

## ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДВУМЕРНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ВОДЫ ЧЕРЕЗ УГОЛЬНЫЕ ОБРАЗЦЫ

*О.А. Усов, С.П. Минеев, Р.А. Дякун, Н.Я. Трохимец, Ю.Е. Поляков, А.С. Янжула, В.П. Рудь,  
Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины, Украина*

Исследована радиальная фильтрация воды через вертикальные боковые грани угольного образца к центральному вертикальному отверстию. Ось отверстия направлена перпендикулярно напластованию образца. Обнаружено наличие суффозионных процессов и скин-эффекта в диапазоне скоростей фильтрации, характерных для режимов гидрорыхления угольных пластов. Установлено значительное повышение дебита под действием вертикальной распределенной механической нагрузки, действующей вдоль оси скважины.

**Актуальность.** Для борьбы с внезапными выбросами применяется нагнетание в угольный пласт воды под высоким давлением. Скважины для нагнетания чаще всего бурятся из подготовительных выработок в плоскости простирания угольного пласта на глубину до 8 м, устье скважины изолируется герметизатором на глубину до 6 м. Поток воды на первом этапе нагнетания будет трехмерным, а после пропитки пласта в зоне скважины на всю мощность – двумерным. Иногда скважины бурятся перпендикулярно к угольному пласту через породную пробку между ним и проводимой горной выработкой. В этом случае поток воды в пласте будет двумерным в течение всего периода нагнетания.

Сам угольный пласт характеризуется 3D анизотропией проницаемости с ярко выраженным контрастом ее компонент вдоль простирания и поперек простирания. Механические напряжения, возникающие в нем под действием давления вышележащих пород и тектонических процессов, тоже характеризуются тремя разными по величине компонентами. Картина усложняется локальным перераспределением механических напряжений в окрестности пробуренной скважины.

Однако сложившиеся представления об этом сложном многофакторном процессе опираются только на результаты лабораторных исследований одномерного осевого потока воды через угольные образцы, который никак не соответствует реальной картине. А реальное горное давление имитируется равнокомпонентными механическими напряжениями, приложенными к боковым поверхностям образцов перпендикулярно направлению течения воды. Такой способ не адекватно моделирует даже поле механических напряжений в вертикальной скважине, пробуренной с земной поверхности. Эти лабораторные исследования дополняются вульгаризированными теоретическими положениями, заимствованными из гидрогеологии и нефтяной подземной гидравлики [1].

Построенные таким образом модели процесса принципиально не соответствуют результатам наблюдений за параметрами гидрообработки угольных пластов в шахтных условиях [2].

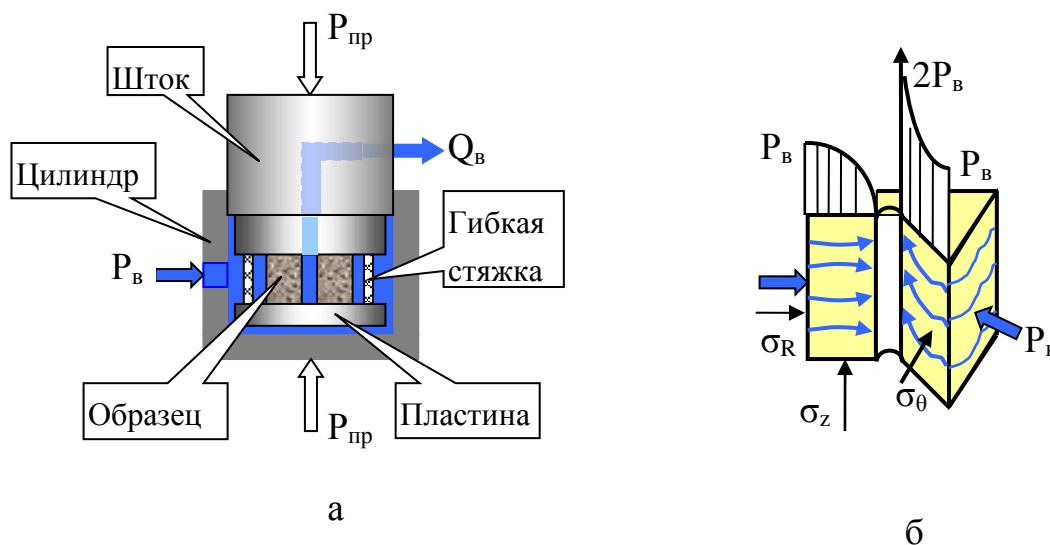
Поэтому, проведение лабораторных исследований параметров гидрообработки образцов на оборудовании, адекватно моделирующем форм-фактор потока и реальное горное давление, является весьма актуальной проблемой.

Ее решение с последующей корректировкой базовых расчетных зависимостей позволит не только оптимизировать сам процесс гидрообработки, но и использовать его текущие параметры для совершенствования прогноза выбросоопасности пласта.

**Цель работы** – получить лабораторные данные по двумерной фильтрации воды через угольные образцы в условиях не равнокомпонентного поля механических напряжений, действующих на их скелет.

На данном этапе решалась задача создания одинаковых механических напряжений, действующих на скелет образца в горизонтальной плоскости и отличающейся от них вертикальной компоненте, параллельной оси центрального отверстия просверленного в образце.

Описание стенда. Для организации двумерного потока воды была использована идея центрального отверстия в образце [1, 3]. Сам образец имеет прямоугольную форму – наиболее удобную для его изготовления. Стенд для испытания образца [4] имеет форму цилиндра со штоком (рис.1), который размещается между плитами гидравлического пресса.



а) – принципиальная схема;  
 б) – эпюры радиальных  $\sigma_R$  и кольцевых  $\sigma_\theta$  цилиндрических напряжений, возникающих в скелете образца от давления воды.

Рис. 1 – Стенд испытаний образцов угля

Вода из полости цилиндра фильтруется через образец к его центральному отверстию, а оттуда поступает через дренажные каналы штока к мензурке для измерения расхода  $Q_v$ . Давление воды в цилиндре контролируется манометром  $P_v$ . Это давление действует на ту часть поверхности образца, которая не пропускает воду – «скелет», и создает в нем механические напряжения.

Эпюры механических напряжений в «скелете» образца в цилиндрических координатах, связанных с осью отверстия, полученные из решения упругой задачи Ламэ для толстостенного цилиндра [5], показаны на рис.1-б. Соотношение компонент механических напряжений изменяется в зависимости от расстояния до отверстия.

На внешнем контуре образца две компоненты горизонтальных напряжений всегда равны друг другу, а отличается от них только вертикальная компонента  $\sigma_z$ , и то только в том случае, когда шток нагружен гидравлическим прессом:

$$\sigma_R = \sigma_\theta = P_v; \sigma_z = P_{пр} \quad (1)$$

Если нагрузки от пресса нет, то нижняя пластина находится под давлением воды  $P_v$  и внешний контур образца находится в условиях равнокомпонентного объемного сжатия.

А на контуре отверстия все три компоненты механических напряжений разные

$$\sigma_R = 0; \sigma_\theta = 2P_v; \sigma_z = P_{пр} \quad (2)$$

И поскольку  $\sigma_R$  всегда равно 0, контур отверстия всегда находится в плоском напряженном состоянии. Соотношение вертикальной компоненты  $\sigma_z$  к окружной определяется отношением давления воды в цилиндре и механического усилия пресса. При отсутствии нагрузки от пресса окружное напряжение в два раза больше вертикального  $\sigma_\theta = 2\sigma_z = 2P_v$ . А чтобы уравнять обе

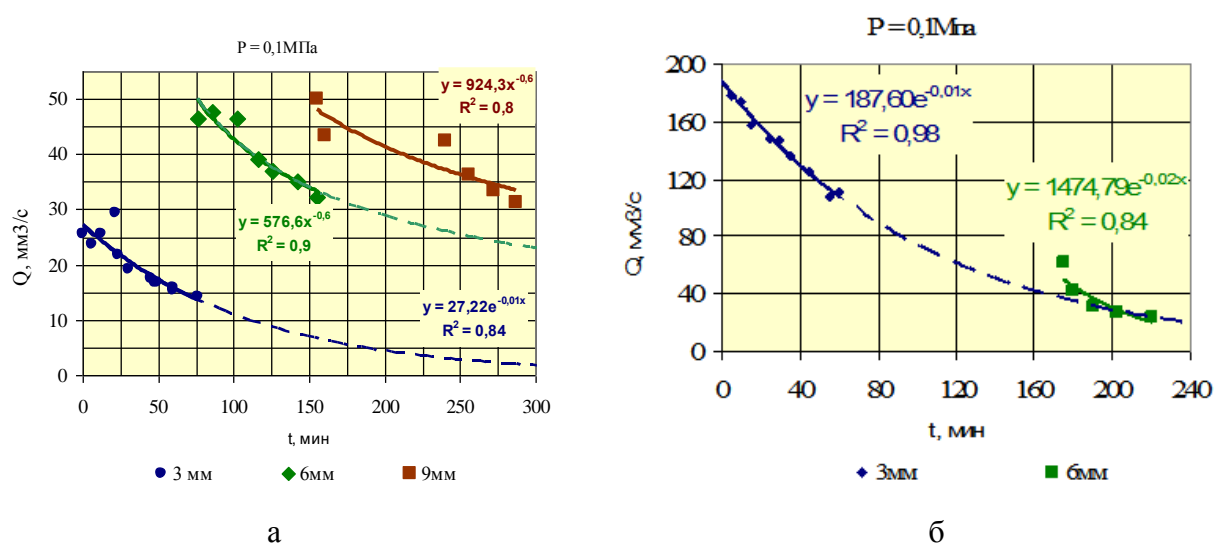
компоненты нужно прессом развить вдвое большее давление на образец, чем давление воды в цилиндре.

**Методика испытаний.** Проведенный выше анализ особенностей нагружения образца показал, что полная стабильность соотношений компонент механических напряжений «скелета» как на контуре образца, так и на контуре отверстия достигается без нагрузки от пресса и при постоянном давлении воды внутри цилиндра. В таких условиях определялась зависимость дебита от диаметра отверстия в одном и том же образце.

Влияние давления в цилиндре на дебит воды изучалось также без нагрузки от пресса. При изменении давления в цилиндре контур образца остается в равнокомпонентном объемном сжатии. Не изменяется и соотношение компонент (2:1) плоского напряженного состояния на контуре отверстия. Но изменяется величина напряжений, влияющая на проницаемость образца.

Влияние механических напряжений в «скелете» изучалось при различных нагрузках от пресса и при разных давлениях воды в цилиндре.

**Зависимость дебита образца от времени** при разных диаметрах отверстия определялась следующим образом. До начала эксперимента в образце высверливалось отверстие минимального диаметра (3мм). Образец помещался в цилиндр стенда, который заполнялся водой под давлением 0,1МПа. Давление пресса отсутствовало. После окончания процесса выхода воздуха из образца и дренажных отверстий начинались регулярные измерения дебита. Через определенное время (1 час) образец вместе со штоком извлекался из цилиндра, отверстие рассверливалось до диаметра 6мм, образец помещался в цилиндр, который заполнялся водой под тем же давлением 0,1МПа, из системы выпускался воздух, и проводилась новая серия измерений. Давление воды в цилиндре во время всех измерений поддерживалось постоянным (0,1Мпа). Результаты измерений представлены на рисунке 2.



а) – образец ш. Молодогвардейская; б) – образец ш. Перевальская.

Рисунок 2 – Изменение во времени дебита воды через образцы 4x4x4см под постоянным давлением 0,1МПа при различных диаметрах отверстия – 3,6 и 9мм

Главная особенность двумерной фильтрации воды через образцы – значительное уменьшение дебита во времени при неизменном давлении. Дебит снижается примерно в 1,5 раза в течение первого часа наблюдений – со 180 до 110 $\text{m}^3/\text{s}$  (рис.2-б). Та же тенденция наблюдается и на рисунке 2-а, отличие только в численных величинах дебита.

При этом увеличение диаметра отверстия ожидаемо приводит к увеличению дебита для образца угля из шахты «Молодогвардейская» (рис.2-а). Но это увеличение происходит не

пропорционально диаметру отверстия. Так, увеличение диаметра отверстия в 2 раза – с 3 до 6мм увеличивает начальный дебит в 1,6 раза – с 30 до 48мм<sup>3</sup>/с. А дальнейшее увеличение диаметра отверстия в 1,5 раза – с 6 до 9мм практически не изменяет не только начальный, но и текущий дебит. Разница между соответствующими кривыми на рис.2-а обусловлена только снижением дебита с течением времени. А для образца угля шх. Перевальская начальный дебит рассверленного до 6мм отверстия оказался не только меньше начального дебита (180мм<sup>3</sup>/с) исходного отверстия (3мм), но и меньше дебита (110мм<sup>3</sup>/с) через 1 час после начала гидрообработки (62мм<sup>3</sup>/с).

Причина не адекватной реакции образца на рассверливание отверстия все та же – падение дебита с течением времени. Ведь рассверливание отверстия (рис.2-б) произошло через 3 часа после начала гидрообработки, а за это время проницаемость образца упала больше, чем в 4 раза – со 180 до 40мм<sup>3</sup>/с. Об этом можно судить по экстраполяции линии тренда измеренных дебитов при давлении 0,1МПа. Экспериментальной точки нет – дебит перед рассверливанием отверстия определялся при давлении 0,2, а не 0,1МПа.

Экстраполяции линии трендов показаны на рис.2 пунктирными линиями, а сами тренды – сплошными. Устойчивое снижение дебита со временем – характерная тенденция, наблюдавшаяся во всех проведенных исследованиях, в том числе и тех, результаты которых приводятся дальше по тексту.

Это явление, получившее обобщенное название «скин-эффект», давно известно в подземной гидравлике, гидравлике пористых фильтров и гидрогеологии. Однако, в работах по гидравлике угольных пластов оно практически не упоминается и его роль в процессах их гидрообработки практически не исследуется. Авторам известен один источник – сайт ЗАО «Углеметан Сервис» (г.Кемерово, РФ) – предлагающий натурные исследования проницаемости с учетом скин-фактора во время инъекционного теста скважины.

Одной из составляющих скин-эффекта является кольматация – явление прилипания примесей флюида к частицам коллектора. Ее можно наблюдать в бытовых самотечных фильтрах воды, поступление которой через несколько недель практически прекращается. Но, спад дебита через угольные образцы происходит настолько быстро, что его нельзя объяснить только кольматацией водопроводной воды используемой в экспериментах.

Мы отбирали пробы не прошедшей через образец воды из цилиндра стенда и сравнивали их с прошедшей образец и дренажные каналы штока водой. После фильтрации через образец вода меняла цвет! На рисунке 3 показаны пробы воды в цилиндре, отобранные при каждом извлечении штока с образцом для рассверливания отверстия, и пробы воды, профильтрованной через образец (фильтрата).



Рисунок 3 – Изменение цвета воды после фильтрации через образец

Контраст цвета между фильтрованной и не фильтрованной водой в комментариях не нуждается. Интересно отметить, что с увеличением диаметра отверстия насыщенность фильтрата снижается. Через несколько дней отстоя фильтраты разделились на чистую воду и скоагулированный осадок на дне стаканчиков. Это позволяет сделать вывод о вымывании водой мелких частиц образца – суффозии. Крупность вынесенных водой частиц, судя по цвету фильтрата, характерному для спектра частиц угля микронных размеров и длительности их осаждения не превышают 50мкм.

Суффозия угольных образцов хорошо объясняет интенсивность кольматации – объем мелких твердых частиц, вымытых из угля, на порядки превышает их содержание в водопроводной воде.

Таким образом, проявление скин-эффекта в образцах угля при фильтрации воды обусловлено одновременным действием разнонаправленных процессов – суффозией, как источником твердой угольной фазы в потоке воды, и кольматацией этой твердой фазы в фильтрационных каналах образца.

Изменение проницаемости с расстоянием от центра образца можно оценить по зависимости дебита от диаметра отверстия при постоянном давлении воды на контуре питания, по данным рис.2-а. На рисунке 4 приведена зависимость дебита от диаметра отверстия в начале и в конце цикла измерения.

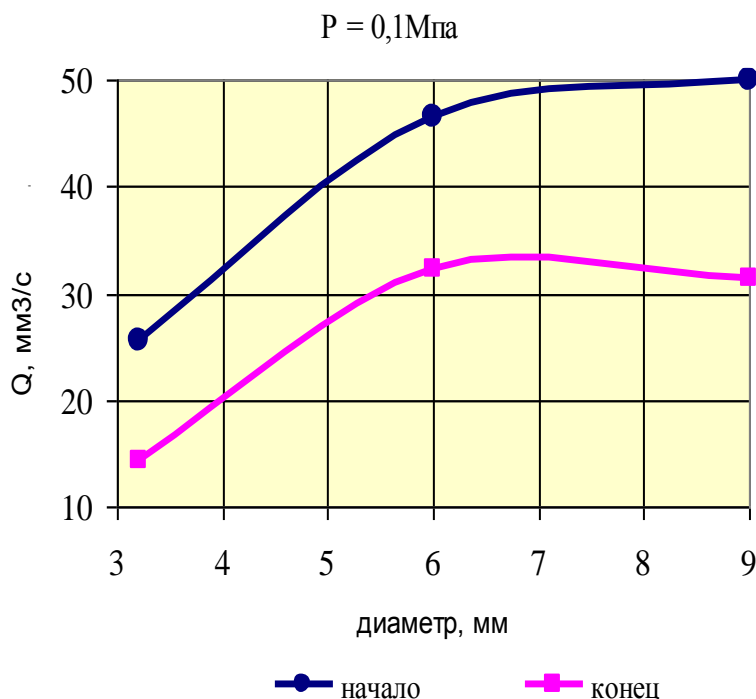


Рисунок 4 – Зависимость дебита от диаметра отверстия

Увеличение диаметра отверстия с 3 до 6мм приводит к интенсивному росту дебита как в начале цикла измерения (сразу после рассверливания), так и в конце (перед следующим рассверливанием). А рассверливание с 6 до 9мм дебит практически не меняет.

Это говорит о том, что кольматированная зона с низкой проницаемостью распространяется, с течением времени, от центра (отверстия) к периферии – внешнему контуру образца. Хотя поток воды имеет обратное направление – от периферии к центру образца. Через 2 часа – к началу измерений дебит через отверстие 9мм – диаметр зоны пониженной проницаемости в центре образца достигает размеров 12 – 15мм.

Выше мы проанализировали зависимость дебита воды через образец при постоянном давлении воды на его контуре питания – в цилиндре стенда. На рисунке 5 представлены

подобные зависимости при различных давлениях воды на контуре питания образца. Давление прессы отсутствовало.

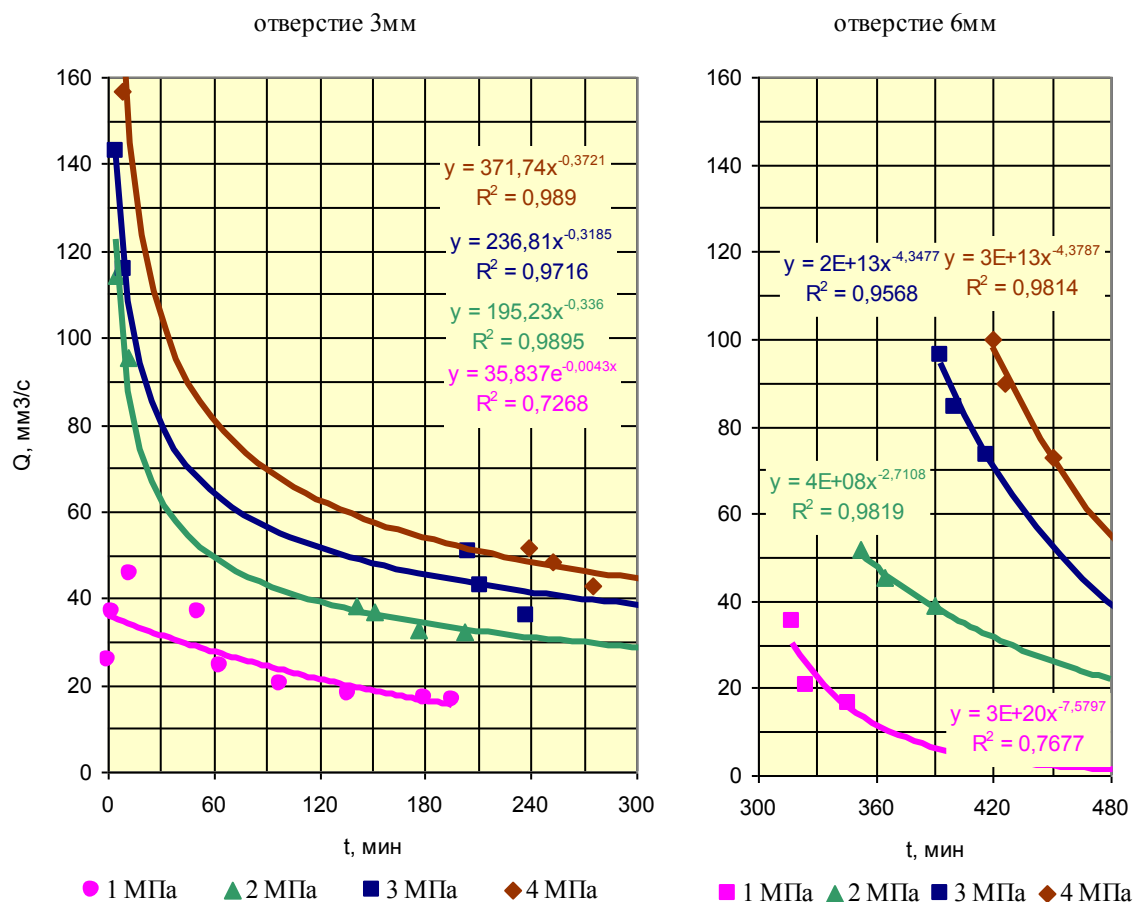
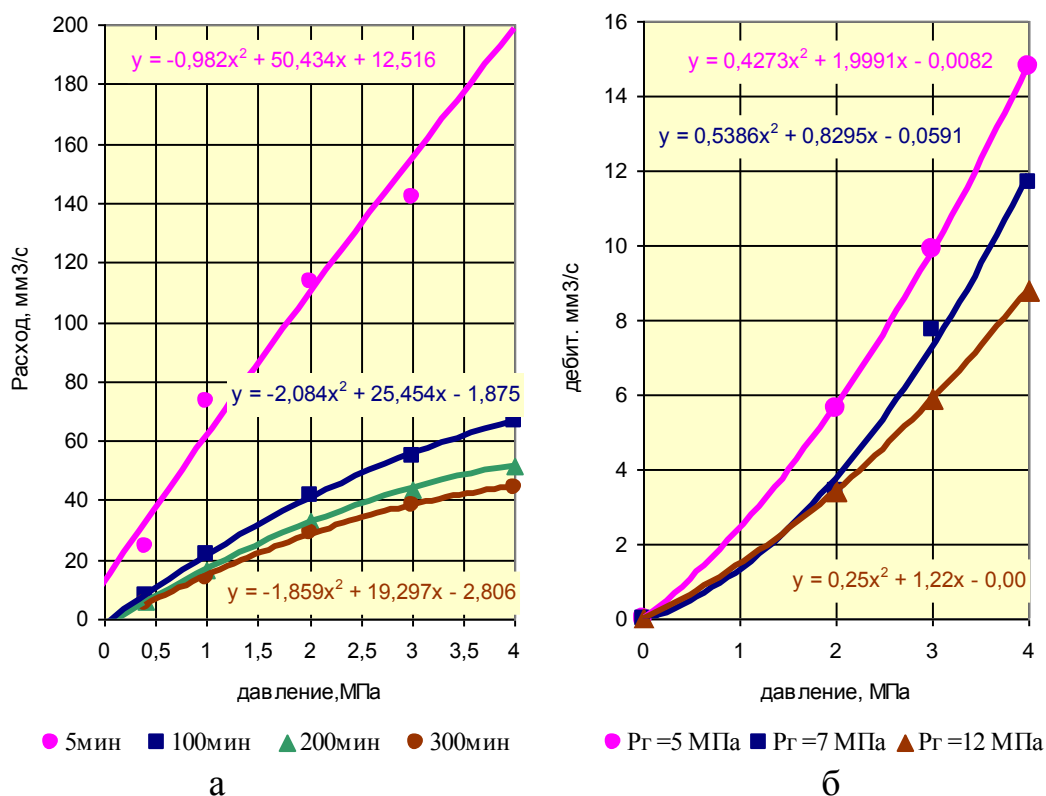


Рисунок 5 – Зависимость дебита от времени при разных давлениях воды на контуре питания образца

Несмотря на 40-кратное увеличение давления воды характер спада дебитов с течением времени не изменился. Его можно статистически описать как степенными, так и экспоненциальными убывающими зависимостями. Оба вида зависимостей аппроксимируют экспериментальные точки с практически одинаковой достоверностью. Это иллюстрируется нижними кривыми диаграмм рисунков 5 и 2-а. Они аппроксимировались экспоненциальными функциями, поскольку степенные не работают с 0 аргументами. А остальные тренды на графиках – степенные. Существенная разница между ними проявляется только при экстраполяции аргумента – времени нагнетания – до примерно вдвое больших значений.

Показатели степени трендов разные как для разных значений давления на контуре питания, так и для разных диаметров отверстия – стока. Возможно, таким образом, проявляется еще один фактор скин-эффекта – концентрация механических напряжений на контуре отверстия (см. эпюру  $\sigma_\theta$  рис.1-б), приводящая к сжатию фильтрационных каналов. Ее влияние на снижение дебита, по данным [6] вполне конкурирует с кольтатацией.

Зависимость дебита от давления воды определялась по данным, представленным на левой диаграмме рисунка 5. На ней экспериментальные точки дебитов при разных давлениях не совпадают по времени. Поэтому, численные значения дебитов для разных давлений, соответствующих одним и тем же моментам времени, определялись по уравнениям трендов. Результаты анализа влияния давления воды на контуре питания на ее дебит через образец представлены на рисунке 6-а.



а) – авторский образец 4x4x3 из ш. Покровская с отверстием 3мм; б) – образец из пл. Безымянный по данным [7].

Рис. 6. Зависимость дебита от давления воды на контуре питания образца

Дебит связан с давлением выпуклой параболической статистической зависимостью с  $R^2 = 0,997 \div 0,999$  для разных значений времени нагнетания. Степень влияния давления воды на ее дебит через образец уменьшается с течением времени его гидрообработки.

Сравним наши кривые (рис.6-а) с кривыми, полученными в работе [6] на установке УИПК-1 для одномерной осевой фильтрации через угольные керны, обжаты радиальным гидравлическим давлением  $P_r$  (рис.6-б).

Статистическая зависимость дебита от давления воды при одномерной фильтрации тоже параболическая с  $R^2 = 0,995 \div 1,000$  для разных значений давления радиального давления  $P_r$ . Но она не выпуклая, а вогнутая!

Это различие обусловлено разными полями механических напряжений в скелете образца, возникающих от давления воды.

При одномерной фильтрации в установке УИПК давление воды на торцевую поверхность керна порождает в нем сжимающие напряжения в направлении потока – по оси керна. Эти напряжения мало влияют на сжатие фильтрационных каналов радиальным давлением  $P_r$ , хотя, по эффекту Пуассона, стремятся их расширить.

А при двумерной фильтрации на нашем стенде кроме параллельных радиальному потоку сжимающих напряжений  $\sigma_r$ , возникают перпендикулярные потоку напряжения  $\sigma_\theta$ , тоже сжимающие. Они сжимают фильтрационные каналы в окрестности отверстия, уменьшая его дебит.

Поскольку сжатие каналов напряжениями  $\sigma_\theta$  при двумерной фильтрации пропорционально росту давления, выпуклость кривой дебитов меняется.

Таким образом, при переходе от одномерной фильтрации воды к двумерной проявляется эффект деформации фильтрационных каналов под действием давления воды на внешний контур образца. В экспериментах он выражается изменением выпуклости зависимостей дебита от давления воды на внешнем контуре образца.

Зависимость дебита от давления пресса определялась для диаметра отверстия в образце, равного 6мм. Шток цилиндра с образцом под давлением воды дополнительно нагружался прессом. Это позволило получить набор значений дебита воды через образец при разных значениях соотношения горизонтальных и вертикальной компонент давления на его скелет.

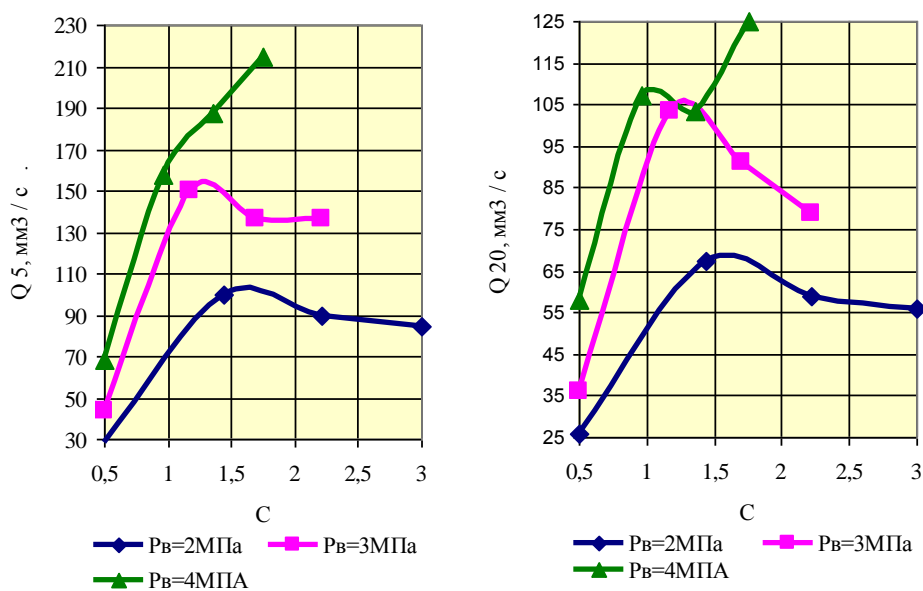
При этом на скелет внешнего контура образца действовали две одинаковые горизонтальные компоненты напряжений, равные давлению воды в цилиндре. А 3-я, не равная им, вертикальная компонента, параллельная оси отверстия создавалась усилием пресса (1).

С учетом уже проанализированных особенностей скин-эффекта мы в дальнейшем будем пользоваться отношением вертикальной и горизонтальной компоненты  $C$  на контуре отверстия который всегда находится в плоском напряженном состоянии – радиальное напряжение  $\sigma_R$  – всегда равна 0.

В этом случае горизонтальная компонента – перпендикулярные потоку напряжения  $\sigma_\theta$  – равна удвоенному давлению воды в цилиндре (2), а вертикальная компонента  $\sigma_z$  определялась по показаниям усилия пресса за вычетом усилия от давления воды в цилиндре на шток. Отношение вертикальных напряжений к горизонтальным, перпендикулярным потоку, напряжениям  $C = \sigma_z / \sigma_\theta$

При отсутствии усилий от пресса  $C = 0,5$ . Значения дебитов при отсутствии усилий пресса определялись по трендам правой диаграммы рис.5.

Зависимость дебитов  $Q$  от соотношения вертикальной и горизонтальной компонент напряжений  $C$  оказалась возрастающей (см. рис. 7).



а) – дебит через 5 минут после начала цикла нагружения;  
 б) – дебит через 25 мин после начала цикла нагружения

Рис. 7. Зависимость дебитов  $Q$  от соотношения вертикальной и горизонтальной компонент напряжений  $C$  при разном давлении воды  $P_v$  на контуре питания образца

Максимум дебитов при давлении воды в цилиндре 2 – 3 МПа находится в зоне значений  $C = 1,2 \div 1,4$  которой соответствуют вертикальные давления от пресса  $5,75 \div 7,06$  МПа. При



давлении воды в цилиндре 4МПа дебит монотонно возрастает до значений вертикального давления от пресса 14МПа. Более высокие давления прессом не создавались из-за опасений разрушения образца.

При испытаниях было проведено 11 циклов измерений дебита при разных отношениях вертикальных и горизонтальных напряжений  $C$ . Оказалось, что значения  $C$  в этих циклах по несколько раз повторялись, а соответствующие им дебиты изменялись в зависимости от номера цикла (рис. 8).

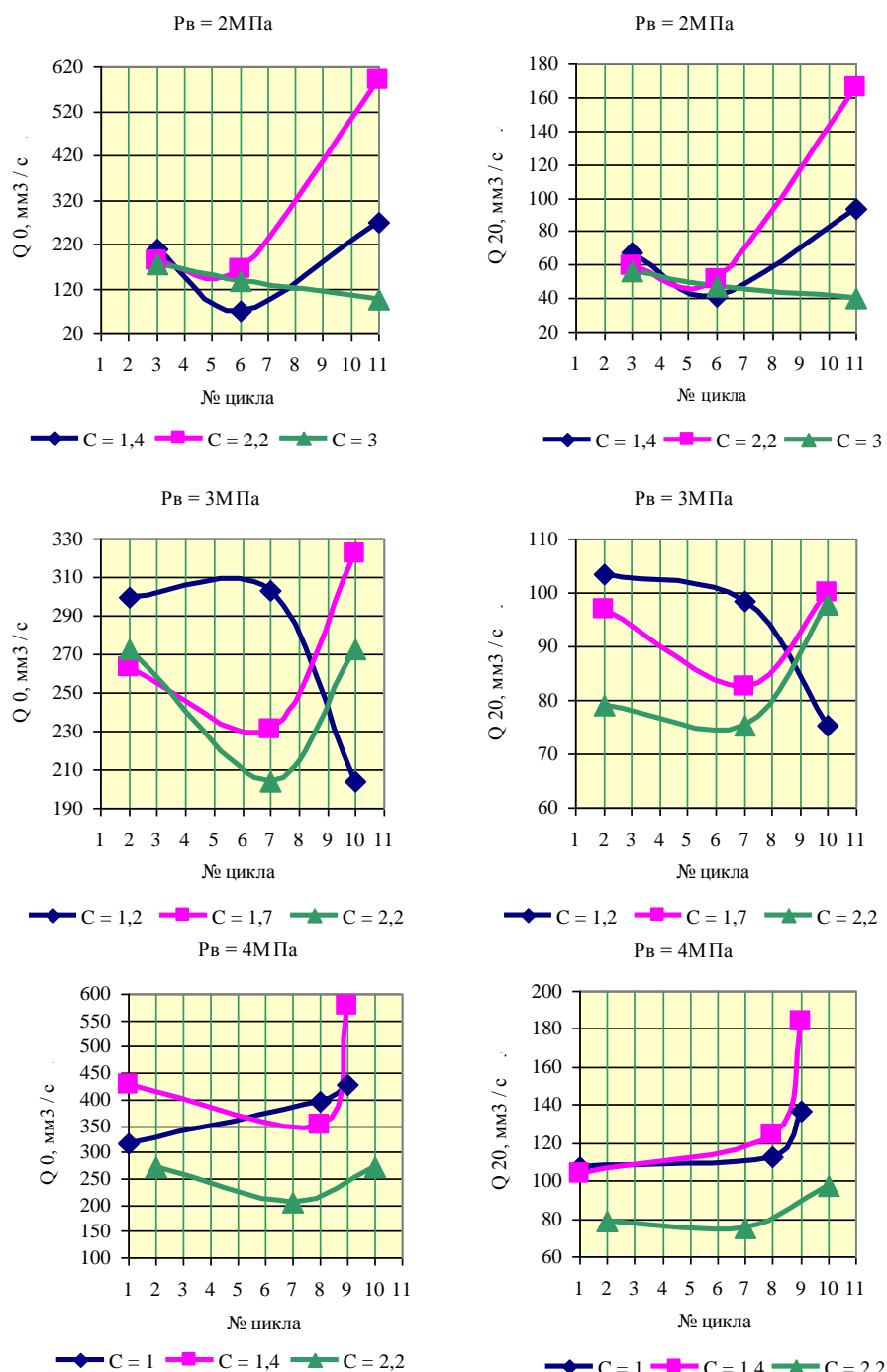


Рис. 8. Зависимость дебита  $Q$  от № цикла нагружения при одинаковом отношении  $C$  вертикальных напряжений к горизонтальным

Оказалось, что для каждого значения давления воды  $P_v$  в цилиндре – на контуре питания и для каждого значения параметра  $C$  – отношения вертикальной компоненты напряжений к

горизонтальной существует определенное количество циклов после которых дебит или уменьшается до минимума, или возрастает до максимума.

Так, для давления воды в цилиндре 2МПа минимум дебита наблюдается на 6-м цикле при  $C = 1,4$ ; 2,2 и на 11 цикле при  $C = 3$ . Максимум дебита соответствует 11-му циклу при  $C = 1,4$ ; 2,2 и 3-му циклу при  $C = 3$ .

Для давления воды в цилиндре 3МПа минимум дебита наблюдается на 7-м цикле при  $C = 1,7$ ; 2,2 и на 10 цикле при  $C = 3$ . Максимум дебита соответствует 10-му циклу при  $C = 1,7$ ; 2,2 и 7-му циклу при  $C = 3$ . Дебит при  $C = 3$  изменяется в противофазе дебитам при  $C = 1,7$ ; 2,2.

Для давления воды в цилиндре 4МПа минимум дебита наблюдается на 1-м цикле при  $C = 1$ , на 8-м цикле при  $C = 1,4$  и на 9 цикле при  $C = 2,2$ . Максимум дебита соответствует 9-му циклу при  $C = 1$ ; 1,4 и 10-му циклу при  $C = 2,2$ .

Это позволяет говорить об эффекте тренировки фильтрационных каналов образца за счет повторяющегося изменения внешних нагрузок его скелета.

Возможно, повторяющееся изменение внешних нагрузок влияет на процесс кольматации фильтрационных каналов, хотя и не прекращает ее. О продолжении процесса кольматации свидетельствует сравнение значений дебитов на рис.7-а (Q5) и 7-б (Q20), а также дебитов левых колонок рисунка 8 (Q0) с правыми (Q20), измеренными в моменты времени 0; 5 и 20 минут.

## Выводы

1. Разработка методики и создание стенда для исследования двумерной фильтрации воды через угольные образцы позволили продемонстрировать скин-эффект, известный по работам в нефтяной промышленности, но не освещенный в публикациях по гидрообработке угольных пластов.

2. В дополнение к известным составляющим скин-эффекта – суффозии, кольматации и деформации фильтрационных каналов обнаружен эффект их тренировки повторяющейся комбинацией внешних нагрузок на скелет образца.

3. Получена экспериментальная возрастающая зависимость дебита от соотношения вертикальной и горизонтальной компонент плоского напряженного состояния скелета образца на контуре отверстия.

4. Получена экспериментальная зависимость дебита воды при ее двумерной фильтрации через грани кубического образца к центральному отверстию от его диаметра. Установлено, что рост зоны кольматации с пониженной проницаемостью происходит в обратном потоку направлении – от центра к периферии образца. Для полного представления скин-эффекте целесообразно провести эксперименты по двумерной фильтрации с направлением потока от центра образца к его периферии.

## Список литературы

1. Минеев С.П. Повышение эффективности гидрорыхления выбросоопасных угольных пластов / С.П. Минеев, А.А. Потапенко, Т.Я. Мхатвари, А.В. Никифоров, С.В. Кузюра, Э.И. Тимофеев . – Донецк: Східний видавничий дім, 2013. – 216 с.

2. Усов О.А. Оценка соответствия линейного закона фильтрации воды реальной динамике изменения ее давления при нагнетании в угольные пласты / О.А. Усов // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр./ ИГТМ НАН Украины. - Днепропетровск, 2015. – Вып. 120. – С. 93-101.

3. Пат. № 2276780, RU МПК8 G 01 N 15/08. Способ определения коэффициента фильтрации горных пород / Сюзов О. Б., Головенко Е. А. и др.; заявитель и патентовладелец ООО "Уренгойгазпром". – 6 с.

4. Пат. № 108627 Україна МПК Е 21 F 5/00 Стенд визначення рідинних та фільтраційних характеристик зразків гірських порід / О.О.Усов, М.Я. Трохімець, О.С. Мінеєв та ін. - 3-ка u201600642, від 27.01.16 – 6 с.

5. Феодосьев, В.И. Соппротивление материалов / В.И. Феодосьев. – М.: Наука, 1979.– 560 с.

6. Боганик В. Н. Расчет скин-эффекта сжатия и кольматации по реальным данным эксплуатации // Экспозиция нефть газ, 2011. - №5. – С. 33-34.

7. Чернов О.И., Розанцев Е.С. Подготовка шахтных полей с газовыбросоопасными пластами. - М.: Недрa, 1975. - 287 с.