

РОЗРОБКА РОДОВИЩ КОРИСНИХ КОПАЛИН

УДК 622.332:556.332.4

В.В. Тишков

Государственное высшее учебное заведение
„Национальный горный университет“, г. Днепропетровск,
Украина, e-mail: TishkovVV@mail.ru

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕХНОГЕННОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ В КРОВЛЕ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА ПРИ ПОДЗЕМНОЙ ГАЗИФИКАЦИИ УГЛЯ

V.V. Tishkov

State Higher Educational Institution “National Mining University”,
Dnipropetrovsk, Ukraine, e-mail: TishkovVV@mail.ru

FEATURES OF FORMATION OF TECHNOGENIC PERMEABILITY IN ROOF OF COAL LAYER DURING UNDERGROUND GASIFICATION OF COAL

Целью данной работы является оценка гидродинамического режима и его изменения в процессе проведения подземной газификации угля, а также получение достоверных данных об изменении проницаемости вмещающих горных пород. Задачей выполненных исследований являлось установление зависимости фильтрационных свойств песчаных разностей грунтов, с учетом температурного воздействия процесса газификации, от уровня деформаций в различных зонах массива вокруг подземного газогенератора.

Исследования проводились в два этапа. На первом этапе подготовленные образцы горных пород песчано-глинистых разностей ненарушенной структуры (разрез „Морозовский“ Днепробассы) подвергались температурному воздействию в диапазоне 400–650°C с последующим изучением зависимости фильтрационных свойств от уровня их деформаций в условиях трехосного сжатия. На втором – исследовался характер изменения проницаемости по результатам численного моделирования напряженно-деформированного состояния нарушенного породного массива в зоне газогенератора.

Результаты лабораторных исследований зависимости проницаемости песчано-глинистых пород от объемных деформаций и термического влияния в режиме трехмерной нагрузки образцов пород приведены в виде графиков, обобщающих установленные закономерности изменения проницаемости. Установлены особенности техногенной проницаемости вмещающих пород при подземной газификации угля с использованием численных геомеханических моделей, которые отражают поле объемных деформаций, являющихся исходными параметрами для обоснования водорегулирования в зоне газогенератора. Впервые количественно оценена величина изменения приращения коэффициента фильтрации для песчано-глинистых пород, вмещающих угольный пласт, по отношению к природному, в зависимости от величины их объемной деформации при осуществлении процесса подземной газификации угля.

Ключевые слова: проницаемость пород, объемные деформации, термическое влияние, численное моделирование, подземная газификация угля, газогенератор, коэффициент фильтрации

Введение. Ресурсное восполнение топливно-энергетического комплекса Украины, которое базируется на традиционных технологиях переработки углей, имеет тенденцию к ухудшению. Это побуждает искать более эффективные способы добычи и использования угля как энергоносителя и как источника производства сопутствующих продуктов.

Особенно актуальным является совершенствование технологии подземной газификации угля (ПГУ) [1, 2] для экологически безопасной и экономически рентабельной разработки угольных пластов в сложных горно-геологических условиях.

В результате выгазовывания угольного пласта образуется выработанное пространство, обнажаются породы почвы и кровли, которые подвергаются воздействию высоких температур. Как и при механической выемке, эти процессы вызывают деформацию пород кровли. В результате происходит обрушение вмещающих пород. Изменения в горном массиве оказывают воздействие на поверхность, которая оседает на различную глубину, на состояние технологических скважин, которые испытывают повышенные нагрузки и могут преждевременно выйти из строя, а главное – на технологический процесс выгазовывания пласта, где увеличение трещиноватости массива может привести к большим утечкам газа и повышению водопритока в подземный газогенератор.

Сложность гидрогеологических условий месторождений, неоднородность фильтрационных свойств вмещающих пород, отсутствие четких представлений о характере техногенной проницаемости вокруг газогенератора и закономерностях ее изменения препятствуют принятию адекватных решений по конструкции и технологии ПГУ.

Для оценки гидродинамического режима и его изменения в процессе выгазовывания, а также получения достоверных данных об изменении проницаемости вмещающих горных пород, задачей выполненнх исследований являлось установление зависимости фильтрационных свойств песчаных разностей пород от уровня деформаций в различных зонах вокруг подземного газогенератора.

Методика и результаты исследований. Исследование характера техногенной проницаемости в окрестности очага выгазовывания выполнялось в два этапа. На первом этапе изучалась зависимость фильтрационных свойств боковых пород, представленных песчано-глинистыми разностями, от уровня их деформаций и температуры, на втором – исследовался характер изменения проницаемости по результатам моделирования напряженно-деформированного состояния нарушенного породного массива.

Изучение проницаемости осуществлялось в лабораторных условиях на образцах горных пород, отобранных на угольных разрезах Днепровского бассейна. Наибольший интерес представляли породы, относящиеся к бучакско-киевским свитам палеогеновых отложений, представляющим надугольный водоносный комплекс.

Методика изучения проницаемости состояла в проведении комплекса испытаний фильтрационных свойств образцов песчаных горных пород в условиях трехосного напряженного состояния при различных

значениях гидростатического давления. Диапазон нагрузок в серии испытаний находился в пределах 10...800 кПа, что соответствовало условиям нахождения пород в зоне их сдвижения.

Влияние температурного поля на фильтрационные свойства боковых пород в пределах зоны интенсивных изменений (до 3...4 м над каналом газификации [3, 4]), при мощности обводненных отложений надугольной толщи от 20 до 70 м, изучалось на образцах, предварительно подготовленных в условиях термического воздействия при 400 и 650 °С.

Гидравлический градиент воспроизводился заданием противодействия в образце и для выполненнх испытаний определялся диапазоном 10 и 20 кПа, что соответствовало реальным гидрогеологическим условиям месторождений Днепробасса. Проведению фильтрационных испытаний предшествовала консолидация образцов песчаного грунта при нагрузках, соответствующих значениям геостатического давления, до достижения условной стабилизации деформаций, которая не превышала 0,01% за контрольный период времени. Контроль за расходом воды в условиях свободной фильтрации при заданном градиенте напора осуществлялся до момента ее условной стабилизации на определенный период времени (режим установившейся фильтрации).

Значения коэффициента фильтрации рассчитывались на основании замеров расходов фильтрата для каждой ступени нагружения образца в соответствии с программой испытаний.

Представленные на рис. 1 результаты лабораторных испытаний иллюстрируют полученные зависимости коэффициента фильтрации средне- и мелкозернистых песчаных грунтов от различной степени их уплотнения, а также предварительного температурного воздействия на образец.



Рис. 1. Результаты фильтрационных испытаний образцов песчаных грунтов нарушенного сложения бучакско-киевской свиты палеогена в условиях трехосного напряженного состояния

Полученные данные свидетельствуют о наличии близкой к линейной зависимости между коэффициентом фильтрации испытанных разностей песчаных пород и величиной объемной деформации ($R^2=0,55...0,80$). В интервале девиатора нагрузок 10...800 КПа, при изменении объемных деформаций образцов от 0,0 до 0,12, величина коэффициента фильтрации изменялась в интервале 3,2...0,15 м/сут. Очевидно, что на изменение проницаемости песчаных грунтов существенно влияет уменьшение пористости при уплотнении образцов в условиях объемного напряженного состояния. Температурное воздействие от 400 до 650°C проявилось в росте фильтрационной проницаемости испытанных образцов в диапазоне от 1,15 до 3,2 м/сут. по отношению к условиям природного залегания.

Исследованиями сдвижения в массиве горных пород при ПГУ в различных горно-геологических условиях установлено, что параметры сдвижения при газификации угольного пласта мало отличаются от аналогичных при подземной отработке угольных пластов, однако процесс сдвижения при ПГУ происходит более плавно, а зона прогиба пород с разрывом сплошности (зона трещин) значительно меньше.

При газификации пологих и наклонных пластов высоту развития трещин разрыва, на основании на-

турных исследований, предложено определять по следующей зависимости [1]

$$H_T = n \cdot m \text{ при } H_T < H,$$

где H_T – высота развития трещин, м; H – глубина залегания угольного пласта, м; m – мощность выгазовываемого угольного пласта, м; n – эмпирический коэффициент, учитывающий развитие трещин в породах кровли в процессе газификации.

Для месторождений, где имеется опыт ПГУ, коэффициент n известен и находится в пределах от 6 до 15 [1]. Для новых месторождений величина коэффициента n может быть скорректирована на основе предложенных нами испытаний горных пород и математического моделирования.

Для изучения фильтрационных полей в зоне разрыхления вокруг газогенератора использована численная геомеханическая модель породного массива песчано-глинистых отложений, характерного для условий Днепровского бассейна.

Параметры напряженно-деформированного состояния породного массива получены при решении задачи в упруго-пластической постановке с учетом выполненных ранее изысканий и результатов изучения механических свойств на образцах пород в условиях объемного напряженного состояния.

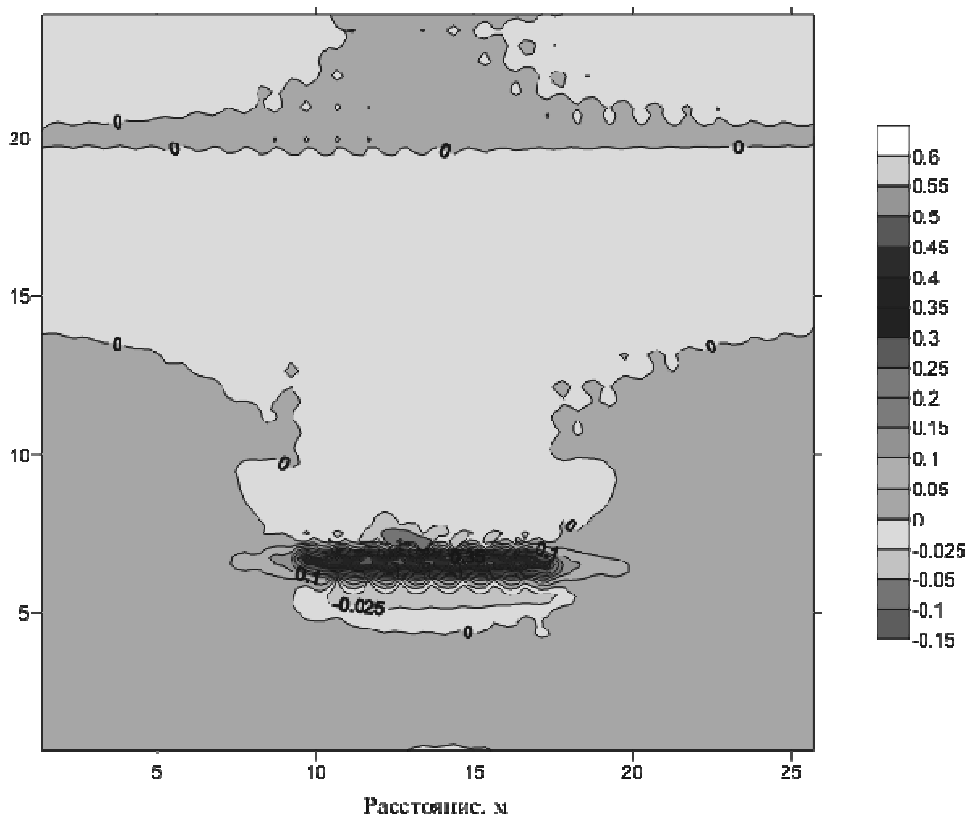


Рис. 2. Поле относительных объемных деформаций в окрестности пространства выгазовывания, дол. ед.

Установлено, что для приведенных условий, при мощности бурогоугольного пласта 1,0 м и ширине пространства выгазовывания около 9,0 м, поле техногенной проницаемости характеризуется хорошо выра-

женной зональностью. В вертикальном направлении относительные деформации растяжения, определяющие формирование повышенной проводимости по горизонтали, концентрируются в кровле и почве про-

пространства выгазовывания. Горизонтальные деформации растяжения фиксируются преимущественно на внешних контурах пространства выгазовывания и за его пределами, достигая величин 0.01...0.02. При этом непосредственно над выгазованным пространством образуется зона деформаций сжатия, определяющая понижение значения проницаемости вмещающих пород в вертикальном направлении.

Более цельное представление о характере техногенной проницаемости дает поле объемных деформаций, которое в условиях практически изотропной вмещающей толщи является определяющим в формировании техногенной проницаемости. Как видно на рис. 2, распределение значительных объемных деформаций от 0,1 до 0,8 с преобладанием уплотнения характерно для пород краевой зоны огневого забоя в горизонтальном направлении. Формирование отдельных зон разрыхления, с величиной увеличения объемных деформаций до - 0,164, носит локальный характер и

связано с породами, залегающими в непосредственной кровле и почве пространства выгазовывания. На некотором удалении от канала газификации величины объемных деформаций значительно снижаются, что, в свою очередь, приводит к минимизации их влияния на изменение параметров фильтрации.

На рис. 3 приведены графики изменения коэффициента фильтрации в вертикальном разрезе над каналом газификации и величины объемной деформации в породном массиве, а также представлен график, характеризующий приращение коэффициента фильтрации, характерное для песчано-глинистых пород, вмещающих угольный пласт.

Выполненные исследования позволяют обоснованно подойти к оценке полей проницаемости подработанных массивов, исходя из их напряженно-деформированного состояния, и разработке на этой основе рациональных схем управления гидродинамическим режимом при подземной газификации углей.

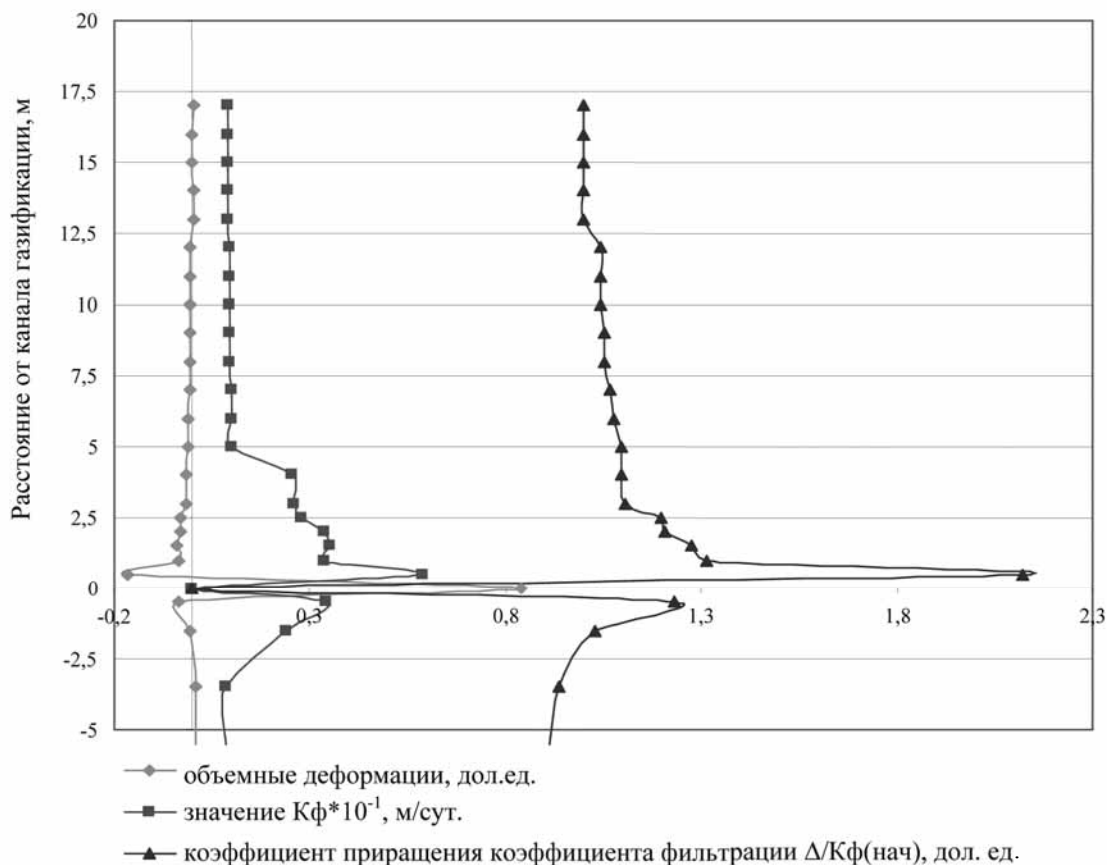


Рис. 3. Графики, характеризующие изменение коэффициента фильтрации, величину объемной деформации породного массива и соответствующее им приращение коэффициента фильтрации песчано-глинистых пород, вмещающих угольный пласт при ПГУ

Выводы.

1. По результатам фильтрационных испытаний образцов песчаных грунтов в стабилметре получена близкая к линейной зависимость между коэффициентом фильтрации и величиной объемной деформации (величина коэффициента фильтрации изменялась в интервале 3,2...0,15 м/сут. при $\epsilon_{об}$ от 0,0 до 0,12).

2. Установлено, что температурное воздействие на образцы пород в интервале от 400 до 650°C проявилось в росте их фильтрационной проницаемости в диапазоне от 1,15 до 3,2 м/сут. по отношению к условиям природного залегания.

3. По данным геомеханического моделирования породного массива, характерного для условий Днепробасса, определено поле объемных деформаций, ко-

торое в условиях практически изотропной вмещающей толщи является определяющим в формировании техногенной проницаемости.

4. На основании проведенных исследований количественно оценена величина изменения приращення коэффициента фильтрации для песчано-глинистых пород, вмещающих угольный пласт, по отношению к природному, в зависимости от изменения их объемной деформации.

Список литературы / References

1. Крейнин Е.В. Нетрадиционные термические технологии добычи трудноизвлекаемых топлив: уголь, углеводородное сырье / Крейнин Е.В. – М.: ООО „ИРЦ Газпром“, 2004. – 301 с.

Kreinina, Ye.V. (2004), *Netraditsionnye termicheskie tekhnologii dobychi trudnoizvlekaemykh topliv* [Non-traditional Thermal Technologies for Extracting Hard extractive Fuels: Coal, Hydrocarbons], ООО “Gazprom RPI”, Moscow, Russia, 301 p.

2. Глушков А.И. Охрана окружающей среды при подземной газификации угля: Аналит. Обзор / Глушков А.И., Кондырев Б.И. // ГПНТБ СО РАН, Дальневост. политехн. ин-т. – Новосибирск: 1993. – 129 с. (Сер. Экология. Вып. 29).

Glushkov, A.I. and Kondyrev, B.I., (1993), “Environmental protection in underground coal gasification Environment protection at coal deposits exploiting”, *Analyt. Review SPSL, Ecology*, Vol.29, Dalnevostochniy Polytechnicheskiy Inst., Novosibirsk, Russia, 129. p.

3. Крейнин Е.В. Подземная газификация углей / Крейнин Е.В.– М.: Недра, 394 с.

Kreinina, Ye.V. *Podzemnaya gazifikatsiya uglya* [Underground Coal Gasification], Moscow: Nedra, 394 p.

4. Садовенко И.А. Оценка возможности дополнительного отбора тепла вокруг подземного газогенератора / Садовенко И.А., Тишков В.В. // Науковий вісник НГАУ. – Днепропетровск: 2001. – №5. – С. 133–134.

Sadovenko, I.A. and Tishkov, V.V. (2001), “Assessment of the possibility of additional heat removal around the underground gasifier”, *Naukovyi visnyk Natsionalnoi Hirnychoi Akademii Ukrainy*, Dnipropetrovsk, no.5, pp. 133–134.

Метою даної роботи є оцінка гідродинамічного режиму і його зміни в процесі проведення підземної газифікації вугілля, а також отримання достовірних даних про зміну проникності вміщуючих гірських порід. Задачею виконаних досліджень було встановлення залежності фільтраційних властивостей піщаних різностей ґрунтів, з урахуванням температурного впливу процесу газифікації, від рівня деформацій у різних зонах масиву довкола підземного газогенератора.

Дослідження проводилися у два етапи. На першому етапі підготовлені зразки гірських порід піщано-глинистих різниць непорушеної структури (розріз „Морозівський“ Дніпробасу) піддавалися температурному впливу в діапазоні 400–650°C з подальшим вивченням залежності фільтраційних властивостей від рівня їх деформацій в умовах тривісного стиснення. На другому – досліджувався характер зміни проник-

ності за результатами чисельного моделювання напружено-деформованого стану порушеного породного масиву в зоні газогенератора.

Результати лабораторних досліджень залежності проникності піщано-глинистих порід від об’ємних деформацій і термічного впливу в режимі тривимірного навантаження зразків порід наведено у вигляді графіків, узагальнюючих встановлені закономірності їх зміни. Встановлено особливості техногенної проникності вміщуючих порід при підземній газифікації вугілля з використанням чисельних геомеханічних моделей, які відображають поле об’ємних деформацій, що являються вихідними параметрами для обґрунтування водорегулювання в зоні газогенератора. Уперше кількісно оцінена величина зміни природу коефіцієнта фільтрації для піщано-глинистих порід, що вміщують вугільний пласт, по відношенню до природного, залежно від величини їх об’ємної деформації при здійсненні процесу підземної газифікації вугілля.

Ключові слова: проникність порід, об’ємні деформації, термічний вплив, чисельне моделювання, підземна газифікація вугілля, газогенератор, коефіцієнт фільтрації

The purpose of the research was the estimation of hydrodynamic behavior and its changes during underground coal gasification, as well as obtaining representative data on changes in the permeability of the enclosing strata. The objective of the researches was to establish the filtration properties of the sandy soils dependence on level of strains in different zones affected by the gas generator and it was taking into account the effects of temperature.

The studies were carried out in several stages. Prepared undisturbed samples of sandy-clayey rocks (“Morozovskiy” open pit mine of Dneprovsky basin) were subjected to thermal impact of temperatures 400–650°C, with the subsequent analysis of the filtration properties depending on level of strain in triaxial compression. The nature of permeability changes was investigated by simulation results of the stress-strain state of the disturbed rock mass on the second stage.

The results of laboratory study of the sandy-clayey rock samples permeability dependence on volume deformations and thermal impact under three-dimensional loading are summarized in diagrams showing laws of its change. The features of permeability of enclosing strata after underground coal gasification have been determined by means of numerical geomechanical models reflecting field of volumetric deformations, which are initial parameters for water exchange regulation in the zone affected by the gas generator. The increase of conductivity of sandy-clayey rocks enclosing the coal seam has been estimated for the first time taking into account the range of volumetric strain during underground coal gasification.

Keywords: rock permeability, volumetric deformations, thermal impact, numerical modeling, underground coal gasification, gas generator, conductivity

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук І.О. Садовенком. Дата надходження рукопису 10.06.11