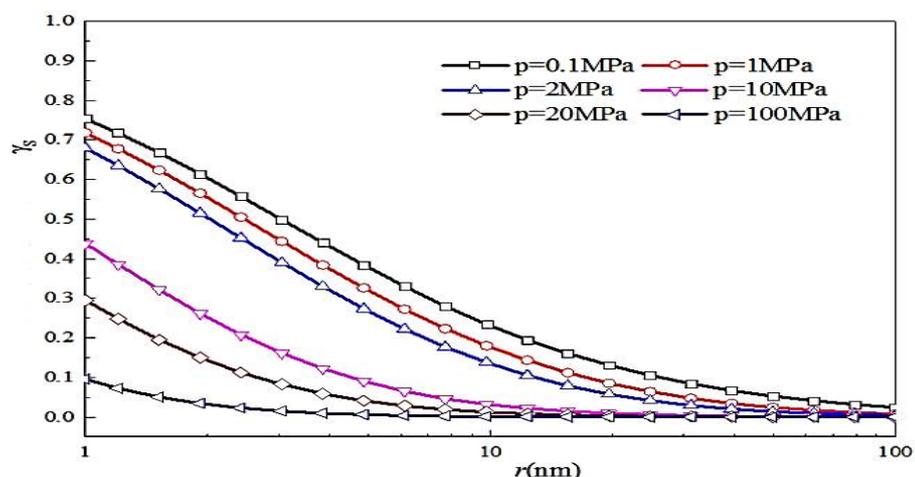


Рис. 16. Влияние радиуса пор на поверхностную диффузионную проницаемость

Проанализируем чувствительность давления Ленгмюра p_L на кажущуюся проницаемость. Рассмотрим кривые кажущейся проницаемости в зависимости от давления Ленгмюра p_L , когда давления составляют 0,1 МПа, 1 МПа, 2 МПа, 10 МПа, 20 МПа и 100 МПа соответственно, что изображено на рисунке 17. Давление Ленгмюра p_L незначительно влияет на кажущуюся проницаемость – это следует из рисунка 17. В результате проницаемость немного уменьшается с увеличением p_L . По мере увеличения давления эффект давления Ленгмюра p_L на кажущуюся проницаемость становится всё меньше и меньше.

Давление Ленгмюра p_L увеличивается, проницаемость, соответствующая поверхностной диффузии, значительно уменьшается, что приводит к уменьшению общей кажущейся проницаемости.

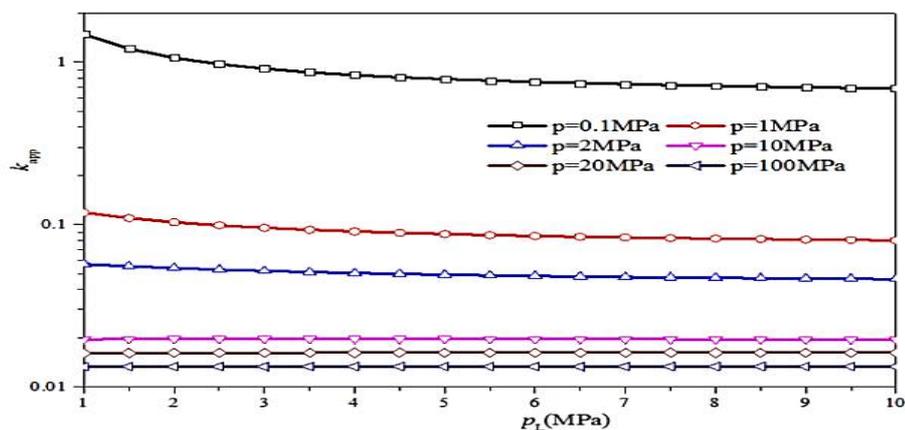


Рис. 17. Влияние давления Ленгмюра на кажущуюся степень проникновения

Анализ чувствительности к влиянию максимального количества адсорбции Ленгмюра на кажущуюся проницаемость. Кривые кажущейся проницаемости в зависимости от максимального количества адсорбции Ленгмюра C_L , когда давления составляют 0,1 МПа, 1 МПа, 2 МПа, 10 МПа, 20 МПа и 100 МПа соответственно, что изображено на рисунке 18.

Из рисунка следует, что максимальное количество адсорбции Ленгмюра незначительно влияет на кажущуюся проницаемость. Проницаемость слегка возрастает по мере увеличения максимального количества адсорбции Ленгмюра. С увеличения давления эффект максимального количества адсорбции Ленгмюра на кажущуюся проницаемость становится всё меньше и меньше.

Изменение максимального количества адсорбции Ленгмюра C_L в основном влияет на поверхностную диффузию.

В случае, когда давление относительно невелико, соотношение вязкого течения также невелико. Когда C_L увеличивается, проницаемость, соответствующая поверхностной диффузии, значительно возрастает, что приводит к увеличению общей кажущейся проницаемости и уменьшению удельного веса проницаемости диффузионной Кнудсена. При высоком давлении преобладает вязкий поток, и эти эффекты становятся незначительными.

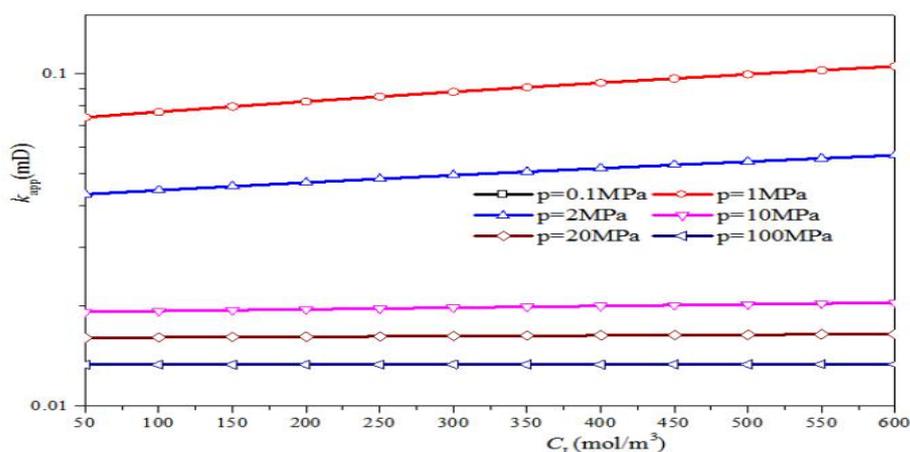


Рис. 18. Влияние максимальной адсорбции Ленгмюра на кажущуюся проницаемость

В результате получена модель кажущейся проницаемости сланцевых объектов в нанопорах в идеальных и реальных условиях. Определён расчёт вязкости сланцевого вещества и коэффициент сжатия.

Проанализированы факторы, влияющие на кажущуюся проницаемость при различных давлениях, различных радиусах пор и разных температурах.

Сделаны следующие выводы:

- способ проникновения сланцевого вещества в нанопорах включает вязкий поток, диффузию Кнудсена и поверхностную диффузию;
- кажущаяся проницаемость сланцевого вещества является высокой в случае высокой температуры, большого радиуса пор и большого максимального количества адсорбции Ленгмюра;
- вязкий поток наблюдается при проникновении с высоким давлением, большим размером пор и условиях низкой температуры;
- диффузия Кнудсена наблюдается при проникновении вещества с низким давлением, малом размере пор, низкой температуре, максимальном количестве адсорбции Ленгмюра;

- поверхностная диффузия выше при проникновении в условиях низкого давления, малых размеров пор, высокой температуре, низкого давления Ленгмюра и большого максимального количества адсорбции Ленгмюра;
- коэффициент поверхностной диффузии, такой как давление Ленгмюра и максимальное количество адсорбции Ленгмюра, незначительно влияет на движение вещества. Он влияет на кажущуюся проницаемость сланцевых объектов в среде с высокой температурой и низким давлением, с небольшим радиусом пор от 1 до 20 нм.

Список литературы

1. Берд, Г. Молекулярная газовая динамика / Г. Берд. – Москва : Мир, 1981. – С. 187.
2. Высоцкий, В. И. Перспективы освоения ресурсов сланцевого газа / В. И. Высоцкий // Приложение к журналу «ТЭК. Стратегии развития». – 2010. – № 2.
3. Дмитриевский, А. Н. Сланцевый газ – новый вектор развития мирового рынка углеводородного сырья / А. Н. Дмитриевский, В. И. Высоцкий // Вестник ОНЗ РАН. – 2010. – Т. 2.
4. Дубов, Д. Ю. Температурная зависимость вязкости разреженного газа, или 120 лет модели Сазерленда / Д. Ю. Дубов // Современные проблемы динамики разреженных газов. – Новосибирск, 2013.
5. Жданов, В. М. Течения и диффузия газовых смесей в микроканалах и пористых средах / В. М. Жданов, В. И. Ролдугин // Современные проблемы динамики разреженных газов. – Новосибирск, 2013.
6. Захарченков, И. А. Сланцевая революция: мифы и реальность / И. А. Захарченков // Рынок ценных бумаг. – 2013. – № 6. – С. 30–33.
7. Bullin, K. A. Compositional variety complicates processing plans for US shale gas / K. A. Bullin, P. E. Krouskop // Oil & Gas Journal. – March 2009. – № 10.
8. Кошмаров, Ю. А. Прикладная динамика разреженного газа / Ю. А. Кошмаров, Ю. А. Рыжов. – Москва : Машиностроение, 1977. – С. 184.
9. Литке, К. Поколение и накопление в Западно-Сибирском бассейне газа / К. Литке, Н. В. Лопатин [и др.] // AAPG бюллетень. – 1999. – Т. 83, № 10. – С. 1642–1665.
10. Malek, K. Knudsen self- and Fickian diffusion in rough nanoporous media / K. Malek and M.-O. Coppens // Journal of Chemical Physics. – 2003. – Vol. 119, № 5. – P. 2801–2811.
11. Рудобашта, С. П. Диффузия в химико-технологических процессах / С. П. Рудобашта, Э. М. Карташов. – Москва : КолосС, 2010. – С. 478.
12. Сорокин, С. Н. Основные проблемы и перспективы добычи сланцевого газа / С. Н. Сорокин, А. А. Горячев // Экономика энергетики как направление исследований: передовые рубежи и повседневная реальность. – Москва, 2012. – С. 123–132.
13. Циуб, Пин. Кажущаяся проницаемость газосланцевой матрицы с учетом эффектов адсорбции, диффузии и проскальзывания газа / Циуб Пин // Нефть и Газ 2016. – Москва, 2016. – С. 334.
14. Шахов, Е. М. Метод исследования движения разреженного газа / Е. М. Шахов. – Москва : Наука, 1974. – С. 209.
15. Якушев, В. С. Технологические подходы к разработке ресурсов сланцевого газа / В. С. Якушев, Циуб Пин // Геология геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2017. – № 4. – С. 51–56.

References

1. Berd, G. *Molekulyarnaya gazovaya dinamika* [Molecular gas dynamics]. Moscow, Mir Publ., 1981, p. 187.
2. Vysotskiy, V. I. Perspektivy osvoeniya resursov slantseвого gaza [Prospects for the development of shale gas resources]. *Prilozhenie k zhurnalu "TEK. Strategii razvitiya"* [Appendix to the journal "Fuel and Energy Complex. Development Strategies"], 2010, no. 2.
3. Dmitrievskiy, A. N., Vysotskiy, V. I. Slantsevyy gaz – novyy vektor razvitiya mirovogo rynka uglevodorodnogo syrya [Shale gas – a new vector in the development of the global hydrocarbon market]. *Vestnik ONZ RAN* [Vestnik ONZ RAS], 2010, vol. 2.
4. Dubov, D. Yu. Temperaturnaya zavisimost vyazkosti razrezhennogo gaza, ili 120 let modeli Sazerlenda [Temperature dependence of the viscosity of a rarefied gas, or 120 years of the Sutherland model]. *Sovremennyye problemy dinamiki razrezhennykh gazov* [Modern problems of the dynamics of rarefied gases]. Novosibirsk, 2013.
5. Zhdanov, V. M., Roldugin, V. I. Tcheniya i diffuziya gazovykh smesey v mikroanalakh i poristyykh sredakh [Flows and diffusion of gas mixtures in microchannels and porous media]. *Sovremennyye problemy dinamiki razrezhennykh gazov* [Modern problems of the dynamics of rarefied gases]. Novosibirsk, 2013.
6. Zakharchenkov, I. A. Slantsevaya revolyutsiya: mify i realnost [Slate revolution: myths and reality]. *Rynok tsennykh bumag* [Securities Market], 2013, no. 6, pp. 30–33.
7. Bullin, K. A., Krouskop, P. E. Compositional variety complicates processing plans for US shale gas. *Oil & Gas Journal*, March 2009, no. 10.
8. Koshmarov, Yu. A., Ryzhov, Yu. A. *Prikladnaya dinamika razrezhennogo gaza* [Applied dynamics of rarefied gas]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977, p. 184.
9. Litke, K., Lopatin N. V. et al. Pokolenie i nakoplenie v Zapadno-Sibirskom bassejne gaza [Generation and accumulation of gas in the West Siberian basin]. *AAPG byulleten* [AAPG Bulletin], 1999, vol. 83, no. 10, pp. 1642–1665.
10. Malek, K. Coppens, M.-O. Knudsen self- and Fickian diffusion in rough nanoporous media. *Journal of Chemical Physics*, 2003, vol. 119, no. 5, pp. 2801–2811.
11. Rudobashta, S. P., Kartashov, E. M. *Diffuziya v khimiko-tekhnologicheskikh protsessakh* [Diffusion in chemical-technological processes]. Moscow, KolosS Publ., 2010, p. 478.
12. Sorokin, S. N., Goryachev, A. A. Osnovnye problemy i perspektivy dobychi slantseвого gaza [Main problems and prospects for shale gas production]. *Ekonomika energetiki kak napravlenie issledovaniy: peredovye rubezhi i povsednevnyaya realnost* [Energy Economics as a Research Direction: Frontiers and Everyday Reality]. Moscow, 2012, pp. 123–132.
13. Tsiub, Pin. Kazhushchayasya pronitsaemost gazoslantsevoy matritsy s uchetom effektivov adsorbtsii, diffuzii i proskalyzvaniya gaza [The apparent permeability of the gas shale matrix taking into account the effects of adsorption, diffusion and gas slippage]. *Neft i Gaz 2016* [Oil and Gas 2016]. Moscow, 2016, p. 334.
14. Shakhov, Ye. M. *Metod issledovaniya dvizheniya razrezhennogo gaza* [The method of studying the motion of rarefied gas]. Moscow, Nauka Publ., 1974, p. 209.
15. Yakushev, V. S., Tsiu, Pin. Tekhnologicheskie podkhody k razrabotke resursov slantseвого gaza [Technological approaches to the development of shale gas resources]. *Geologiya geofizika i razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdeniy* [Geology geophysics and the development of oil and gas fields], 2017, no. 4, pp. 51–56.