

УДК 622.324

А.Б. Бокий¹, С.Г. Ирисов², В.В. Чередников²

ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕБИТА ПОВЕРХНОСТНЫХ ДЕГАЗАЦИОННЫХ СКВАЖИН

¹ООО «Бьюсайрус Украина»

²ПАО «Шахта им. А.Ф. Засядько»

Основным источником метана для поверхностных дегазационных скважин является угольный пласт.

Повышение цен мирового рынка на энергоносители требует поиска новых источников углеводородных газов. Одним из таких источников является угленосный массив, в пределах которого ведется отработка угольных пластов. Для безопасности работ этот массив необходимо дегазировать с помощью скважин, пробуренных из горных выработок и с поверхности [1]. Для утилизации метана наибольший интерес представляют поверхностные дегазационные скважины (ПДС), так как концентрация метана в капируемой смеси составляет 92–95%. Наиболее успешной была утилизация метана в шахтном поле ПАО «Шахта им. А.Ф. Засядько» двумя ПДС, МТ-264 и МТ-284, которыми каптировано более 8 млн. м³ метано-воздушной смеси.

Однако по неизвестным причинам некоторые скважины дают малый дебит газа, а некоторые – не дают вообще. Это свидетельствует о недостаточной изученности процесса дегазации при помощи ПДС. При этом очень важна идентификация коллектора газа, хотя большинство исследователей считают, что основным коллектором являются слои песчаника. Подсчитаны запасы метана, содержащегося в песчаниках, залегающих в различных угольных бассейнах планеты [2, 3]. Результаты этих подсчетов не вызывают сомнений, однако извлечение метана из песчаников является очень сложной задачей. Кроме того, из числа возможных коллекторов нельзя исключать угольные пласты. Об этом свидетельствует тот факт, что в условиях некоторых шахт ПДС каптируют газа тем больше, чем ближе расположен их забой к плоскости разрабатываемого пласта.

В связи с этим актуальной проблемой является идентификация газового коллектора. Возникает необходимость решения следующих задач:

- 1) установление характерных особенностей кинетики каптажа;
- 2) установление физики притока газа к скважине;
- 3) сопоставление кривых восстановления давления на устье скважин с кривыми нарастания во времени давления газа, десорбирующегося в лабораторных условиях из угольных и породных сорбентов.

Дебит скважин измерялся скоростиметром LUGA, расходомерами РГ-40, РГ-100, диафрагмами с калиброванными шайбами и другими способами. При снятии кривой восстановления давления (КВД) использовались образцовые манометры. Иногда дебит ПДС начинался еще до момента подработки скважины лавой. В этих случаях он составлял не более 0,1–0,2 м³/мин. Чаще всего до момента подработки ПДС дебит отсутствовал, а уровень воды в скважине поднимался до 300 м и выше. После подработки ПДС уровень воды резко понижался, а некоторые скважины полностью осушивались. Тогда они засасывали воздух с поверхности, вероятно, за счет депрессии вентиляционной сети. В таких редких случаях проводились мероприятия по снижению проницаемости прискважинной зоны. Однако зачастую в этом не возникало необходимости и после подработки ПДС воду «выбрасывало» вместе с газом, что обуславливало установку водоотделителей [1]. Далее, по мере удаления лавы, интенсивность дебита убывала во времени, подчиняясь разным закономерностям. Чаще всего проявлялся логнормальный закон распределения дебита газа q по времени t относительно момента подработки скважины или по расстоянию L между линией забоя лавы и проекцией забоя ПДС на плоскость отрабатываемого пласта.

Выявление особенностей кинетики дебита ПДС может способствовать установлению ее эффективных (с точки зрения объема каптажа) параметров: длины зоны перфорации (длины приемной части скважины); расстояния от забоя ПДС до пласта при заданной глубине его залегания. Для идентификации источника газа может быть использована газодинамика притока в период

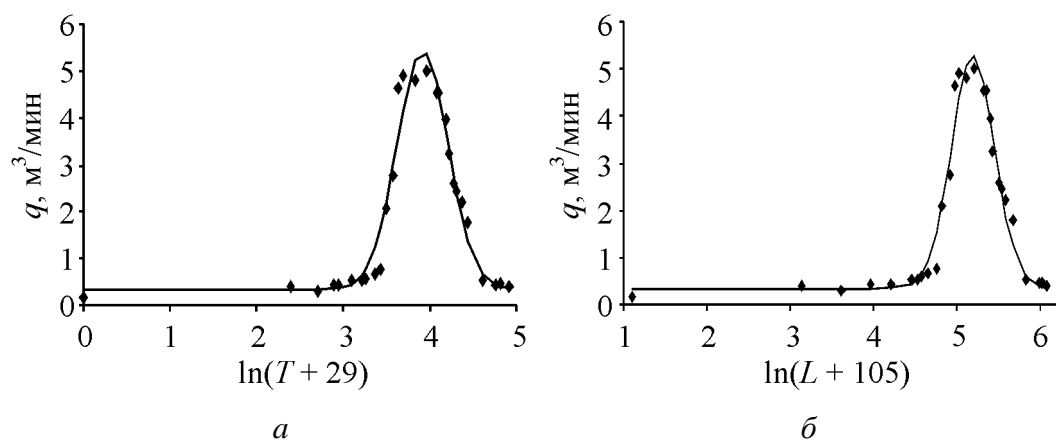


Рис. 1. Графики распределения дебита скважины МТ-343: а – по времени T ; б – по расстоянию L

перед подработкой скважины и после завершения активной фазы ее эксплуатации. Во втором случае очистные работы были уже завершены, дебит почти прекращен и предприняты меры по его восстановлению. Очевидно, что в первом случае источник газа находился близко к забою ПДС, а во втором – был отдален на сотни метров. В первом случае зависимость притока от восстанавливаемого давления описывалась экспонентой вида:

$$q = A_0 \exp(-\beta P), \quad (1)$$

где q – приток газа к закрытой скважине, определяемый по ее свободному объему и темпу нарастания давления газа, м³/мин; A_0 и β – эмпирические коэффициенты; P – среднее по глубине давление в закрытой скважине, 10⁵ Па.

Как показали исследования интегральной десорбметрии [4], ее динамику можно описать уравнением (1), в котором показатель β является функцией давления газа P_0 перед опытом и отношения U свободного объема прибора V_c к массе пробы угля m_y . Коэффициент A_0 зависит от множества факторов и характер этой зависимости еще не установлен. Поэтому в использовании результатов лабораторных исследований десорбметрии при анализе КВД применить можно только показатель β .

По данным лабораторных опытов с углями, показатель β снижается с уменьшением U и при $U = 2-5,5$ м³/т и $P_0 = (13-40) \cdot 10^5$ Па составляет $\beta = 3-16$. При меньших U значение β можно рассчитать по экспериментальной формуле, полученной в результате анализа лабораторных опытов по интегральной десорбметрии на углях:

$$\beta = 0,0058 \cdot P_0^2 - (0,13 \cdot U - 0,01) \cdot P_0 + 6 \cdot U - 2,8. \quad (2)$$

По результатам снятия КВД на ПДС № МС-598 можно утверждать, что P_0 не превысит $14 \cdot 10^5$ Па. Согласно (2) при $\beta = 0,71$ и $P_0 = 14 \cdot 10^5$ Па рассчитано значение $U = 0,533$, по которому при известном значении свободного объема $V_c = 9$ м³ рассчитана масса угля m_y , определяющая КВД. Приблизительно (если допустить, что процесс десорбции в лабораторных условиях во многом аналогичен процессу десорбции в околоскважинной зоне) она составила $m_y \sim 17$ т.

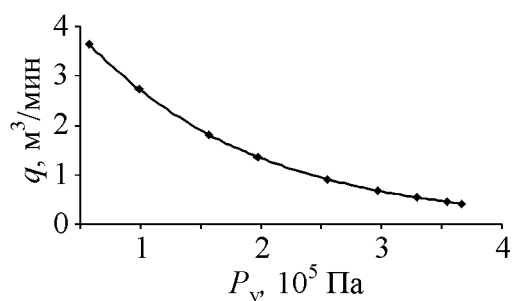


Рис. 2. График зависимости притока q от давления газа P_y в скважине МС – 598 с перекрытым устьем ($\beta = 0,71$)

До подработки ПДС характер влияния P на q представлен на рис. 2. Однако при интегральной десорбметрии с образцами песчаника $\beta = 190-450$, что значительно выше, чем при опытах с углем и при снятии КВД на скважинах. Этот факт снижает роль песчаника в процессе восстановления давления газа в рассматриваемых ПДС.

Благодаря качественному и количественному сходству зависимостей

q от P_y , полученных на углях в лаборатории и на скважине № МС-598, угольный пласт можно считать основным источником дебита рассматриваемой ПДС.

Есть основания предполагать, что в поле ПАО «Шахта им. А.Ф. Засядько» перед подработкой других исследованных ПДС ордината КВД не превысит $(12-14) \cdot 10^5$ Па, хотя по данным исследований, проведенных на скважине ЗГ-1, пластовое давление на глубине 1200–1300 м составляет более 12–13 МПа.

Разница в значениях давления может быть вызвана тем, что на десятках метров впереди лавы образуется система круто наклонных трещин, связанных с вентиляционными выработками и с ПДС. В связи с незначительным зиянием этих трещин даже небольшой поток газа по ним вызывает заметное падение давления, которое в трещинах, примыкающих к ПДС, не превышает 12 – 14 атм. Это значение можно считать давлением P_n на контуре питания скважины. Тогда перепад давлений, определяющий интенсивность притока газа к скважине, составит разность

$$\Delta P = P_n - P, \quad (3)$$

где P – давление газа в скважине на глубине приема притока, определяемое по устьевому давлению P_y с учетом веса столба газовой смеси в скважине, 10^5 Па.

Если допустить, что радиус контура питания R_n в процессе снятия КВД практически не изменяется, то по зависимости q от ΔP можно судить о физике определяющего потока. На рис. 3 представлен график зависимости q от P и ΔP при $P_n = 1,23$ МПа для КВД на ПДС № МТ-340. По этим данным невозможно получить линейную зависимость $\Delta P/q$ от q , но можно предположить, что в достаточно широком интервале q существует линейная зависимость от ΔP . В рудничной аэрологии и при расчете параметров транспортировки природного газа широко применяется способ оценки физики потока по результатам анализа графиков в координатах $q - \Delta P/q$. При наличии линейной связи $\Delta P/q$ с q предполагается действие двучленного закона потерь

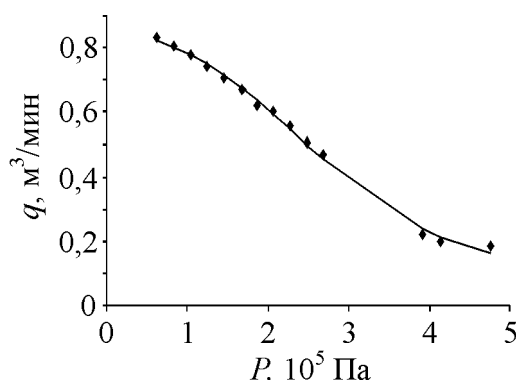


Рис. 3. График, характеризующий взаимосвязь величин P и q для КВД на скважине МТ-340

давления, и по значению эмпирических коэффициентов, характеризующих уравнение данного графика, делается вывод о преобладании или турбулентной, или ламинарной составляющих потерь давления. Линейная зависимость q от ΔP характерна для диффузии газа.

Анализ зависимости q от P , представленной на рис. 3, позволяет сделать следующие выводы: зависимость q от P в условиях ПДС № МТ-340 имеет сходство с аналогичной за-

висимостью при интегральной десорбметрии на углях; для описания экспериментальной зависимости q от P в условиях МТ-340 наиболее подходит формула гиперболического тангенса; начальный (при $P = 0$) приток газа в ПДС составляет $0,87 \text{ м}^3/\text{мин}$; невозможно указать значение P , при котором может прекратиться приток газа в скважину, составляющий даже при значительных величинах P не менее $0,108 \text{ м}^3/\text{мин}$.

Отсутствие признаков вязкого течения, а также схожесть процесса при снятии КВД на ПДС № МС-598 и МТ-340 и процесса десорбции газа углем в замкнутом объеме приводят к выводу: основным источником газа для не подработанных ПДС является угольный пласт, а не песчаник. Правильность этого вывода подтверждается следующими фактами: песчаник поглощает воду и его газопроницаемость возле скважины снижена, а трещины в блоках песчаника еще не раскрыты, так как скважина не подработана; угольный пласт гидрофобный и после удаления из скважины воды способен отдавать метан, как показала практика на шахте им. А.А. Скочинского. Поэтому дебит газа $0,87 \text{ м}^3/\text{мин}$ могут обеспечивать как вскрытые угольные нерабочие пласты суммарной мощностью $0,6\text{--}0,8 \text{ м}$, так и разрабатываемый угольный пласт большей мощности, связанный с ПДС трещинами.

На скважине МТ-335 сняты две КВД через длительное время после остановки очистных работ и прекращения дебита. Затем было проведено несколько циклов «промывки» и «продувки» прискважинной зоны с последующим снятием КВД. Результат снятия первой КВД представлен на рис. 4, который показывает, что интенсивность притока подчиняется двучленному закону потерь, свойственному вязкому течению.

При высоком значении коэффициента корреляции, $\eta^2 = 0,9824$, экспериментальные точки на рис. 4 аппроксимирует формула:

$$\Delta P/q = 29790q + 0,81. \quad (4)$$

Можно считать, что (4) описывает плоскорадиальный, преимущественно турбулентный поток газа практически постоянной плотности. Данный вывод

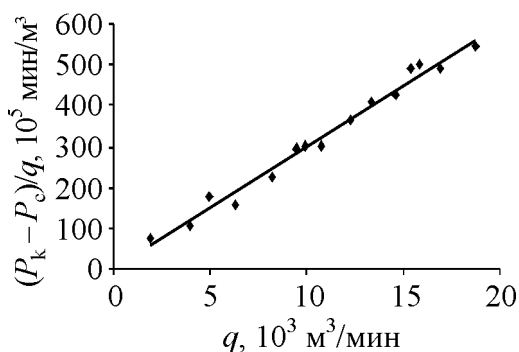


Рис. 4. График, характеризующий динамику притока газа к скважине МТ-335 после проведения мероприятий по «оживлению» дебита газа

следует из факта: $29790q \gg 0,81$, т.е. значение ΔP практически определяется только величиной q^2 . Такой тип потока был идентифицирован ранее при гидрорасчленении пласта h_6^1 шахты им. А.А. Скочинского. При расчетном зиянии горизонтальной трещины $0,38 \text{ мм}$ это течение имело признаки ламинарного, а при зиянии $0,44 \text{ мм}$ – турбулентного течения [5].

Известно, что в подработанном массиве параллельные напластованию трещины возникают и без гид-

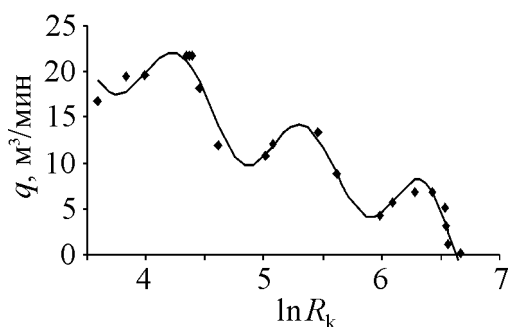


Рис. 5. График зависимости дебита q скважины МТ-264 от расстояния R_k между забоем скважины и линией 12 восточной лавы пласта m_3

ки [6], что указывает на аэродинамическую связь ПДС с выработками. Контур питания скважины газом – вертикальные трещины – удаляется от ПДС после ее подработки, а аэродинамическое сопротивление горизонтальных трещин, подводящих газ к ПДС, возрастает. При этом поток газа к скважине не является плоско-радиальным. Об этом свидетельствует зависимость дебита q скважины МТ- 264 от расстояния R_k между ее забоем и линией 12 восточной лавы пласта m_3 (рис. 5).

Данный график дает наиболее полное представление об изменении дебита скважины по мере удаления от нее очистных работ, так как охватывает весь период ее эксплуатации. Согласно графику дебит скважины быстро нарастает после ее подработки по мере увеличения R_k и, достигнув максимума, линейно убывает относительно $\ln R_k$. Однако при плоско-радиальном потоке, как известно, значение q при увеличении $\ln R_k$ должно убывать по гиперболе.

Кроме того, величина q содержит помимо линейной относительно $\ln R_k$ еще и некоторую периодическую составляющую, учет которой позволяет очень точно аппроксимировать экспериментальные значения q ($\eta \geq 0,98$). Можно предполагать, что периодическая составляющая q связана с периодичностью интенсивности сейсмоакустической эмиссии.

Характер распределения q по R_k свидетельствует о том, что поток газа к ПДС № МТ–264 в основном являлся плоско- параллельным. Он обеспечивает дебит скважины при $R_k \leq 700$ м на уровне $q > 2,5 - 3 \text{ м}^3/\text{мин}$, который можно считать приемлемым с точки зрения утилизации. Однако достаточно интенсивный дебит ПДС при $R_k \leq 700$ м возможен только при высоких значениях начального дебита $q_{\max} \geq 20 \text{ м}^3/\text{мин}$. При меньших значениях q_{\max} приемлемый для утилизации газа дебит ограничивается условием $R_k \leq 100-300$ м [1].

Точная аппроксимация экспериментальных единичных (не «сглаженных») значений q простой гармонической функцией отражает плавное изме-

рорасчленения. Эти условно горизонтальные трещины могут «получать» метан от круто наклонных (условно вертикальных) трещин, секущих углелепородный массив впереди забоя параллельно линии лавы. Вероятно, для ПДС и для вентиляционных выработок в горизонтальных трещинах располагается контур питания на пересечении с вертикальными трещинами впереди забоя лавы. Перекрытие устьев ПДС приводит к увеличению расхода газа через эти выработ-

нение q при увеличении R_k и свидетельствует о плавности и непрерывности процессов, обуславливающих эмиссию газа. Такая закономерность объясняется скорее непрерывной очистной выемкой, чем периодическим блочным обрушением слоев песчаника. Поэтому можно предполагать, что для ПДС № МТ-264 основным источником газа являлся угольный пласт, а не песчаник. Не исключено, что стимулирование газоотдачи песчаника является сложной задачей. Это подтверждается отсутствием дебита метана после гидрорасчленения песчаника $h_5Sh_6^1$ в условиях шахты им. А.А. Скочинского, где с поверхности была пробурена скважина с горизонтальным окончанием ее ствола.

Таким образом, в определенных условиях дебит ПДС может быть обусловлен газоотдачей не только песчаника, но и угольного пласта. Приток газа в неподработанную ПДС не является вязким течением, и, вероятно, определяется диффузией. Приток газа к ПДС во время очистных работ является плоско-параллельным потоком в породах кровли со стороны лавы. Расстояние между ПДС должно приниматься в зависимости от начального дебита и при начальном дебите более 20–30 м³/мин может достигать 700 м. Таким же должно быть расстояние между ПДС и границей выемочного поля по простиранию. После завершения очистных работ приток газа к ПДС с перекрытым устьем (при восстановлении давления газа в скважине) является преимущественно турбулентным плоскорадиальным течением.

1. *Звягельский Е.Л.* Перспективы развития дегазации шахт Донбасса [Текст] / Е.Л. Звягельский, Б.В. Бокий, О.И. Касимов // Уголь Украины, 2003. – №112. – С. 35–39.
2. *Камышан В.В.* Метан угольных месторождений Украины – альтернатива природному газу [Текст] / В.В. Камышан, В.В. Конарев // Видобуток та використання газу-метану: залучення інвестицій, 2009. – № 3. – С. 133–135.
3. *Зыбинский П.В.* Предварительные результаты выполнения пилотного проекта опытно-промышленной добычи метана из угленосного массива [Текст] / П.В. Зыбинский, В.В. Конарев, В.В. Камышан // Видобуток та використання газу-метану: залучення інвестицій, 2009. – № 3. – С. 125–132.
4. *Бокий Б.В.* Совершенствование интегрального десорбметрического прогноза выбросоопасности и область его применения [Текст] / Б.В. Бокий, С.Г. Ирисов, Е.В. Шкурат // Физико-технические проблемы горного производства: сб. науч. тр. / НАН Украины, Институт физики горных процессов. – 2010. – вып. 13. – С. 109–116.
5. *Ирисов С.Г.* Результаты исследования потока воды при гидрорасчленении пологого выбросоопасного пласта [Текст] / С.Г. Ирисов // Сб. РМПИ. – Киев, 1991. – № 89, С. 44–48.
6. *Бокий Б.В.* Влияние параметров и способов дегазации на газообильность выработок [Текст] / Б.В. Бокий, С.Г. Ирисов, И.В. Поляков // Уголь Украины. – 2003. – № 11. – С.48–50.

А.Б. Бокій, С.Г. Ірисов, В.В. Чередніков

**ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕБІТУ ПОВЕРХНЕВИХ ДЕГАЗАЦІЙНИХ
СВЕРДЛОВИН**

Основним джерелом метану для поверхневих дегазацийних свердловин є вугільний пласт.

A.B. Boky, S.G. Irisov, V.V. Tsherednikov

RESEARCH OF DEBIT OF DAY SURFACE DEGASSING HOLE.

Basic source of methane for surface degassing hole is coal seam.