

DOI: 10.25558/VOSTNII.2023.99.21.005

УДК 622.453, 622.02

© О. В. Тайлаков, М. П. Макеев, Е. А. Уткаев, Д. А. Марцияш, 2023

**О. В. ТАЙЛАКОВ**

д-р техн. наук, проф.,  
генеральный директор  
АО «НЦ ВостНИИ», г. Кемерово  
главный научный сотрудник,  
ИУ ФИЦ УУХ СО РАН, г. Кемерово  
e-mail: oleg2579@gmail.com

**М. П. МАКЕЕВ**

канд. техн. наук,  
старший научный сотрудник  
ИУ ФИЦ УУХ СО РАН, г. Кемерово  
e-mail: m\_makeev@uglemetan.ru

**Е. А. УТКАЕВ**

канд. техн. наук.,  
старший научный сотрудник  
ИУ ФИЦ УУХ СО РАН, г. Кемерово  
e-mail: utkaev@mail.ru

**Д. А. МАРЦИЯШ**

аспирант  
КузГТУ, г. Кемерово  
e-mail: martsiaash@uglemetan.ru

## ИЗУЧЕНИЕ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ СВОЙСТВ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА НА ОСНОВЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

*Рассмотрено применения заблаговременной дегазации угольных пластов для обеспечения безопасного ведения горных работ на угольных шахтах. Обоснована возможность совместного применения слаг-тестов и численного моделирования процесса фильтрации флюида в угольном пласте для определения его проницаемости. Представлен порядок выполнения гидродинамических исследований в вертикальных скважинах, пробуренных в угольный пласт с поверхности. Приводятся результаты анализа данных слаг-тестов, выполненных в условиях Ленинского геолого-экономического района Кузбасса. Дано описание численной модели фильтрации флюида в угольный пласт. Показана удовлетворительная сходимость результатов численного моделирования и натурных наблюдений.*

Ключевые слова: ПРОНИЦАЕМОСТЬ, УГОЛЬНЫЙ ПЛАСТ, МЕТАН, ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ, ФИЛЬТРАЦИЯ, ШАХТА, СКВАЖИНА, МАНОМЕТР.

Заблаговременная дегазация является одним из направлений снижения природной газоносности угольных пластов и обеспечения безопасного ведения горных работ на угольных шахтах. Эффективность применения этой технологии зависит от пластового давления, фильтрационных характеристик угля и состояния прискважинной зоны. Для увеличения газоотдачи неразгруженных от горного давления угольных пластов необходимы дополнительные воздействия с применением гидравлических, химических, термических либо комбинированных способов, повышающих проницаемость пласта и способствующих высвобождению газа [1]. Заметим, что выбор одного из таких методов или их комбинации зависит от условий конкретного месторождения угля и предопределяет необходимость проведения исследований фильтрационных свойств углепородного массива.

Одним из основных подходов к определению проницаемости угольных пластов, характеризующей их фильтрационные свойства, являются гидродинамические испытания, которые подразделяются на полевые и лабораторные. Сущность лабораторных методов заключается в наблюдениях за процессом фильтрации, проводимой с образцами горных пород при их капиллярной пропитке, осушении, насыщении и инфильтрации [2–4]. Полевые методы применяются непосредственно на угольном пласте и в большей степени отражают натурные условия [5–7]. Одним из таких методов является регистрация падения давления флюида после его долива в скважину до достижения гидростатического уровня в слаг-тестах [8, 9]. Для проведения теста (рис. 1) в скважине с обсадной колонной 1 размещается датчик давления 4, подсоединенный к электронно-регистрирующему устройству 5. Затем в скважину из емкости 8 через соединительный шланг 7 и насосно-компрессорные трубы подается жидкость, которая фильтруется через угольный пласт 6, изолированный с помощью пакера 3.

Фильтрационные свойства угольных пластов определяются проницаемостью [4]:

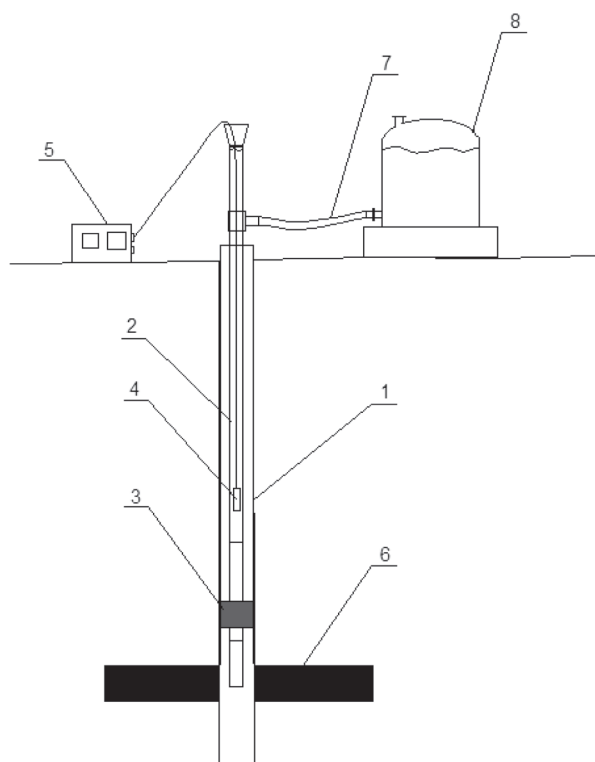
$$K_a = \frac{\left(\frac{t_D}{C_D}\right)_m}{(\Delta t)_m} \frac{603.5 C \mu_w}{h}, \quad (1)$$

где  $\left(\frac{t_D}{C_D}\right)_m$  — безразмерное время;  $(\Delta t)_m$  — время, мин.;  $\mu_w$  — вязкость воды, Па·с;  $h$  —

мощность угольного пласта, м;  $C = \frac{144 \cdot V_u}{\rho_w b}$  — емкостной коэффициент скважины, м<sup>3</sup>/Па;  $V_u$  — объем скважины, отнесенный к длине скважины (площадь сечения), м<sup>3</sup>/м;  $\rho_w$  — усредненная плотность жидкости

в скважине, кг/м<sup>3</sup>;  $C_D = \frac{5.615 \cdot C}{2\pi\phi C_t h r_w^2}$  — безразмерный емкостной коэффициент;  $\phi$  — пористость пород без учета угольного пласта, %;  $C_t$  — общая емкостная характеристика воды, м<sup>3</sup>/Па;  $r_w$  — радиус скважины, м.

Поставлена задача разработки и исследования численной модели фильтрации флюида



1 — обсадная колонна; 2 — насосно-компрессорные трубы; 3 — пакер; 4 — датчик давления; 5 — электронно-регистрирующее устройство; 6 — угольный пласт; 7 — соединительный шланг; 8 — емкость для жидкости

Рис. 1. Схема размещения оборудования в скважине при проведении слаг-теста:

в угольном пласте с верификацией полученных результатов на основе анализа данных натуральных наблюдений при проведении слэг-тестов в условиях Ленинского геолого-экономического района Кузбасса.

Гидродинамические исследование проводилось на двух скважинах, в которые устанавливался датчик давления ниже уровня воды, включалось измерительно-регистрирующее устройство. Затем скважины заполнялись водой с постоянным расходом воды до установленных уровней. После чего регистрировалось время фильтрации жидкости до достижения гидростатического уровня. В табл. 1 приведены параметры выполненных наблюдений. На основе анализа результатов натуральных измерений с использованием (1) установлено, что проницаемость скважин I и II составляет 64 и 55 мД.

Численная модель стационарного процесса фильтрации флюида в свежееобнаженную поверхность угольного пласта построена в среде Comsol Multiphysics на основе закона Дарси:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \nabla \cdot (\rho u) = Q_m \quad (2)$$

где  $u = -\frac{k}{\mu}(\nabla p + \rho g \nabla D)$ ,  $p$  — давление, Па;  $k$  — проницаемость, мД;  $\rho$  — плотность горных пород, м<sup>3</sup>/кг;  $\mu$  — вязкость жидкости, Па·с;  $\nabla D$  — единичный вектор в направлении

действия гравитации;  $g$  — ускорения силы тяжести, м/с<sup>2</sup>.

Граничные условия численной модели заданы в предположении фильтрации флюида в трещиноватой пористой среде вдоль внутренних границ трещин, описываемой уравнениями:

$$d_f \frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_f \rho) + \nabla_T \cdot (\rho q_f) = d_f Q_m, \quad (3)$$

$$n \cdot \rho \frac{k}{\mu}(\nabla p + \rho g \nabla D) = \rho U_0, \quad (4)$$

где  $U_0$  — начальное значение скорости по закону Дарси, м/с,  $n$  — вектор к нормали при заданных условиях,  $q_f$  — объемный расход жидкости в трещине на единицу длины, м<sup>3</sup>/м,  $d_f$  — мощность трещины, м, — оператор градиента, ограниченный касательной плоскостью трещины, — пористость трещин.

В численных экспериментах определялось время фильтрации флюида через угольный пласт до достижения равновесного уровня воды в скважине при допущении, что процесс является изотермическим, а область газового дренирования рассматриваемого участка угольного пласта ограничена сверху малопроницаемой горной породой. В качестве параметров модели использованы данные натуральных наблюдений (табл. 1), а также дополнительные характеристики: диаметр скважины — 0,19 м; глубина залегания угольного пласта от

Таблица 1

Параметры гидродинамических исследований

Параметр	Значение	
	Скважина I	Скважина II
Глубина размещения датчика давления в скважине, м	230	250
Уровень заполнения скважины водой во время теста, м	106,5	127,3
Расход воды, м <sup>3</sup> /час.	30	30
Продолжительность процесса фильтрации, час.	44	24
Мощность угольного пласта $h$ , м	2,4	2,4
Радиус скважины $r_w$ , м	0,19	0,19
Вязкость воды $\mu_w$ , Па·с	1	
Усредненная плотность жидкости в скважине $\rho_{wb}$ , кг/м <sup>3</sup>	1000	1000
Пористость вмещающих горных пород $\phi$ , %	2	2
Общая емкостная характеристика воды $C_t$	0,003	0,003

дневной поверхности  $H = 260$  м; мощность пласта на участке бурения скважины  $h_{\text{пласт}} = 2,4$  м; температура угольного пласта  $t_{\text{пласт}} = 30$  °С;  $V^{\text{daf}} = 34,2$ ;  $A^C = 5,7$ ; Модуль упругости Юнга  $E = 1,5 \cdot 10^4$  МПа; проницаемость угля,  $k = 2$  мД; плотность угля  $\rho = 1210$  кг/м<sup>3</sup>; вязкость воды  $\mu_w = 1$  Па·с. Пористость вмещающих горных пород (без учета угольного пласта) — 2 %.

В численных экспериментах (рис. 2) показано, что давление флюида в скважине увеличивается по направлению вглубь массива, причем зона влияния скважины на фильтрационные свойства угольного пласта составляет 2,8 м. При этом время, в течение которого достигается равновесный уровень воды составляет 86 час., что превышает в 2 раза этот показатель, полученный в натуральных наблюдениях для скважины П. Вероятно, это связано наличием геологического нарушения, обнаруженного в угольном пласте при проведении слаг-теста и влияющего на фильтрационные свойства угольного пласта. В последующих численных экспериментах

параметр  $d_f$ , характеризующий степень трещиноватости горных пород, был увеличен с 0,002 м до 1 м. В этом случае радиус области влияния скважины увеличился до 3,4 м, а время фильтрации составило 43 часа, что согласуется с результатами натуральных наблюдений.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная численная модель фильтрации флюида в угольном пласте может быть эффективно использована для определения фильтрационных свойств угольных пластов с верификацией полученных результатов на основе данных, полученных в натуральных условиях при проведении слаг-тестов. Представляется целесообразным в развитие предложенного подхода построение и изучение моделей фильтрации флюидов в угольных пластах при бурении горизонтальных и направленных скважин пластовой дегазации, а также процессов гидроразрыва и гидрорасчленения.

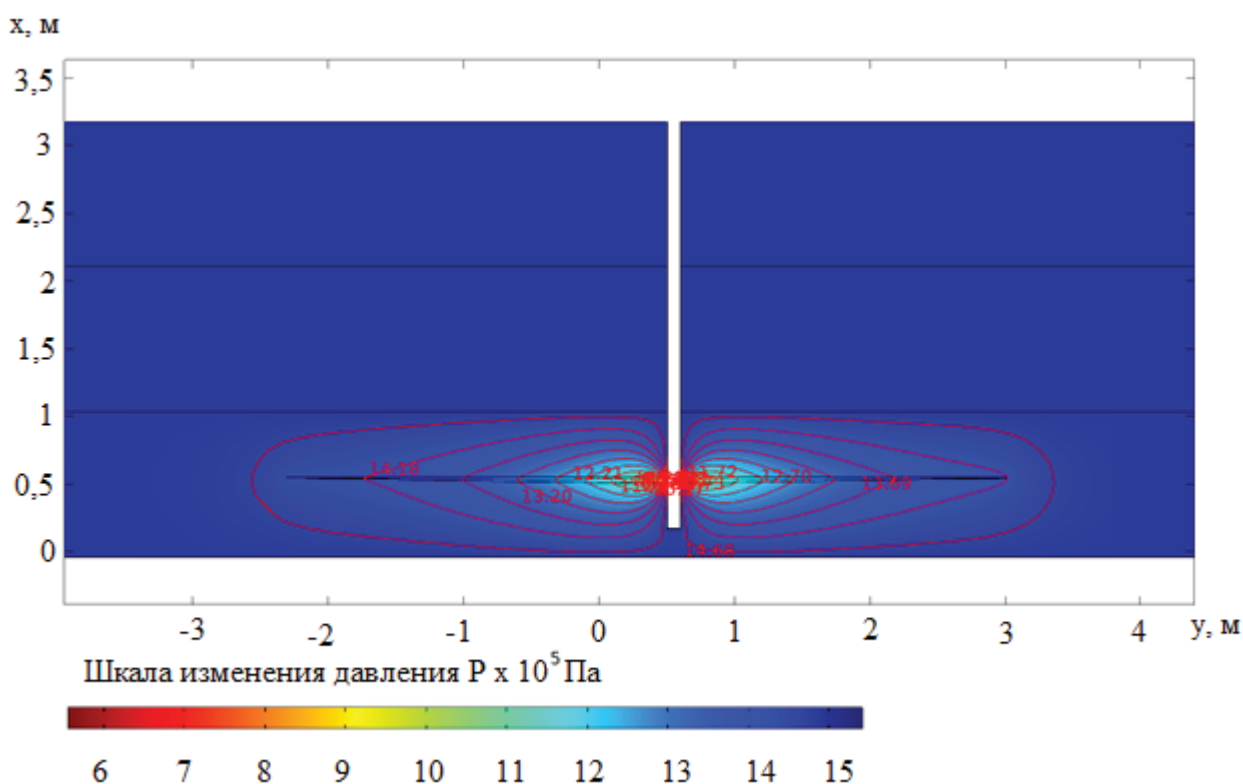


Рис. 2. Результаты моделирования процесса фильтрации флюида в угольный пласт

*Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук» проект FWEZ-2021-0001 «Создание многофункциональных систем мониторинга и прогноза газодинамических явлений, контроля напряженного состояния, разработка методов их предотвращения и оценки эффективности при подземной разработке угольных месторождений» (рег. № АААА-А21-121012290020-4).*

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Малашкина В. А. Исследование возможностей повышения эффективности подземной дегазации угольных шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2019. № 9. С. 131–137.
2. Клишин В. И., Тайлаков О. В., Опрук Г. Ю., Макеев М. П., Соколов С. В., Уткаев Е. А., Телегуз А. С. Экспериментальные исследования процесса разрушения угольного пласта при поинтервальном гидроразрыве // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. 2019. Т. 6. № 2. С. 113–117.
3. Minghua Lin, Baiquan Lin, Wei Yang, Yang Zhao, Zheng Wang. In-situ testing method of the permeability coefficient in a coal seam based on the finite volume method and its application // Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2022. Vol. 97. Article 104370.
4. Смыслов А. И. Модель фильтрации флюида в угольном пласте // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. № S7. С. 224–227.
5. Голицын М. В., Голицын А. М., Пронина Н. В., Архипов А. Я., Богомолов А. Х., Цикарев Д. А. Газоугольные бассейны России и мира. М., 2002. 250 с.
6. Сластунов С. В., Ермак Г. П. Обоснование выбора и эффективная реализация способов дегазации при интенсивной отработке газоносных угольных пластов – ключевой вопрос обеспечения метанобезопасности угольных шахт // Уголь. 2013. № 1. С. 21–24.
7. Сластунов С. В., Каркашадзе Г. Г., Коликов К. С., Кашапов К. С. Газодинамическое состояние и фильтрационные свойства угольного пласта в зонах заблаговременной дегазации // Наука и техника в газовой промышленности. 2009. № 3. С. 63–67.
8. Сластунов С. В., Коликов К. С., Ермак Г. П. Угольный метан: добыча или дегазация // Газовая промышленность. 2012. № 10. С. 60–62.
9. Тайлаков О. В., Смыслов А. И., Уткаев Е. А. Оценка фильтрационных свойств угольных пластов // Газовая промышленность. 2012. № S (672). С. 24–25.
10. Тайлаков О. В., Уткаев Е. А., Застрелов Д. Н., Смыслов А. И. Физическое моделирование фильтрации флюида в угольном пласте для оценки радиуса скин-эффекта // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2013. № S6. С. 165–169.
11. Fan Yongpeng, Shu Longyong, Huo Zhonggang, Hao Jinwei, Li Yang. Numerical simulation of sectional hydraulic reaming for methane extraction from coal seams // Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2021. Vol. 95. Article 104180.
12. Тайлаков О. В., Уткаев Е. А., Макеев М. П. Определение фильтрационных свойств угольных пластов по результатам шахтных измерений // Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов. 2020. № 6. С. 366–370.

DOI: 10.25558/VOSTNII.2023.99.21.005

UDC 622.234.573; 550.832.4

© O. V. Taylakov, M. P. Makeev, E. A. Utkayev, D. A. Martsiash, 2023

**O. V. TAILAKOV**

Doctor of Engineering Sciences, Professor,  
General Director  
JSC «NC VostNII», Kemerovo  
Chief Researcher  
Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry, Kemerovo  
e-mail: oleg2579@gmail.com

**M.P. MAKEEV**

Candidate of Engineering Sciences,  
Senior Researcher  
Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry, Kemerovo  
e-mail: m\_makeev@mail.ru

**E. A. UTKAEV**

Candidate of Engineering Sciences,  
Senior Researcher  
Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry, Kemerovo  
e-mail: utkaev@mail.ru

**D. A. MARTSIASH**

Graduate Student  
KuzSTU, Kemerovo  
e-mail: martsiaash@uglemetan.ru

**STUDY OF FILTRATION PROPERTIES OF COAL FORMATION BASED ON HYDRODYNAMIC STUDIES AND NUMERICAL MODELING**

*We considered the use of advanced degassing of coal seams to ensure safe mining operations in coal mines. The possibility of joint application of slug tests and numerical modeling of the fluid filtration process in the coal formation to determine its permeability is justified. The procedure for performing hydrodynamic studies in vertical wells drilled into the coal seam from the surface is presented. The results of the analysis of data from slug tests performed in the conditions of the Leninsky geological and economic district of Kuzbass are presented. Description of numerical model of fluid filtration into coal seam is given. Satisfactory convergence of the results of numerical modeling and field observations is shown.*

**REFERENCES**

1. Malashkina V. A. Investigation of the possibilities of increasing the efficiency of underground degassing of coal mines // Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal) [Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)]. 2019. No. 9. P. 131–137. [In Russ.].
2. Klishin V. I., Taylakov O. V., Opruk G. Yu., Makeev M. P., Sokolov S. V., Utkayev E. A., Teleguz A. S. Experimental studies of the process of destruction of a coal seam during an intervening hydraulic fracturing // Fundamental and applied issues of mining sciences [Fundamentalnyye i prikladnyye voprosy gornykh nauk]. 2019. Vol. 6. No. 2. P. 113–117. [In Russ.].

3. Minghua Lin, Baiquan Lin, Wei Yang, Yang Zhao, Zheng Wang. In-situ testing method of the permeability coefficient in a coal seam based on the finite volume method and its application // Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2022. Vol. 97. Article 104370.
4. Smyslov A. I. Model of fluid filtration in a coal seam // Mining information and analytical bulletin [Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten]. 2009. No. S7. P. 224–227. [In Russ.].
5. Golitsyn M. V., Golitsyn A.M., Pronina N. V., Arkhipov A. Ya., Bogomolov A. Kh., Tsikarev D. A. Gas-coal basins of Russia and the world. M., 2002. 250 p. [In Russ.].
6. Slastunov S. V., Ermak G. P. Justification of the choice and effective implementation of degassing methods during intensive mining of gas-bearing coal seams is a key issue of ensuring methane safety of coal mines // Coal [Ugol]. 2013. No. 1. P. 21–24. [In Russ.].
7. Slastunov S. V., Karkashadze G. G., Kolikov K. S., Kashapov K. S. Gas-dynamic state and filtration properties of a coal seam in zones of early degassing // Science and technology in the gas industry [Nauka i tekhnika v gazovoy promyshlennosti]. 2009. No. 3. P. 63–67. [In Russ.].
8. Slastunov S. V., Kolikov K. S., Ermak G. P. Coal methane: extraction or degassing // Gas industry [Gazovaya promyshlennost]. 2012. No. 10. P. 60–62. [In Russ.].
9. Tailakov O. V., Smyslov A. I., Utkayev E. A. Assessment of filtration properties of coal seams // Gas industry [Gazovaya promyshlennost]. 2012. No. S 672). P. 24–25. [In Russ.].
10. Tailakov O. V., Utkayev E. A., Strellov D. N., Smyslov A. I. Physical modeling of fluid filtration in a coal seam for estimating the radius of the skin effect // Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal) [Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)]. 2013. No. S6. P. 165–169. [In Russ.].
11. Fan Yongpeng, Shu Longyong, Huo Zhonggang, Hao Jinwei, Li Yang. Numerical simulation of sectional hydraulic reaming for methane extraction from coal seams // Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2021. Vol. 95. Article 104180.
12. Tailakov O. V., Utkayev E. A., Makeev M. P. Determination of filtration properties of coal seams based on the results of mine measurements // Science-intensive technologies for the development and use of mineral resources [Naukoymkiye tekhnologii razrabotki i ispolzovaniya mineralnykh resursov]. 2020. No. 6. P. 366–370. [In Russ.].