

## ЗАВИСИМОСТЬ МЕТАНОВЫДЕЛЕНИЯ ОТ ПРОЦЕССОВ СДВИЖЕНИЙ ПОРОД ПРИ ВЕДЕНИИ ПОДЗЕМНЫХ ГОРНЫХ РАБОТ

ШИНКЕВИЧ М. В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт угля Федерального исследовательского центра угля и углехимии СО РАН  
(Россия, г. Кемерово, просп. Ленинградский, 10)

**Введение.** При современных темпах отработки угольных пластов в условиях увеличивающейся глубины их разработки и газоносности актуализируется проблема метанобезопасности угольных шахт. Ее решение невозможно без эффективного управления газовыделением на выемочных участках.

**Цель работы** – на основе научных открытий российских ученых о состоянии углеметанового пласта в виде твердого углегазового раствора и деформационно-волновых геомеханических процессов в окрестности выработок рассмотреть динамику выделения метана на действующем выемочном участке как следствие волнообразной разгрузки массива горных пород и разрабатываемого пласта от горного давления в результате движения очистного забоя.

**Методология.** В настоящее время при определении схем дегазации и газоправления, а также при проектировании вентиляции высокопроизводительного выемочного участка не учитывается геомеханическая ситуация, возникающая при выемке углеметанового пласта. При использовании результатов исследований деформационно-волновых процессов в массиве горных пород появляется возможность оценить степень их воздействия на угольный пласт и повысить эффективность его дегазации и проветривания выемочного участка.

**Результаты.** В предлагаемом в статье подходе заложена связь фундаментальной задачи исследования нелинейных геомеханических процессов впереди длинного очистного забоя с характером метановыделения, которое является отражением указанных процессов.

**Выводы.** Используя данные о метанообильности высокопроизводительного выемочного участка, учитывая указанные процессы, можно определять продуктивность систем дегазации и предлагать наиболее рациональные схемы проветривания.

**Ключевые слова:** геомеханика; нелинейность; динамика метанообильности; выемочный участок; подготовительная выработка; аэрогазовый контроль; прогноз; управление.

**Введение.** На шахтах Кемеровской области (Кузбасса) при современных темпах отработки угольных пластов в условиях увеличивающейся глубины их разработки и газоносности актуализируется задача повышения устойчивости высокопроизводительной и безопасной добычи угля. Современные угледобывающие комплексы обеспечивают скорость продвижения очистных забоев более 20 м/сут и добычи угля до 25 000 т/сут, что в разы больше этих значений в предшествующие десятилетия. Поскольку темпы ведения горных работ постоянно растут, существенно снижается адекватность основанных на предшествующем горном опыте методов и средств оценки ситуаций. Основой этого несоответствия является инерционность в совершенствовании нормативно-методической базы горной промышленности. В то же время научная основа для необходимого совершенствования методов и средств обеспечения безопасности при подземной добыче угля неуклонно развивается отечественной и зарубежной наукой во всех областях знаний [1–7].

**Цель работы.** Реализованный в нормативно-методических документах, действующих в угольной промышленности, опыт прежних лет не соответствует реальным геомеханическим и газодинамическим процессам. Явная нелинейность этих процессов, установленная российскими учеными в 1990-х гг. [8–10] и достаточно широко проверенная в 2000-х [11–13], ярко проявляет себя в динамике метанообильности высокопроизводительных забоев даже при постоянных значениях скорости их подвигания и газового потенциала разрабатываемого массива газоносных горных пород. Исследовать и детализировать особенности происходящих в массиве процессов, причем в возрастающих масштабах, традиционными методами геомеханики невозможно. В настоящее время при определении схемы дегазации и проектировании вентиляции высокопроизводительного выемочного участка не учитывается геомеханическая ситуация, возникающая при выемке углеметанового пласта. По этой причине темпы горных работ и глубина их ведения ниже возможностей угледобывающих технологий.

**Методология проведения исследований.** Специфика угольных месторождений, заключающаяся в наличии в горном массиве газоносных пластов, активно выделяющих газ при снижении напряжений, позволяет рассматривать их как пластины-индикаторы развития геомеханического процесса в объемах, многократно превышающих возможности традиционных методов геомеханики. При этом непрерывно действующие системы газового мониторинга шахт регистрируют интенсивные газовые притоки из зон изменений геомеханического состояния миллионов тонн пород. Любое технологическое воздействие на обрабатываемый угольный пласт интенсифицирует процесс его газоистощения вследствие изменения напряженного состояния в приконтурной части пласта, т. е. геомеханические процессы влияют и на газокинетические состояния обрабатываемого пласта, что в конечном счете отражается на метанообильности выработок. Анализ этой информации возможен методами рудничной аэрогазодинамики. Интеграция указанных методов позволяет получать новые научные знания для решения достаточно сложных задач, что успешно реализуется в Институте угля ФИЦ УУХ СО РАН.

На данный момент все шахты в Кузбассе оснащены электронными системами аэрогазового мониторинга. Современная система контроля, как правило, снимает данные интенсивности изменения регистрируемых значений (концентраций метана, скорости расхода воздуха). В результате в процессе проведения подготовительных выработок и ведения очистных работ накапливается большой объем данных, в котором «скрыта» информация о развитии газогеохимических процессов при ведении горных работ. Необходимы разработка и обоснование алгоритмов для интерпретации этих данных.

**Результаты.** Поскольку динамика метанообильности выемочного участка отражает реакцию вмещающего массива на технологическое воздействие, то, привлекая знания о нелинейности геомеханического процесса при выемке пласта, можно более надежно прогнозировать динамику метанообильности выемочного участка. Оперативное отслеживание динамики при движении очистного забоя и решение обратной задачи обеспечивает уточнение решений по обеспечению ритмичности подвигания забоя. Например, по динамике метанообильности очистного забоя в начальный период отработки выемочного столба можно оперативно уточнить величину шага первичного обрушения основной кровли, которая является важным технологическим параметром.

Для этого рассчитывают газовый потенциал обрабатываемого пласта и осуществляют мониторинг относительного газовыделения по мере отхода лавы от монтажной камеры. Величину первичного шага обрушения основной кровли  $L_{ш.о}$ , м, устанавливают по расстоянию от монтажной камеры до ближайшей к ней

точки минимума значений газокинетического показателя  $P_{\text{пл}}$ , в качестве которого принимают отношение относительного газовыделения к газовому потенциалу пласта (рис.1):

$$L_{\text{ш.о}} = 2l,$$

где  $l$  – расстояние от монтажной камеры до ближайшей к ней точки минимума значений газокинетического показателя в ненарушенном массиве, м.

Таким образом учитывается влияние процесса разгрузки и сдвижения горных пород кровли на газовыделение в призабойное пространство. Способ позволяет с достаточно высокой точностью и оперативно прогнозировать первичный шаг обрушения основной кровли.

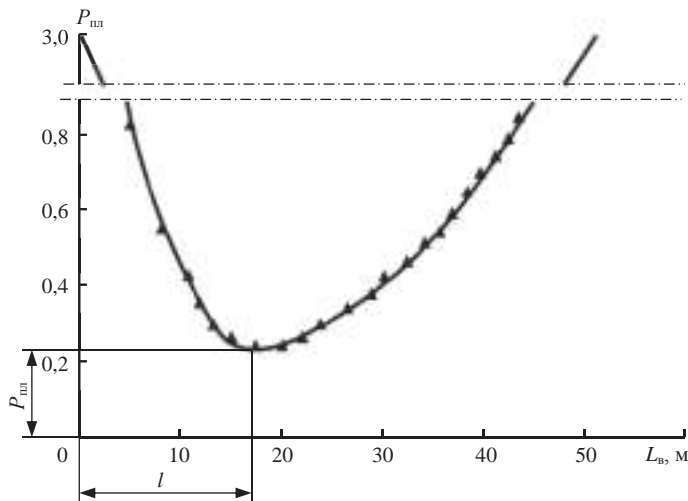


Рис. 1. Определение первичного шага обрушения основной кровли по длине выемочного столба  $L_{\text{в}}$   
 Fig. 1. The determination of the initial caving step of the main roof according to the length of an extraction pillar  $L_{\text{в}}$

Именно перераспределение напряжений посредством изменения метастабильных состояний углетанового пласта предопределяет метановыделение через обнаженную поверхность забоя, переток метана из пласта через вмещающие породы в выработанное пространство и остаточную газоносность отбиваемой полосы угля [11, 13]. Очевидно, метановыделение является реакцией массива на происходящие в нем процессы сдвижений и перераспределений напряжений.

В работе [14] даны эмпирические функции распада углетана во времени и зависимость газосодержания угля от напряжения, действующего на него, из которых следует, что распад основной части геоматериала происходит за 3 ч. Этот период характеризуется высоким снижением скорости газоистощения. При использовании этих зависимостей появляется возможность определять газокинетические характеристики как отбиваемой полосы угля, так и всего угольного пласта.

На рис. 2 приведены данные системы измерения давления на секции механизированной крепи, пересчитанные на высоту действующего слоя горных пород, позволяющие уточнять информацию о напряженном состоянии призабойной части пласта. Согласно [13], изменение этого состояния уточняет газокинетические свойства угля, отбиваемого комбайном и, следовательно, метанообильность очистного забоя и транспортных выработок.

Оперативное управление режимом добычи угля возможно путем использования современных автоматизированных систем аэрогазового контроля, но необходим переход на качественно новый уровень – прогнозирование газовой обстановки и управление технологическими решениями как на стадии проектирования, так и на стадии ведения горных работ. Только в этом случае можно с достаточной степенью надежности гарантировать ритмичную работу высокопроизводительного забоя. Однако даже наиболее известные автоматизированные системы с компьютерным оснащением ограничены информационно-контролирующими функциями, т. е. обладают тем же качественным недостатком, что и отечественные системы предшествующего поколения «Метан», АКМР, АПТВ и др. В конце 1980-х гг. на базе этих систем были разработаны автоматизированные методы прогноза зон повышенной выбросоопасности при проведении подготовительных выработок. Современные электронные системы аэрогазового мониторинга, обладая большими техническими возможностями, позволяют использовать разработанные подходы и при очистных работах.

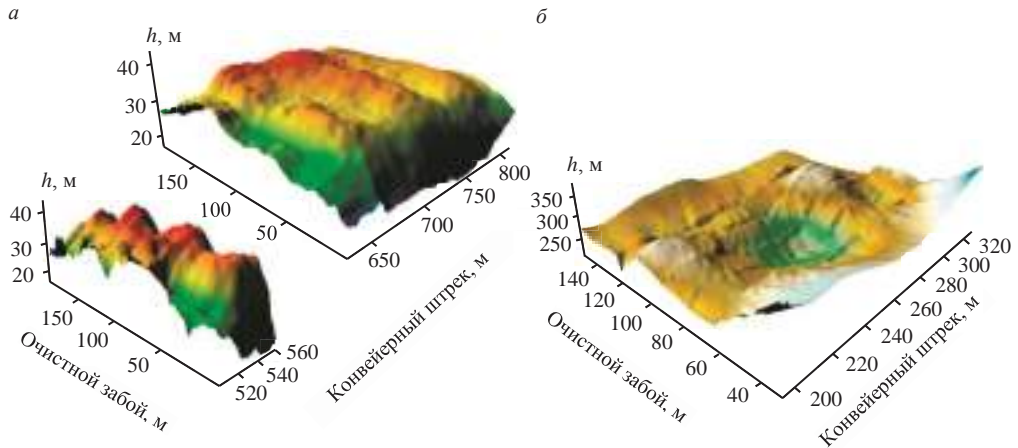


Рис. 2. Волнообразные изменения давления на секции механизированной крепи при движении очистного забоя:

*a* – шахта Алардинская; *б* – шахта Чертинская-Коксовая

Fig. 2. Undulating pressure changing at the mechanized support section at the advance of the stopping face:  
*a* – Alardinsky mine; *b* – Chertinsky-Koksovaya mine

**Анализ и обсуждение.** Даже самые достоверные знания газогемеханики должны быть адаптированы к конкретным горнотехнологическим условиям, что потенциально может обеспечить современная система рудничного мониторинга, составной частью которой является система аэрогазового контроля. Интеграция представленной на рис. 2 и 3 информации и является перспективной основой управления метанообильностью очистного забоя. Вертикально расположенные на рис. 3 группы точек фактических данных, стремящиеся к минимуму, обусловлены остановками забоя.

Согласно рис. 2, 3, геомеханические процессы в массиве горных пород несколько отличаются от классических представлений. Именно уточнение бытующих представлений при изменившихся технологических условиях и с использованием современных знаний позволит прогнозировать как геомеханические, так и газодинамические следствия выемки пластов угля.

**Применение результатов, выводы.** Описание физической картины изменения свойств и состояний среды всегда намного полнее реализуемых математических моделей. Причем наиболее заметно это несоответствие для угольных пла-

стов как газоносных геоматериалов. Так, на модели (полученные по прочностным и деформационным характеристикам материала, не содержащего газ) накладыва-ется закономерность распределения, например давления газа, установленная, в лучшем случае, в соответствии с условиями неравновесной фильтрации, т. е. совершенно игнорируется участие газовой компоненты среды в начальной стадии деформирования массива.

На снижение значимости подобных недостатков при описании физической картины происходящих в горном массиве процессов ориентированы перечислен-ные аспекты исследований, предусматривающих:

- разработку уникальной схемы развития нелинейных геомеханических про-цессов в массиве горных пород в области влияния очистной выемки и исследова-ние связи газодинамической реакции массива и разрабатываемого пласта (дина-мики метанообильности выемочного участка) с этими процессами;
- уточнение характеристик углей, определяющих величину газокинетических показателей природного геоматериала;
- разработку схемы дегазации углевмещающего массива горных пород с уче-том схемы развития нелинейных геомеханических процессов в массиве горных пород в области влияния очистной выемки.

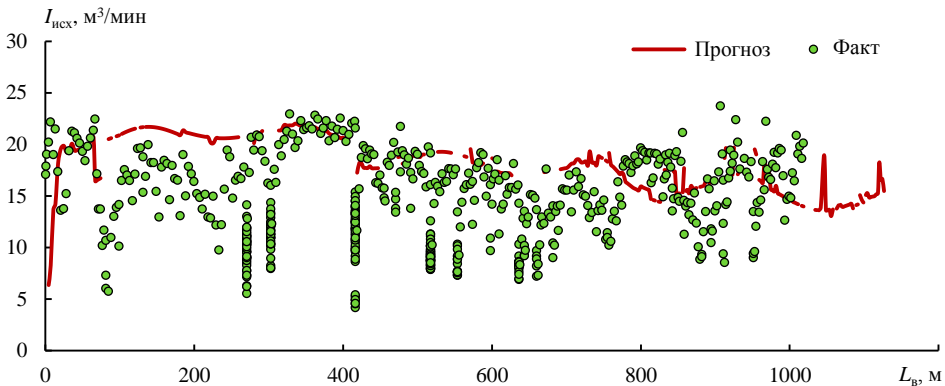


Рис. 3. Фактические и прогнозные данные о динамике метанообильности исходящей из очистного забоя струи  $I_{исх}$  в зависимости от длины выемочного столба  $L_в$   
 Fig. 3. Actual and forecasting data on the methane-bearing capacity dynamics of the outcoming jet from the stoping face  $I_{исх}$  according to the length of an extraction pillar  $L_в$

При решении задач повышения безопасности и эффективности горных работ на угольных шахтах планируется использовать комплексный подход, основанный на объединении как классических моделей развития зон разгрузки и сдвижений массива горных пород, так и результатов современных фундаментальных исследований эти процессов и новых научных знаний о свойствах и состояниях газоносных пластов, в том числе с применением сделанных российскими учеными научных открытий о явлении зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных выработок и о свойстве органического вещества угля образовывать с газами метастабильные однофазные системы по типу твердых растворов. Несомненной новизной в применении методов рудничной аэрогазодинамики является установление закономерностей формирования и развития пространственной волнообразности техногенных геомеханических процессов, обуславливающих динамику метанообильности выемочных участков при угледобыче. Такой подход основан на единстве причинно-следственных связей газокинетических и геомеханических процессов, следствия которых непрерывно отслеживает система газового мониторинга шахты. Следовательно, имеется инструментально обеспеченная возможность получения информации о весьма сложных и малоизучен-

ных процессах. Более того, при таком подходе уточняется связь решения фундаментальной задачи с ее прикладным значением.

Реализация таких представлений позволит получить углубленные знания о развитии деформационно-волновых процессов в массиве горных пород в окрестности горной выработки при движении забоя. Результаты исследований станут основой инновационных разработок в области повышения эффективности и безопасности при ведении работ на угольных шахтах.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Tabachenko N. M., Dychkovskiy R. Ye., Falshtynskiy V. S. About extraction of methane and slate gas from coal and slate deposits // *Научовий Вісник Національного Гірничого університету*. 2012. Vol. 2. P. 44–48.
2. Амангелдіқызы А., Пономарева М. В., Айтпаева А. Р. Исследование метаноносности угля пласта К7 в районе шахтного поля шахты им. Т. Кузембаева // *Труды университета*. 2015. № 2. С. 67–70.
3. Клишин В. И., Опрук Г. Ю. Расчет газовыделения в очистной забой в системах разработки подэтажными штреками «крепь-штрек» // *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. 2012. № 6. С. 54–59.
4. Tailakov O. V., Kormin A. N., Zastrellov D. N., Utkaev E. A., Sokolov S. V. Justification of a method for determination of gas content in coal seams to assess degasification efficiency // *The 8th Russian-Chinese Symposium. Coal in 21st Century: Mining, Processing and Safety*, 2016. P. 324–329.
5. Shevchenko L. A. Debit gas in well as a comprehensive indicator of gas permeability of the coal seam // *Coal in the 21st Century: Mining, Processing and Safety*. 2016. P. 184–187.
6. Палеев Д. Ю., Аксенов В. В., Лукашов О. Ю., Васенин И. М., Крайнов А. Ю., Шрагер Э. Р. Моделирование аэрогазодинамических процессов в вентиляционных сетях современных горнодобывающих предприятий // *ГИАБ*. 2015. № 2 (7). С. 224–230.
7. Портола В. А. О повышении эффективности извлечения метана из шахт при эксплуатации высокогазоносных пластов // *Вестник КузГТУ*. 2007. № 3. С. 10–12.
8. Reuter M., Krach M., Kießling U., Veksler Y. Zonal disintegration of rocks around breakage headings // *Journal of Mining Science*. 2015. Vol. 51. No. 2. P. 237–242.
9. Шемякин Е. И., Курленя М. В., Опарин Н. В., Рева В. Н., Глушихин Ф. П., Розенбаум М. А. Открытие № 400. Явление зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных выработок // *БИ*. 1992. № 1. 3 с.
10. Зональная дезинтеграция горных пород и устойчивость подземных выработок / В. Н. Опарин [и др.]. Новосибирск: СО РАН. 2008. 278 с.
11. Полевщиков Г. Я., Шинкевич М. В., Плаксин М. С. Газокинетические особенности распада углеметана на конвейерном штреке выемочного участка // *ГИАБ*. 2011. № 8. С. 21–28.
12. Шинкевич М. В., Леонтьева Е. В. Моделирование техногенной структуризации вмещающего массива горных пород при ведении очистных работ // *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. 2015. № 3. С. 23–31.
13. Шинкевич М. В. Газовыделение из обрабатываемого пласта с учетом геомеханических процессов во вмещающем массиве // *ГИАБ*. 2013. № 6. С. 278–285.
14. Малышев Ю. Н., Трубецкой К. Н., Айруни А. Т. Фундаментально-прикладные методы решения проблемы угольных пластов М.: ИАГН, 2000. 516 с.

Поступила в редакцию 12 апреля 2018 года

Шинкевич М. В. Зависимость метановыделения от процессов сдвижений пород при ведении подземных горных работ // *Известия вузов. Горный журнал*. 2018. № 6. С. 28–34.

#### Сведения об авторах:

**Шинкевич Максим Валериевич** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института угля ФИЦ УУХ Сибирского отделения РАН. E-mail: max-valerich@rambler.ru

#### METHANE EMISSION DEPENDENCE ON ROCK DISPLACEMENT PROCESSES WHEN CONDUCTING UNDERGROUND MINING OPERATIONS

**Shinkevich M. V.**<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of RAS, Kemerovo, Russia.

**Introduction.** At the current rates of coal seam mining, in the conditions of increasing depth of their development and gas content, the problem of methane safety of coal mines becomes topical. Its solution is impossible without effective control of gas emission at the excavation sites.

**The aim of the research** is to consider the dynamics of methane emission in the current excavation site as a consequence of undulating unloading of the rock massif and the developed formation from rock pressure as a result of stoping face advance on the basis of scientific discoveries of Russian scientists on the state of the coal-methane formation in the form of a solid coal-gas solution and deformation-wave geomechanical processes in the vicinity of the excavations.

**Methodology.** At present, when determining the degassing and gas control schemes, as well as designing the ventilation of a high-performance excavation site, the geomechanical situation that occurs when the carbon methane layer is removed is not taken into account. Using the research results of deformation-wave processes in the array of rocks, it becomes possible to assess the degree of their impact on the coal seam and improve the efficiency of its degassing and excavation site ventilation.

**Results.** In the approach proposed in the article a connection is made between the fundamental problem of investigating nonlinear geomechanical processes ahead of a long stoping face and the character of methane emission which is a reflection of the indicated processes.

**Conclusions.** Using the data on the methane-bearing capacity of the high-performance excavation site and considering the indicated processes we will be able to determine the productivity of the degassing systems and the most rational ventilation schemes.

**Key words:** geomechanics; non-linearity; dynamics of a methane-bearing capacity; excavation site; development heading; aerogas control; forecast; management.

DOI: 10.21440/0536-1028-2018-6-28-34

#### REFERENCES

1. Tabachenko N. M., Dychkovskiy R. Ye., Falshtynskiy V. S. About extraction of methane and slate gas from coal and slate deposits. *Naukovii visnik NGU – Scientific Bulletin of NMGU*, 2012, vol. 2, pp. 44–48.
2. Amangeldikyzy A., Ponomareva M. V., Aitpaeva A. R. [Investigation of K7 seam coal methane content near the mine field of Kuzembaev mine]. *Trudy Universiteta – University's works*, 2015, no. 2, pp. 67–70.
3. Klislin V. I., Opruk G. Yu. [Calculation of gas emission into the stoping face in the systems of "support-gallery" sublevel mining]. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Kuzbass State Technical University*, 2012, 6 (4), pp. 54–59. (In Russ.)
4. Tailakov O. V., Kormin A. N., Zastrelov D. N., Utkaev E. A., Sokolov S. V. Justification of a method for determination of gas content in coal seams to assess degasification efficiency. The 8th Russian-Chinese Symp. Coal in 21st Century: Mining, Processing and Safety, 2016, pp. 324–329.
5. Shevchenko L. A. Debit gas in well as a comprehensive indicator of gas permeability of the coal seam. Coal in the 21st Century: Mining, Processing and Safety, 2016, pp. 184–187.
6. Paleev D. Yu., Aksenov V. V., Lukashov O. Yu., Vasenin I. M., Krainov A. Yu., Shragr E. R. [Modeling earogas dynamic processes in the ventilation networks of modern mining enterprises]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) – Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*, 2015, no. 2 (7), pp. 224–230. (In Russ.)
7. Portola V. A. [Regarding the efficiency improvement of methane withdrawal from the mines under the exploitation of seams with high gas content]. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Kuzbass State Technical University*, 2007, no. 3, pp. 10–12. (In Russ.)
8. Reuter M., Krach M., Kiefling U., Veksler Y. Zonal disintegration of rocks around breakage headings. *Journal of Mining Science*, 2015, vol. 51, no. 2, pp. 237–242.
9. Shemiakin E. I., Kurlenia M. V., Oparin N. V., Reva V. N., Glushikhin F. P., Rozenbaum M. A. [Discovery no. 400. The effect of zonal disintegration of rocks around underground excavations]. *BI*, 1992, no. 1. 3 p.
10. Oparin V. N., and others. *Zonal'naia dezintegratsiia gornyykh porod i ustoychivost' podzemnykh vyrabotok* [Zonal disintegration of rocks and underground excavations stability]. Novosibirsk, SB RAS Publ., 2008. 278 p.
11. Polevshchikov G. Y., Shinkevich M. V., Plaksin M. S. [Gas-kinetic features of the disintegration of coal-bed methane at the conveyor road of working area]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) – Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*, 2011, no. 8, pp. 21–28. (In Russ.)
12. Shinkevich M. V., Leont'eva E. V. [Simulation of enclosing rock mass technogenic structuring when performing stoping operations]. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Kuzbass State Technical University*, 2015, no. 3, pp. 23–31. (In Russ.)
13. Shinkevich M. V. [Gas emission out of the mined seam with the account of geomechanical processes in the enclosing massif]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) – Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*, 2013, no. 6, pp. 278–285. (In Russ.)
14. Malyshev Yu. N., Trubetskoi K. N., Airuni A. T. *Fundamental'no-prikladnye metody resheniia problemy ugol'nykh plastov* [Fundamental and applied methods of solving the problem of coal beds]. Moscow, IAGN Publ., 2000. 516 p.

#### Information about authors

**Shinkevich Maksim Valerievich** – Candidate of Engineering sciences, senior researcher of the Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry, SB RAS. E-mail: max-valerich@rambler.ru

## ОДНОМЕРНОЕ ДВИЖЕНИЕ НЕФТЕЙ С ВЯЗКО-ПЛАСТИЧНЫМИ СВОЙСТВАМИ С УЧЕТОМ СКИН-ФАКТОРА

АБДУЛЛАЕВ М. Г.<sup>1</sup>, ДАДАШ-ЗАДЕ Х. И.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности  
(Азербайджан, г. Баку, просп. Азадлыг, 20)

**Введение.** В статье рассмотрен вопрос влияния скин-фактора на одномерное движение нефтей с вязко-пластичными свойствами.

**Цель статьи** – оценить влияние скин-фактора на производительность скважин с высоковязкой нефтью.

**Методика проведения исследований.** Загрязнение призабойной зоны пласта и высокий скин-фактор приводят к снижению производительности скважин. Если скважины отличаются особенно высокими значениями скин-фактора и низкими продуктивными возможностями, обусловленными значительным загрязнением призабойной зоны асфальто-парафино-смолистыми отложениями, нужно проводить обработку призабойной зоны пласта, чтобы восстановить первичные значения проницаемости призабойной зоны. Поэтому необходимо выявление влияния скин-фактора на дебит скважин, из которых добывают нефть с вязко-пластичными свойствами, выполнено с использованием теоретического анализа процессов фильтрации.

**Результаты.** Рассмотрены нефти угленосной толщи нижнего карбона, которые отличаются высоким содержанием асфальтенов и смол. Нефть, содержащая асфальтено-смолистые вещества, представляет собой коллоидную систему, которая по характеру близка к вязко-пластичным нефтям. Дисперсной фазой в этой системе являются частицы асфальтенов, дисперсионной средой – смолы углеводородов разных классов. Стабилизирующим фактором в системе являются сольватные соли, вокруг которых накапливаются тяжелые компоненты. Интенсивность взаимодействия между частицами асфальтенов в нефти зависит от степени их сольватации. При десольватации усиливается взаимодействие между ними, что ведет, с одной стороны, к их ассоциации и уменьшению степени дисперсности асфальтенов, а с другой – к возникновению структуры в нефти и появлению вязко-пластичных свойств.

**Выводы.** Установлено влияние скин-фактора на вязко-пластичные свойства нефти и на дебит скважины.

**Ключевые слова:** вязко-пластичные свойства; проницаемость; парафины; асфальтены; смолы; скин-фактор.

**Введение.** Из многочисленных литературных источников известны причины возникновения скин-фактора – гидродинамическое несовершенство вскрытия пласта, загрязнение околоскважинной зоны, нелинейные эффекты (турбулентное течение, разгазирование, сжатие скелета горной породы и т. д.) – и его влияние на производительность как добывающих, так и нагнетательных скважин.

**Методические подходы.** В 1949 г. впервые А. Ф. Van Everdingen и N. Hurst для оценки состояния призабойной зоны скважины ввели понятие *скин-эффект* и указали, что падение забойного давления в результате ухудшения проницаемости околоскважинной зоны пласта пропорционально скин-эффекту (1956 г.) [1]. Термин *скин-эффект* был введен ранее в области электротехники, а применительно к нефтегазодобыче для оценки состояния продуктивного пласта более подходящим было бы использование понятия *скин-фактор*. Распространенное определение скин-фактора ( $S$ ) как результата несовершенства вскрытия скважины, данное в работе [2], далеко не полностью раскрывает физический смысл и механизмы его возникновения. Поэтому по сей день остаются открытыми и дискуссионными наиболее принципиальные вопросы: область существования значений  $S$  и их принадлежность, неопределенность положительного и отрицательного знаков его



значений, отсутствие строгой теории вывода формулы. По формуле М. Ф. Hawkins скин-фактор может иметь значения от  $-\infty$  до 0 и от 0 до  $+\infty$  без принадлежности области определения и существования.

Скин-фактор определяется на основании результатов исследований при установившихся (стационарных) и неуставившихся (нестационарных) режимах фильтрации [3]. В работе [4] для оценки скин-эффекта и для расчета поля давления использовались функции Грина. Пласт считался бесконечным, вскрытым одной скважиной с вертикальной трещиной.

Теоретические и лабораторные исследования показали, что многие нефтяные месторождения Азербайджана, России и США содержат нефть с аномальными свойствами. По результатам исследований, проведенных за последние годы, можно судить о том, что эта нефть по физико-механическим свойствам может рассматриваться как вязко-пластичная среда. Фильтрация структурных жидкостей в пористой среде отличается от фильтрации ньютоновских жидкостей. Экспериментально доказано, что на структурные свойства нефти оказывают влияние парафины, асфальтены, смолы, а также углеводородный состав газов, растворенных в нефти.

Влияние на изменение структурных свойств нефти таких компонентов, как парафины и смолы, а также воздействие температуры рассматривалось многими авторами [2, 5–9]. О влиянии асфальтенов и газов, растворенных в нефти, сведений очень мало [10]. В некоторых работах при определении состояния призабойной зоны пласта по результатам гидродинамических исследований рассматривался вопрос определения скин-эффекта на основании кривой восстановления давления. Для определения скин-фактора (с учетом схождения потоков в трещине горизонтальной скважины с многостадийным ГРП и схождения потоков к стволу горизонтальной скважин) предлагались различные формулы [11, 12].

Изучению влияния ствола скважины и скин-эффекта на КВД при исследованиях скважин посвящены работы Агарвола, Аль-Хусейна и Ремей (1970 г.) для случая КПД, а также работы Мак Кинли (1971 г.) [13] для случая КВД, Грингартена и соавторов – для обобщенных КВД и КПД. Агарвол с соавторами [14] получили решение дифференциального уравнения фильтрации для случая пуска скважины конечного радиуса в бесконечном пласте с постоянным дебитом. Однако аналитическое исследование этого уравнения достаточно сложно для получения практических полезных выводов о влиянии ствола скважины на КВД [15]. В работе [15] подробно и последовательно излагается аналитический вывод формулы для расчета  $S$ , физический смысл и геометрическая интерпретация его значения. Аналитический вывод формулы  $S$  подтверждается выводом формулы через индикаторные линии *дебит-уровень*, *дебит-давление* и по значениям забойного давления и потенциального дебита. Однако в представленных работах не изучено влияние скин-фактора на реальный расход жидкости, т. е. на дебит скважины.

Интерес представляют нефти угленосной толщи нижнего карбона, которые отличаются высоким содержанием асфальтенов и смол. Нефть, содержащая асфальтено-смолистые вещества, представляет собой коллоидную систему, которая по характеру близка к вязко-пластичным нефтям. Надо отметить, что дисперсной фазой в этой системе являются частицы асфальтенов, дисперсионной средой – смолы углеводородов разных классов. Стабилизирующим фактором в системе являются сольватные соли, вокруг которых накапливаются тяжелые компоненты. Сольватные соли образуют смолы, ароматические и нафтеновые углеводороды. Интенсивность взаимодействия между частицами асфальтенов в нефти зависит от степени их сольватации. При десольватации усиливается взаимодействие между ними, что ведет, с одной стороны, к их ассоциации и уменьшению степени дисперсности асфальтенов, а с другой – к возникновению в нефти структуры и появлению вязко-пластичных свойств.

Таким образом, изучение асфальтенов в пластовой нефти дает возможность установить, при каких условиях последняя может обладать структурными, т. е. вязко-пластичными свойствами.

Многочисленные лабораторные исследования показывают, что ряд практических вопросов, касающихся рациональной разработки нефтяных месторождений, механизма нефтеотдачи, процесса фильтрации, для случаев, когда нефть обладает структурно-механическими свойствами, остаются невыясненными.

Одним из таких вопросов является вопрос процессов фильтрации аномальных нефтей с вязко-пластичными свойствами с учетом скин-фактора.

Известно, что при одномерной линейной фильтрации вязко-пластичных нефтей скорость фильтрации можно определить по формуле

$$\frac{dP}{dx} = - \left( \frac{\mu}{k} + \frac{\alpha \tau_0}{\sqrt{k_1}} \right),$$

где  $dP/dx$  – градиент давления;  $\mu$  – структурная вязкость вязко-пластичной жидкости;  $k$  – проницаемость пласта по жидкости;  $k_1$  – проницаемость пласта по воздуху;  $\tau_0$  – предельное напряжение сдвига;  $\alpha$  – безразмерный параметр, учитывающий неньютоновские свойства нефти;  $v$  – скорость фильтрации жидкости.

Решим данное уравнение относительно расхода жидкости:

$$Q = \frac{kF}{\mu} \left( \frac{dP}{dx} - \frac{\alpha \tau_0}{\sqrt{k_1}} \right),$$

где  $F$  – площадь поперечного сечения пласта.

Отсюда

$$dP = \left[ \frac{Q\mu}{kF} + \frac{\alpha \tau_0}{\sqrt{k_1}} \right] dx.$$

Для учета скин-фактора рассмотрим следующие условия для пласта с вязко-пластичными свойствами фильтрующей жидкости:

$$\int_{P_c}^{P_k} dP = \left[ \frac{Q\mu}{kF} + \frac{\alpha \tau_0}{\sqrt{k_1}} \right] \int_0^{L_s} dx + \left[ \frac{Q\mu}{kF} + \frac{\alpha \tau_0}{\sqrt{k_1}} \right] \int_{L_s}^{L-L_s} dx,$$

где  $k_s$  – проницаемость пласта ближе к ряду скважин, где возникает скин-фактор;  $P_k$  – давление на контуре;  $P_c$  – давление на забое скважины;  $L_s$  – длина участка, где возникает процесс, учитывающий скин-фактор;  $L$  – длина общего участка между контуром и забоем скважины.

Решая данное уравнение, получим:

$$P_k - P_c = \frac{Q\mu}{kF} L \left[ 1 + \frac{L_s}{L} \left( \frac{k}{k_s} - 2 \right) \right] + \frac{\alpha \tau_0}{\sqrt{k_1}} (L - L_s).$$

Введем понятие скин-фактора:

$$S = \frac{L_s}{L} \left( \frac{k}{k_s} - 2 \right).$$

С учетом скин-фактора перепад давления при фильтрации вязко-пластичной жидкости можно определить как

$$P_k - P_c = \frac{Q\mu}{kF} L(1 + S) + \frac{\alpha\tau_0}{\sqrt{k_1}} L \left(1 - \frac{L_s}{L}\right).$$

При  $S = 0$  получим формулу академика А. Х. Мирзаджанзаде; если  $\tau_0 = 0$  – общую формулу для неньютоновских жидкостей.

С учетом сказанного можно определить расход неньютоновской жидкости:

$$Q = \frac{kF}{\mu} \left[ \frac{P_k - P_c}{\mu} - \frac{\alpha\tau_0}{\sqrt{k_1}} \left(1 - \frac{L_s}{L}\right) \right] / (1 + S).$$

**Выводы.** Как видно из формулы, скин-фактор влияет на вязко-пластичные свойства нефти и на дебит скважины. Отметим, что если скин-фактор имеет отрицательное значение, то добыча увеличивается, если скин-фактор имеет положительное значение, то дебит уменьшается. Скин-фактор можно определить на основе результатов исследования скважин.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Van Everdingen A. F., Hurst W. The application of the Laplace transformation to flow problems in reservoirs // *Petrol. Transactions, AIME*. 1949. Vol. 1. No. 12. С. 2732–2735.
2. Справочное руководство по проектированию разработки и эксплуатации нефтяных месторождений / под ред. Ш. К. Гиматудинова. М.: Недра, 1983. 455 с.
3. Economides Michael J., Daniel Hill A., Ehlig Christine. *Petroleum production systems*. Economides, by Prentice Hall PTR, 1994.
4. Gringarten A. C., Ramey H. J., Raghavan R. Unsteady-state pressure distributions created by a well with a single infinite-conductivity vertical fracture // *Soc. Petrol. Eng. J.* 1974. Vol. 14. No. 4. P. 347–360.
5. Ли Дж., Ваттенбаргер Р. А. Инжиниринг газовых резервуаров. М.: Газпром, 2014. 944 с.
6. Мирзаджанзаде А. Х. Вопросы гидродинамики вязко-пластичных и вязких жидкостей в нефтедобыче. Баку, 1959. 348 с.
7. Мищенко И. Т. Скважинная добыча нефти. М.: Нефть и газ, 2003. 816 с.
8. Салаватов Т. Ш., Абдуллаев М. Г., Гараев Р. Г., Хамитов Н. М., Джаманбаев С. Е. Способ повышения производительности скважин применением термохимической обработки призабойной зоны пласта // *Научное обозрение*. 2016. № 9. С. 61–70.
9. Салаватов Т. Ш. Регулирование реофизических свойств нефтей физическими полями: дис. ... канд. техн. наук. Баку, 1981. 150 с.
10. Хорнеш Я. Исследование фильтрации асфальтсодержащих нефтей // *Нефтяное хозяйство*. 1966. № 10. С. 25–20.
11. Булатов А. И., Савенок О. В., Яремийчук Р. С. Научные основы и практика освоения нефтяных и газовых скважин. Краснодар: Юг, 2016. 576 с.
12. Дуркин С. М. Математическая модель скважины, дренирующей трещиновато-пористый коллектор: дис. ... канд. техн. наук. Ухта, 2014. 125 с.
13. McKinley K. M. Wellbore transmissibility from afterflow-dominated pressure build-up data // *J. Petrol. Technol.*, July, 1971.
14. Agarwal R. G., Al-Hussainy R., Ramey H. J. An investigation of wellbore storage and skin effect in unsteady liquid flow. *J. Analytical Treatment. SPEJ*. Sept. 1979. P. 279–290.
15. Муфазалов Р. Ш. Гидромеханика добычи нефти: учеб. пособие для вузов. М.: Горная книга, 2005. 328 с.

Поступила в редакцию 10 апреля 2018 года

Абдуллаев М. Г., Дадаш-заде Х. И. Одномерное движение нефтей с вязко-пластичными свойствами с учетом скин-фактора // *Известия вузов. Горный журнал*. 2018. № 6. С. 35–40.

#### Сведения об авторах:

**Абдуллаев Малик Гурбан оглу** – кандидат технических наук, доцент, преподаватель кафедры нефтегазовой инженерии Азербайджанского государственного университета нефти и промышленности. E-mail: malik.abdullayev.52@mail.ru

Дадаш-заде Ханум Иса гъзы – кандидат технических наук, доцент, преподаватель кафедры нефтегазовой инженерии Азербайджанского государственного университета нефти и промышленности. E-mail: dadashzadimirza@mail.ru

## ONE-DIMENSIONAL MOTION OF OILS WITH VISCOUS-DUCTILE PROPERTIES WITH THE ACCOUNT OF A SKIN FACTOR

Abdullaev M. G.<sup>1</sup>, Dadash-zade Kh. I.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Azerbaijan State Oil and Industry University, Baku, Azerbaijan.

**Introduction.** The article considers the problem of skin factor influence on the one-dimensional motion of oils with viscous and ductile properties.

**The aim of the article** is to assess the influence of a skin factor on the capacity of wells with high-viscosity oil.

**Research methodology.** It is well-known that seam borehole zone pollution and high skin factor leads to the reduction of wells capacity. If wells are distinguished by particularly high values of a skin factor and low productiveness conditioned on significant pollution of a borehole zone with asphalt-paraffin-resine residue, it is necessary to fulfill seam borehole zone processing in order to reconstruct borehole zone permeability primary values. It is therefore necessary to determine the influence of a skin factor on the production rate of the well whereof oil with viscous and ductile properties is produced.

**Results.** With this purpose the lower Carbonian coal-bearing strata oils are examined which are distinguished by high content of asphaltenes and resins. Oil which contains asphaltene-resin matters represents colloidal system which is similar to viscous-ductile oils in its character. It should be noted that in this system asphaltene particles are dispersed phase, while hydrocarbon resins of various classes and resins dissolved in them are a continuous medium. Stabilizing factor in the system are solvate salts around which heavy components are accumulated. Interaction intensity between asphaltene particles in oil depends on the degree of their solvation. Under desolvation the interaction between them intensifies which leads to their association and asphaltene dispersion reduction on the one hand, and generation of a structure in oil and the occurrence of viscous-ductile properties on the other hand.

**Key words:** viscous-ductile properties; permeability; paraffins; asphaltenes; resins; skin factor.

DOI: 10.21440/0536-1028-2018-6-35-40

### REFERENCES

1. Van Everdingen A. F., Hurst W. The application of the Laplace transformation to flow problems in reservoirs. *Petrol. Transactions, AIME*, 1949, vol. 1, no. 12, pp. 2732–2735.
2. *Spravochnoe rukovodstvo po proektirovaniu razrabotki i ekspluatatsii nefitynykh mestorozhdenii / pod red. Sh. K. Gimatudinova* [Reference guide on mine design and oil fields exploitation. Edited by Sh. K. Gimatudinov]. Moscow, Nedra Publ., 1983. 455 p.
3. Economides Michael J., Daniel Hill A., Ehlig Christine. *Petroleum production systems*. Economides, by Prentice Hall PTR, 1994.
4. Gringarten A. C., Ramey H. J., Raghavan R. Unsteady-state pressure distributions created by a well with a single infinite-conductivity vertical fracture. *Soc. Petrol. Eng. J.*, 1974, vol. 14, no. 4, pp. 347–360.
5. Lee J., Wattenbarger R. A. *Inzhiniring gazovykh rezervuarov* [Gas reservoir engineering]. Moscow, Gazprom Publ., 2014. 944 p.
6. Mirzadzhanzade A. Kh. *Voprosy gidrodinamiki viazko-plastichnykh i viazkikh zhidkostei v nefte dobyche* [Issues of hydrodynamics of viscous-ductile and viscous liquids in oil production]. Baku, 1959. 348 p.
7. Mishchenko I. T. *Skvazhinnaia dobycha nefi* [Oil well mining]. Moscow, Neft' i gaz Publ., 2003. 816 p.
8. Salavatov T. Sh., Abdullaev M. G., Garaev R. G., Khamitov N. M., Dzhamanbaev S. E. [Method for improving the well productivity by using the thermochemical processing of hole-bottom region]. *Nauchnoe obozrenie – Science Review*, 2016, no. 9, pp. 61–70. (In Russ.)
9. Salavatov T. Sh. *Regulirovanie reofizicheskikh svoystv neftei fizicheskimi poliami: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Regulation of oil rheophysical properties with physical fields. Cand. Eng. sci. diss.]. Baku, 1981. 150 p.
10. Khornesh Ia. [Investigation into asphaltene bearing oils filtration]. *Nefitnoe khoziaistvo – Oil Industry*, 1966, no. 10, pp. 25–20. (In Russ.)
11. Bulatov A. I., Savenok O. V., Iaremiichuk R. S. *Nauchnye osnovy i praktika osvoeniia nefitynykh i gazovykh skvazhin* [Scientific fundamentals and the practice of oil and gas wells completion]. Krasnodar, Iug Publ., 2016. 576 p.
12. Durkin S. M. *Matematicheskaiia model' skvazhiny, dreniruiushchei treshchinovato-poristy kolektor: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Mathematical model of the well which drains fissured porous reservoirs. Cand. Eng. sci. diss.]. Ukhta, 2014. 125 p.
13. McKinley K. M. Wellbore transmissibility from afterflow-dominated pressure build-up data. *J. Petrol. Technol.*, July, 1971.
14. Agarwal R. G., Al-Hussainy R., Ramey H. J. An investigation of wellbore storage and skin effect in unsteady liquid flow. *J. Analytical Treatment. SPEJ*, Sept. 1979, p. 279–290.
15. Mufazalov R. Sh. *Gidromekhanika dobychi nefi: ucheb. posobie dlia vuzov* [School book for the institutions of higher education "Hydromechanics of oil production"]. Moscow, Gornaia kniga Publ., 2005. 328 p.

**Information about authors**

**Abdullaev Malik Gurban oglu** – Candidate of Engineering sciences, Associate professor, lecturer at the Department of Oil and Gas Engineering of Azerbaijan State University of Oil and Industry. E-mail: malik.abdullayev.52@mail.ru

**Dadash-zade Khanum Isa gyzy** – Candidate of Engineering sciences, Associate professor, lecturer at the Department of Oil and Gas Engineering of Azerbaijan State University of Oil and Industry. E-mail: dadashzademirza@mail.ru

---