

## Раздел 1. Физика угля и горных пород

УДК 533.6.011: 533.583.2

В.А. Васильковский, А.Н. Молчанов, С.Е. Дегтярь

### ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ВЛИЯНИЯ СОРБЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ НА ФИЛЬТРАЦИОННОЕ ТЕЧЕНИЕ ГАЗОВ В ПОРИСТЫХ СРЕДАХ

Институт физики горных процессов НАН Украины

*Экспериментально изучено влияние давления и температуры на фильтрационное течение метана и гелия через сорбирующую и несорбирующую пористые среды. Анализ опытных данных показал, что при движении метана в порах Пуазейля наличие сорбционного слоя не дает дополнительного вклада в поток газа. Сделан вывод, что фильтрационное течение метана определяется молекулами, которые не испытывают сорбирующего влияния фильтрующей среды.*

**Ключевые слова:** диффузия, фильтрация, пористость, сорбция

#### Введение

Описанию движения газов в каменных углях посвящено много теоретических и экспериментальных работ. Главным итогом этих исследований можно считать «расшифровку» механизма движения метана в куске угля после его отделения от газоносного пласта. Экспериментально и теоретически было доказано, что этот механизм представляет собой суперпозицию диффузии газа из закрытых пор угля и его фильтрации открытыми порами и трещинами [1, 2]. Однако многие задачи физики течения газа в угле все еще требуют своего решения. Так, до сих пор нет ясности в том, как влияет на течение газа способность поверхности фильтрующей среды к сорбции газовых молекул. По этому вопросу мнения ученых разделились. Одна группа авторов, в частности И.В. Сергеев и др. [3], придерживается мнения, что в случае мгновенной десорбции тепловое перемешивание молекул газа в свободном и сорбированном состояниях приводит к росту интенсивности движения газа при фильтрации. Другие, наоборот, пренебрегают возможным влиянием поверхностного сорбционного слоя, считая его незначительным. Однако все авторы едины во мнении, что экспериментальная оценка такого влияния невозможна из-за трудностей технического характера. Любые попытки экспериментально выявить особенности фильтрационного течения газа в каменных углях будут обречены на неудачу ввиду демпфирующего влияния диффузионных процессов и большой продолжительности (иногда более суток) установления сорбционного равновесия в системе уголь–газ.

Обойти эту трудность можно, если в качестве фильтрующей среды использовать модельный материал – измельченный активированный уголь. Последний, в отличие от природного угля, обладает только открытой сорбционной поверхностью, и поэтому сорбционное равновесие при фильтрации будет устанавливаться практически мгновенно.

При стационарном ламинарном течении газа в фильтрационном канале, диаметр которого превышает длину свободного пробега молекул ( $d_{\text{пор}} \geq \lambda$ ), происходит вязкое течение газа. Динамику такого течения принято описывать уравнением Дарси

$$\frac{dQ}{dt} = \text{div} \left[ \frac{\kappa}{\eta} \rho \text{grad } P \right], \quad (1)$$

где  $\eta$  – динамическая вязкость газа,  $Q$  – количество газа в единице объема фильтрующей среды,  $k$  – ее проницаемость.

Плотность  $\rho$  представляет собой количество молекул метана в единице объема газа. В области малых ( $\sim 1$  атм) давлений можно считать, что газ подчиняется уравнению состояния идеального газа

$$P = \rho T. \quad (2)$$

Здесь параметр  $T$  – абсолютная температура газа в фильтрационном канале в энергетических единицах.

С учетом выражения (2) уравнение Дарси может быть преобразовано к виду

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \text{div} \left[ \frac{\kappa}{2\eta T} \text{grad } P^2 \right], \quad (3)$$

а при одномерном течении газа – к виду

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \frac{\kappa}{2\eta T} \frac{d^2}{dx^2} P^2. \quad (4)$$

В случае, когда  $\partial Q / \partial t = 0$ , получаем выражение для плотности  $i$  потока стационарного течения газа

$$i = \frac{\kappa}{2\eta T} \frac{d}{dx} P^2 = \text{const}. \quad (5)$$

Из формулы (5) видно, что стационарный поток газа  $I$  в канале длиной  $L$  и площадью сечения  $S$  будет описываться выражением

$$I = iS = \frac{\kappa S}{2\eta T} \frac{(P_1^2 - P_2^2)}{L}, \quad (6)$$

где  $P_1$  и  $P_2$  – давление газа на входе и выходе канала соответственно.

Если  $P_2 \approx 0$ , то выражение для потока упрощается к виду

$$I = \frac{\kappa S}{2\eta T} \frac{P_1^2}{L}. \quad (7)$$

При движении газа в каналах Пуазейля ( $d_{\text{пор}} \geq \lambda$ ) вязкость газа не зависит от его плотности и растет с повышением температуры пропорционально  $\sqrt{T}$ . Из выражения (7) видно, что, если течение газа происходит в несорбирующей среде, а также, если давление газа не зависит от температуры, то:

- а) поток газа при фильтрации пропорционален градиенту  $P^2$ ;
- б) зависимость потока от температуры близка к  $T^{-3/2}$ .

При течении газа через сорбирующую среду, например активированный уголь, газ нельзя рассматривать как идеальный. В этом случае по радиусу канала (поры) создается градиент концентрации молекул газа, а ее среднее значение имеет иную, более сложную зависимость от давления и температуры.

Таким образом, при изучении зависимости потока газа от давления и температуры появляется возможность выявить, влияет ли сорбированный вблизи поверхности пористой среды слой молекул на скорость течения газа при фильтрации.

Нами были проведены измерения влияния температуры и давления на количество газа в фильтрационном канале, а также на фильтрационное течение метана и гелия в двух средах – мелкодисперсном порошке талька ( $\text{H}_2\text{Mg}_3(\text{SiO}_3)_4$ ) и измельченном активированном угле.

### Экспериментальная часть

Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Фильтрационное течение газа обеспечивается тем, что газ из сосуда  $V_1$  через теплообменник 2 непрерывно поступает в фильтрационный канал  $I$  и на его выходе отсасывается насосом 3. При этом на выходе канала поддерживается постоянное низкое давление газа  $P_2 \approx 400$  Па. Для создания нужных температурных условий течения газа фильтрационный канал и теплообменник размещены в термокамере 4, которая обеспечивает стабилизацию температуры  $\pm 0,5^\circ\text{C}$ . Сосуд  $V_1$  термоизолирован, благодаря чему дрейф температуры газа в этом сосуде не превышает  $1^\circ\text{C}$  за 150 мин. Соединение фильтрационного канала с одной стороны с теплообменником, а с другой – с насосом 3 выполнено из силиконовых трубок. В этом случае мы получаем возможность быстро и надежно при любой температуре специальными зажимами 5 перекрывать течение газа в соответствии с требованиями эксперимента. В ходе фильтрации изменение давления газа  $P_1$  в сосуде  $V_1$  ежесекундно регистрируется датчиком давления 6, и соответствующий сигнал поступает в блок памяти компьютера 7. Диапазон измерений избыточного давления датчиками 6 и 8 ограничен величиной 40 кПа. Чувствительность датчиков с аналогово-цифровым преобразователем – менее 1 Па.

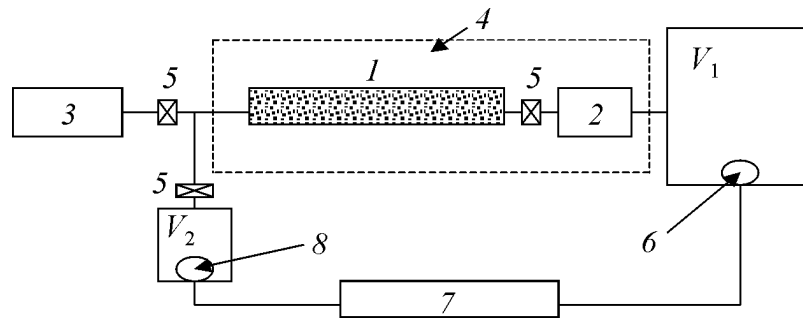


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Размер частиц фильтрующей среды, длина и диаметр канала фильтрации, а также объем сосуда \$V\_1\$ (в опытах с фильтрацией газа) подбирали, исходя из требования, чтобы характерное время \$\tau\_{P\_1}\$ изменения давления \$P\_1\$ в сосуде \$V\_1\$ было на два или три порядка больше времени \$\Delta t\$ между двумя последовательными измерениями давления \$P\_1\$. В этом случае мы надеялись получить зависимости \$P\_1(t)\$ и \$\partial P\_1(t)/\partial t\$ с минимальными погрешностями, которые могли бы возникнуть из-за эффекта сглаживания при больших интервалах \$\Delta t\$.

Для того чтобы оценить характерное время \$\tau\_{P\_1}\$, найдем выражение для изменения давления \$P\_1(t)\$ в сосуде \$V\_1\$ при истечении из него газа через фильтрационный канал. Так как сосуд \$V\_1\$ является источником газа, то фильтрационный поток \$I(t)\$ равен скорости изменения количества молекул \$N\_1\$ газа в этом сосуде:

$$\frac{\kappa S}{2\eta TL} P_1^2(t) = -\frac{dN_1}{dt} = -\frac{V_1}{T_1} \frac{dP_1}{dt}. \quad (8)$$

Здесь \$T\_1\$ – температура газа в сосуде \$V\_1\$.

Уравнение (8) может быть преобразовано к виду

$$\frac{dP_1}{dt} = -\psi P_1^2(t), \quad (9)$$

где \$\psi = \frac{\kappa S T\_1}{2\eta TL V\_1}\$.

Решим далее дифференциальное уравнение \$\frac{dP\_1}{P\_1^2} = -\psi dt\$ при условии, что

в начальный момент \$P\_1 = P\_0\$:

$$\int_{P_0}^{P_1} \frac{dP_1}{P_1^2} = -\psi \int_0^t dt \rightarrow -\frac{1}{P_1} + \frac{1}{P_0} = -\psi t.$$

Отсюда получаем выражение для давления \$P\_1\$ при истечении газа через фильтрационный канал:

$$P_1(t) = \frac{P_0}{1 + P_0 \psi t}. \quad (10)$$

Согласно этому выражению характерное время изменения давления  $P_1$  будет равно  $\tau_{P_1} = 1/\psi P_0 = 2\eta TLV_1/(\kappa ST_1 P_0)$ . Его численное значение может быть получено из данных опыта. Для полноты изложения отметим, что характерное время  $\tau_\phi$  изменения давления  $P_\phi$  газа в фильтрационном канале (без подпитки из сосуда  $V_1$  или других источников) описывается таким же выражением, но с заменой  $V_1$  на свободный объем  $V_\phi$  фильтрационного канала:

$$\tau_\phi = \frac{P_\phi}{\partial P_\phi / \partial t} = 2\eta LV_\phi / (\kappa S P_\phi).$$

Если опытным путем подобрать объемы сосудов  $V_1$  и  $V_\phi$  такими, чтобы выполнялось неравенство  $\tau_{P_1} \gg \tau_\phi$ , то через время немногим больше, чем  $\tau_\phi$ , в системе сосуд  $V_1$ –фильтрационный канал установится баланс потоков на входе и выходе канала. Это является условием для начала регистрации процесса фильтрации.

Экспериментальные данные об изменении давления  $P_1$  газа в сосуде  $V_1$  в последующем используются для компьютерной оптимизации параметров интерполяционной функции, имеющей наименьшее среднеквадратичное отклонение от экспериментальных точек. Интерполяция выполняется с помощью функции вида

$$y = a / (1 + a \psi x). \quad (11)$$

В том случае, когда необходимо было определить количество газа в фильтрационном канале, схему опыта изменяли. С перекрытым выходом канала фильтрующую среду в течение 30 мин насыщали газом фиксированного давления из сосуда  $V_1$ , после чего вход канала также перекрывали. Десорбцию газа из фильтрующей среды канала производили в вакуумированный сосуд объемом  $V_2 = 700 \text{ см}^3$ , изменение давления в котором регистрировали с помощью датчика давления 8. Экспериментальные данные хода десорбции интерполировали функцией

$$y = a(1 - (1 + bx)^{-0,5}) + c(1 - \exp(-x/d)). \quad (12)$$

Такая функция, как показывают исследования [4], обеспечивает наилучшее приближение при описании хода десорбции газов.

Перед проведением эксперимента фильтрующую среду предварительно прогревали в вакууме при  $T = 150 \text{ К}$  в течение 60 мин. Этим мы удаляли влагу и другие флюиды с ее поверхности.

В качестве канала фильтрации использовали трубки, выполненные из нержавеющей стали и заполненные фильтрующей средой. Размер гранул таль-

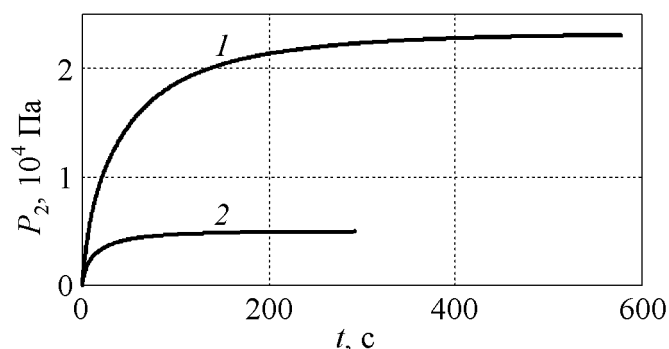
ка 0,005–0,1 мм, гранул активированного угля – 0,01–0,25 мм. Длина обеих трубок  $L = 50$  см, диаметр  $\varnothing = 0,9$  см.

Для исследований использован объемный метод, в котором по мере истечения газа через фильтрационный канал величину потока  $I$  определяли по скорости изменения давления  $P_1$  в сосуде  $V_1$ :  $dP_1/dt = (T_1/V_1)I$ .

Так как в ходе эксперимента температура  $T_1$  газа в сосуде  $V_1$  остается постоянной, можно считать, что изменение величины  $dP_1/dt$  полностью соответствует характеру и величине изменения потока  $I$ . Далее при обсуждении получаемой опытным путем величины  $dP_1/dt$  или ее изменения для удобства изложения будем пользоваться терминами «поток» или «изменение потока», не забывая при этом о существовании между величинами  $dP_1/dt$  и  $I$  коэффициента пропорциональности –  $T_1/V_1$ .

### Оценка влияния давления и температуры на количество газа в фильтрационном канале с активированным углем

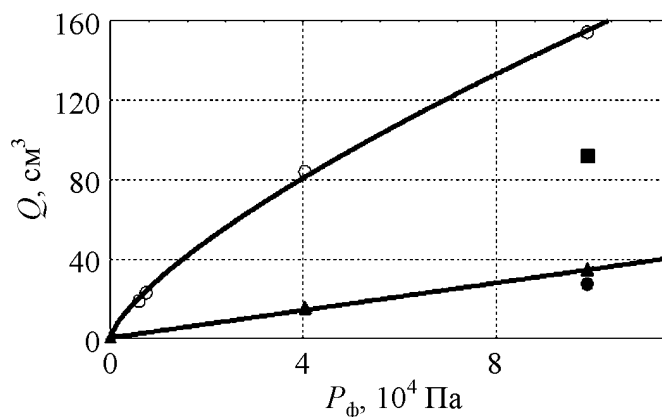
Характер изменения давления  $P_2(t)$  в сосуде  $V_2$  при десорбции метана и гелия из фильтрационного канала с активированным углем в гранулах 0,01–0,25 мм иллюстрирует рис. 2. Начальное давление газа в канале перед десорбцией составляло  $P_\phi = 98920$  Па.



**Рис. 2.** Характер изменения давления  $P_2$  в сосуде  $V_2$  при десорбции метана (1) и гелия (2) из фильтрационного канала с активированным углем. Начальное давление газа в канале  $P_\phi = 98920$  Па, объем сосуда  $V_2 = 700$  см<sup>3</sup>

Десорбция гелия при 293 К позволяет оценить свободный объем фильтрационного канала, который в данном случае получен равным  $Q = P_2 V_2 / P_{\text{атм}} \approx 34$  см<sup>3</sup>. Геометрический объем канала с соединительными трубками составляет  $\sim 36$  см<sup>3</sup>, и если учесть объем, занимаемый углем, то результат оценки оказывается неожиданно высоким. Это может быть связано либо с наличием примесей других газов, которые могут быть сорбированы углем вместе с гелием, либо с высокой пористостью активированного угля. Для гелия нельзя исключать также проявления слабых эффектов ван-дер-ваальсового притяжения, подобных тем, которые имеют место в аргоне, ксеноне и других газах [5,6]. В этом случае возможно образование ван-дер-ваальсовых кластеров, которое сопровождается повышением концентрации газа.

Результаты измерений с использованием других температур и равновесных давлений сорбции показаны на рис. 3. Видно, что в пределах ошибки измерений гелий в среде активированного угля обладает свойствами идеального газа – количество гелия пропорционально сорбционному давлению  $P_{\phi}$  и обратно пропорционально температуре.



**Рис. 3.** Количество газа в фильтрационном канале с активированным углем:  $\circ$  – метан при 293 К,  $\blacksquare$  – метан при 373 К,  $\blacktriangle$  – гелий при 293 К,  $\bullet$  – гелий при 373 К

Обнаружено также, что при комнатной температуре (293 К) и давлении, близком к атмосферному, количество метана в фильтрационном канале с активированным углем во много раз больше, чем гелия.

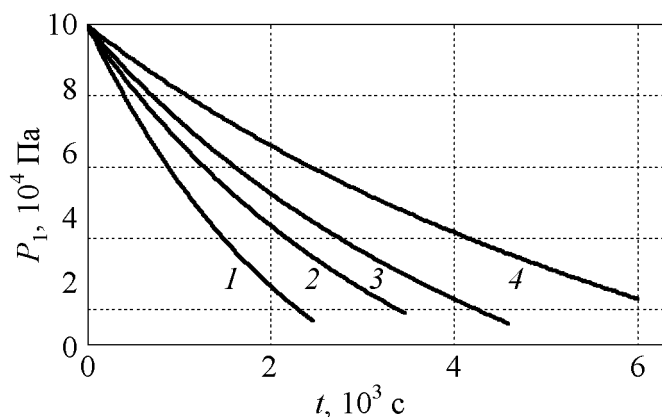
Из рис. 3 видно, что содержание метана в угле нелинейно зависит от давления и эта зависимость близка к  $Q \sim P^{0,7}$ . Измерения показывают также, что при изменении температуры от 293 к 373 К содержание метана уменьшается в 2 раза. Такое изменение значительно больше, чем то, которое может наблюдаться для идеального газа или гелия в наших опытах ( $\sim 1,27$ ).

Все эти экспериментальные факты указывают на то, что при течении метана в среде активированного угля газ имеет значительную сорбированную составляющую, чувствительную к изменению температуры. Сказанное убеждает нас в правильности выбора активированного угля в качестве фильтрационного материала для изучения особенностей течения газов в сорбирующей среде. Для удобства интерпретации течения газов их презентацию мы предварим изложением результатов опытов по течению газов в средах с несорбирующей поверхностью.

### Изучение влияния температуры и давления на фильтрационное течение метана и гелия через тальк и активированный уголь

Характер изменения давления  $P_1$  газа в сосуде  $V_1$  объемом  $5160 \text{ cm}^3$ , которое наблюдается при фильтрации газов через тальк в гранулах  $0,005\text{--}0,1 \text{ mm}$ , иллюстрирует рис. 4. Экспериментальные данные интерполировали функцией (11). Оптимизацию параметров функции проводили с привлечением соответствующей компьютерной программы. В результате были получены четыре интерполяционные функции указанного

выше вида, каждая со своим набором значений параметров  $a$  и  $\psi$ . Максимальное отклонение функций от экспериментальных значений не превышало 40 Па.



**Рис. 4.** Характер изменения давления  $P_1$  в сосуде  $V_1$  при фильтрационном течении метана (кривые 1, 2) и гелия (кривые 3, 4) через тальк при разных температурах  $T$ , К: 1, 3 – 293; 2, 4 – 373

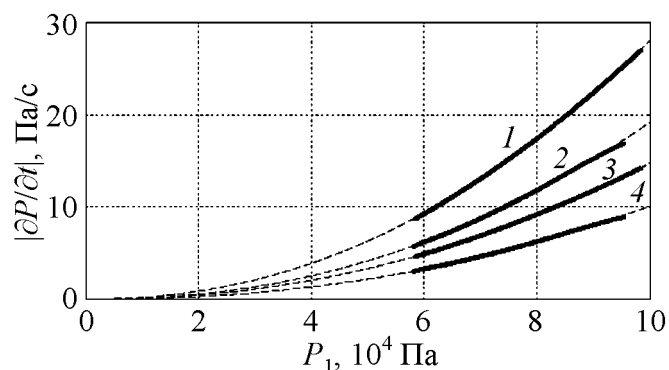
Из рис.4 видно, что рост температуры приводит к замедлению фильтрационного течения. Обращает на себя внимание также и то, что скорость течения гелия значительно слабее, чем метана.

Для более детального анализа результатов мы находили производную каждой из четырех интерполяционных функций и строили графики зависимости «потока»  $|\partial P_1 / \partial t|$  от давления  $P_1$ . Такое представление результатов измерений удобно тем, что появляется возможность сравнивать величины потоков в нескольких экспериментах при одинаковом значении  $P_1$ .

На рис. 5 представлены зависимости «потока»  $|\partial P_1 / \partial t|$  от давления  $P_1$  в ходе фильтрации метана и гелия при  $T = 293$  и  $373$  К. Изменение потоков гелия при этих температурах показано в виде кривых 3 и 4.

Характер кривых 1–4 допускает интерполяцию функцией вида

$$y = \psi(x^2). \quad (13)$$



**Рис. 5.** Характер изменения потока метана (кривые 1, 2) и гелия (кривые 3, 4) от давления при течении через тальк при температуре  $T$ , К : 1, 3 – 293; 2, 4 – 373

Графики этих функций, имеющие наименьшее среднеквадратичное отклонение от исходных данных, показаны штриховыми линиями. Оптимальные значения параметра  $\psi$  интерполяционной функции  $y = \psi(x^2)$  представлены в табл. 1.



Таблица 1

Численные значения параметра  $\psi$  в формуле (10), соответствующие фильтрационному течению метана и гелия при температуре талька 293 и 373К

| Среда фильтрации                             | Тальк |      |       |       |
|--|-------|------|-------|-------|
|  | Метан |      | Гелий |       |
| Газ  |       |      |       |       |
| Температура, К                               | 293   | 373  | 293   | 373   |
| $\psi, 10^{-9} \text{ Па}^{-1}\text{с}^{-1}$ | 2.71  | 1.83 | 1.43  | 0.96  |
| $\tau_{P1}, \text{ с}$                       | 3700  | 5400 | 7000  | 10400 |
| $\tau_{\phi}, \text{ с}$                     | 21    | 31   | 40    | 60    |

Используя эти данные, можно рассчитать проницаемость фильтрующей среды. Если температура газа в сосуде  $V_1$  и в фильтрационном канале одинакова, то согласно формуле (9) выражение для проницаемости  $k$  будет иметь вид:  $k = 2\psi\eta LV_1 / S$ . Для расчета величины  $k$  используем числовые значения параметров фильтрационного течения метана в тальке при 293 К:  $\psi = 2,71 \cdot 10^{-9} \text{ Па}^{-1}\cdot\text{с}^{-1}$ ;  $\eta_{293} \approx 1,08 \cdot 10^{-5} \text{ Па}\cdot\text{с}$ ;  $S = 6,36 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$ ;  $L = 0,5 \text{ м}$ ;  $V_1 = 5,16 \cdot 10^{-3} \cdot \text{м}^3$ :

$$k = \frac{2 \cdot 2,71 \cdot 10^{-9} \cdot 1,08 \cdot 10^{-5} \cdot 0,5 \cdot 5,16 \cdot 10^{-3}}{6,36 \cdot 10^{-5}} \approx 2,4 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2 = 2,4 \text{ Дарси.}$$

В предположении, что частицы талька имеют сферическую форму, можно выполнить грубую оценку их среднего размера. Воспользуемся для этого материалами работы [8], в которой выведена связь между теоретической проницаемостью  $k$  среды фильтрации, ее пористостью  $\gamma$  и диаметром частиц  $\bar{d}$ , составляющих эту среду:  $k = 0,01057\gamma^{3,3}d^2$ . При числовых значениях  $\gamma \approx 0,5$  и  $k = 2,4 \cdot 10^{-12}$  средний диаметр частиц талька равен  $\bar{d} \approx 50 \cdot 10^{-6} \text{ м} = 50 \text{ мкм}$ .

Прямая зависимость потока от квадрата давления  $P_1^2$  указывает на то, что течение газов происходит в порах достаточно большого сечения ( $d_{\text{пор}} \geq \lambda$ ) и, несмотря на низкую концентрацию газа у выхода фильтрационного канала, возможный вклад течения Кнудсена незаметен.

Анализ данных свидетельствует, что значения потоков как метана, так и гелия зависят от температуры одинаково:  $(I_{293}/I_{373}) = 1,45 \pm 0,05$ . Подобная зависимость от температуры близка к зависимости  $I \sim T^{-3/2}$ , характерной для идеальных газов. Сравнение потоков метана и гелия обнаруживает, что при одинаковых значениях температуры и давления  $P_1$  всегда выдерживается соотношение:  $I_{\text{CH}_4} / I_{\text{He}} \approx 1,9 \pm 0,1$ . Как видно из выражения (7), это связано с различием вязкости гелия и метана  $\eta_{\text{He}} = 1,94 \cdot 10^{-5} \text{ Н}\cdot\text{с}\cdot\text{м}^{-2}$ ,  $\eta_{\text{CH}_4} = 1,08 \cdot 10^{-5} \text{ Н}\cdot\text{с}\cdot\text{м}^{-2}$  [7].

Таким образом, изучение фильтрации метана и гелия в мелкодисперсном порошке талька показывает, что принципиального отличия в характере течения этих газов нет. В обоих случаях реализуется течение Пуазейля, а зависимость потока и концентрации газа от температуры и давления подчиняется законам идеального газа.

В опытах по фильтрации газов через активированный уголь объем сосуда  $V_1$  был другим –  $16000 \text{ см}^3$ , но методика измерений и способ обработки полученных данных были такими же, как и в предыдущем случае.

На рис. 6 представлены зависимости потоков  $|\partial P_1 / \partial t|$  метана и гелия от давления  $P_1$  и температуры. Расчет показывает, что величина отношения потоков ( $I_{293}/I_{373}$ ) и для метана, и для гелия примерно одинакова ( $\sim 1,42$  и  $\sim 1,39$ ) и близка к той, которая получена при фильтрации через порошок талька.

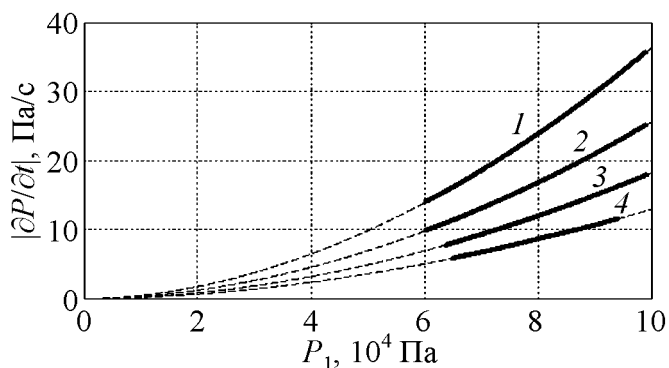


Рис. 6. Зависимость потока газа от давления  $P_1$  и температуры при течении метана (кривые 1, 2) и гелия (кривые 3, 4) через активированный уголь при температуре  $T, \text{ К}$ : 1, 3 – 293; 2, 4 – 373

Таким образом, несмотря на то, что средняя концентрация метана при указанных температурах отличается в два раза, данное обстоятельство не является определяющим для величины потока газа. Это можно объяснить только тем, что, несмотря на тепловой «обмен» между свободными и сорбированными состояниями молекул, фильтрационное течение определяется только той частью ансамбля молекул метана, которая не испытывает «в данный момент» сорбирующего влияния фильтрующей среды.

Так же, как и в предыдущем опыте, была выполнена оптимизация параметра  $\psi$  интерполяционной функции  $y = \psi(x^2)$ . Результаты оптимизации применительно к данным о фильтрации через активированный уголь сведены в табл. 2. Расчет показывает, что в случае течения газов через измельченный активированный уголь проницаемость фильтрующей среды составляла  $\kappa \approx 10 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$ , а средний размер частиц угля  $\bar{d} \approx 100 \text{ мкм}$ .

Таблица 2

Численные значения параметра  $\psi$  функции  $y = \psi(x^2)$ , соответствующие фильтрационному течению метана и гелия при температуре активированного угля 293 и 373 К

| Среда фильтрации                                    | Активированный уголь |      |       |      |
|---|----------------------|------|-------|------|
|   | Метан                |      | Гелий |      |
| Газ   |                      |      |       |      |
| Температура, К                                      | 293                  | 373  | 293   | 373  |
| $\psi, 10^{-9} \text{ Па}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ | 3,72                 | 2,62 | 1,86  | 1,34 |
| $\tau_{P1}, \text{ с}$                              | 2700                 | 3800 | 5350  | 7450 |
| $\tau_{\phi}, \text{ с}$                            | 4,2                  | 5,9  | 8,3   | 11,6 |

### Заключение

В наших опытах не обнаружено влияние сорбционного слоя молекул на фильтрационный поток газов при его движении в порах Пуазейля. Не замечено также признаков «поверхностного течения» – движения молекул у поверхности от одного центра сорбции к другому (в направлении градиента давления). Однако исключать возможность такого течения преждевременно. Его роль, вероятно, должна быть заметна в средах, сечение пор которых меньше длины свободного пробега молекул, поскольку диффузионный механизм движения газа в таких порах близок к механизму поверхностного течения.

Авторы признательны доктору физ.-мат. наук, профессору Э.П. Фельдману за постоянный интерес к нашей работе и полезные замечания в ходе ее выполнения.

Работа выполнена в рамках проекта УНТЦ 4202.

1. *Васильковский В.А.* Фазовые состояния и механизмы десорбции метана из угля / В.А. Васильковский, А.Н. Молчанов, Н.А. Калугина // Физико-технические проблемы горного производства. – 2006. – Вып. 9. – С. 62–70.
2. *Алексеев А.Д.* Диффузионно-фильтрационная модель выхода метана из угольного пласта / А.Д. Алексеев, Т.А. Василенко, К.В. Гуменник, Н.А. Калугина, Э.П. Фельдман // Журнал технической физики. – 2007. – № 4. – С. 65–74.
3. *Сергеев И.В.* Теоретические и экспериментальные методы исследования газового состояния массива горных пород / И.В. Сергеев, Д.И. Бухны, А.Е. Фитерман. – М.: Наука, 1988. – 110 с.
4. *Васильковский В.А.* Физическая интерпретация параметров интерполяции хода десорбции метана из каменного угля / В.А. Васильковский // Вісті Донецького гірничого інституту. – 2007. – №2. – С. 150–156.
5. *Немухин А.В.* Многообразие кластеров / А.В. Немухин // Рос. хим. журн. – 1996. – Т. 40. – С. 48–56.
6. *Губин С.П.* Химия кластеров / С.П. Губин. – М.: Наука, 1987. – 263 с.
7. *Таблицы физических величин: Справочник* / Под ред. акад. И.К. Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976. – С. 67–75.
8. *Лейбензон Л.С.* Движение природных жидкостей и газов в пористой среде / Л.С. Лейбензон. – М.-Л.: ОГИЗ, 1947. – 244 с.

В.О. Васильковский, О.М. Молчанов, С. Е. Дегтяр

### ОЦІНКА СТУПЕНЯ ВПЛИВУ СОРБЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ НА ФІЛЬТРАЦІЙНУ ТЕЧІЮ ГАЗІВ В ПОРИСТИХ СЕРЕДОВИЩАХ

*Експериментально вивчено вплив тиску та температури на фільтраційну течію метану і гелію через сорбуючу і несорбуючу пористу середу. Аналіз дослідних даних*

*показав, що під час руху метану в порах Пуазейля наявність сорбційного шару не дає додаткового вкладу в потік газу. Зроблено висновок, що фільтраційна течія метану визначається молекулами, які не відчують сорбуючого впливу фільтруючого середовища.*

**Ключові слова:** дифузія, фільтрація, пористість, сорбція

V.A. Vasilkovsky, A.N. Molchanov, S.E. Degtyar

#### EVALUATION OF SORPTIVE CAPACITY EFFECT ON THE FILTRATION GAS FLOW IN POROUS MEDIA

*Pressure and temperature effects on the methane and helium filtration flow in sorptive or non-sorptive porous media are studied experimentally. Analysis of the experimental data has shown that the sorptive layer exerts a negligible influence on methane flow in the case of the gas motion in the Poiseuille pores. It is concluded that methane filtration flow is determined by those methane molecules which move beyond the sorptive action of a filtration medium.*

**Key words:** diffusion, filtration, porosity, sorption

*Статья поступила в редакцию 25 февраля 2010 года*