

ГЕОЛОГІЯ

УДК 556.34

*А.И. Березняков, доцент
Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина*

О СОВМЕСТНЫХ ПРОЦЕССАХ ДИФФУЗИИ И ФИЛЬТРАЦИИ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ ПРИ НАЛИЧИИ ГРАДИЕНТНОГО ТЕРМИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Рассмотрены особенности совместного протекания процессов массотеплопереноса в зернистых горных породах в градиентном термическом поле. Исследовано влияние диффузионного, фильтрационного и теплового потоков на пористость породы.

Ключевые слова: *градиент температуры, пористость, поровая диффузия, производство энтропии, теплопроводность, фильтрация.*

Розглянуто особливості сумісного перетікання процесів масотеплопереносу у зернистих гірських породах, що перебувають у градієнтному термічному полі. Виявлено вплив дифузійного, фільтраційного і теплового потоків на пористість гірської породи породи.

Ключові слова: *градієнт температури, пористість, порова дифузія, виробництво ентропії, теплопровідність, фільтрація.*

The features of the joint course of the heat-mass transfer in the granular mountain breeds in the gradient-thermal field are examined. The influence of the diffusion, filtration and thermal flows on the porosity of the mountain breeds is explored

Keywords: *gradient of temperature, porosity, porosis diffusion, manufacture of entropie, heat conductivity, filtration.*

Актуальность и цель темы исследования. Как известно, в зернистых горных породах существенную роль играет диффузия в поровом пространстве (поровая диффузия). При этом если промежутки между гранулами заполнены газом, то возможна диффузия только газов. Если же свободное пространство пород частично или полностью заполнено водой, то наряду с диффузией газов происходит диффузия растворенных веществ в жидкой фазе. В последнем случае имеет место суперпозиция двух линейных процессов переноса: поровой диффузии и фильтрации. При этом проявляются синергетические эффекты изменения свойств среды как реакции на внешние воздействия, о чем упоминается во многих работах, опубликованных в последнее время. Исследование некоторых из этих эффектов, обусловленных поровой диффузией и фильтрацией в градиентном термическом поле, составляет цель настоящей работы.

Изложение результатов темы исследования. Связь между коэффициентом диффузии D в пористой среде и D_0 в растворе или газе выражается формулой [1]

$$D = \eta \Pi D_0, \quad (1)$$

где Π – пористость среды,

η – извилистость.

Извилистость зависит от способа укладки частиц, но не зависит от их размеров (при постоянстве формы). Так, для кубической упаковки одинаковых по размеру сферических частиц $\eta = \frac{2}{\pi}$, а для ромбической

$$\text{упаковки } \eta = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi}.$$

Диффундирующее в поровом пространстве пород вещество, как правило, сорбируется гранулами (или вступает с ними в химические реакции). При этом уравнение диффузии сохраняет свой вид, если коэффициент диффузии D заменить *эффективным коэффициентом диффузии* $D_{\text{эф}}$, определяемым по формуле [1]

$$D_{\text{эф}} = \frac{D}{1 + k_H}, \quad (2)$$

где k_H – коэффициент адсорбции или константа Генри.

Определим производство энтропии, обусловленное процессом поровой диффузии.

Как известно, производство энтропии r_{sD} выражается через создающую данный

процесс термодинамическую силу \bar{X}_N и плотность потока \bar{j}_N соотношением

$$p_{SD} = \bar{j}_N \cdot \bar{X}_N. \quad (3)$$

Термодинамическую силу \bar{X}_N , обуславливающую процесс концентрационной диффузии, определим, в соответствии с [2], уравнением

$$\bar{X}_N = -\frac{1}{T} \text{grad } \mu^*, \quad (4)$$

где μ^* – химический потенциал диффундирующих частиц, связанный с их объемной концентрацией n соотношением

$$\text{grad } \mu^* = \frac{kT}{n} \text{grad } n. \quad (5)$$

При наличии градиентов химического потенциала μ^* и температуры T плотность диффузионного потока частиц

$$\bar{j}_N = -\frac{n}{kT} D^* \text{grad } \mu^* = -\gamma \text{grad } T, \quad (6)$$

где D^* – реальный коэффициент диффузии в газе (с учетом пористости и адсорбции среды,

γ – коэффициент термодиффузии,

Очевидно, что в отсутствие термодиффузии уравнение (6) выражает закон Фика:

$$\bar{j}_N = -D^* \text{grad } n. \quad (7)$$

Тогда, в соответствии с уравнением (3), производство энтропии, обусловленное процессом диффузии в произвольном объеме газа,

$$p_{SD} = \frac{k}{n} D^* \text{grad}^2 n. \quad (8)$$

Для пористой адсорбирующей среды, полагая $D^* = D_{\text{эф}}$, с учетом уравнений (1) и (2) получим

$$p_{SD} = \frac{\eta\Pi}{1+k_H} \frac{k}{n} D_0 \text{grad}^2 n. \quad (9)$$

Как видно из полученной формулы, производство энтропии, обусловленное поровой диффузией, линейно возрастает с увеличением пористости.

Если диффузия происходит при наличии фильтрационного и термического полей, то следует учитывать производство энтропии, обусловленное соответствующими термодинамическими силами. Как было показано в работах [3,4], величина производс-

тва энтропии, обусловленного фильтрацией флюида в пористой среде,

$$p_{SF} = \frac{1}{T} \cdot \frac{\Pi^3 d^2}{120(1-\Pi)^2 \mu} \text{grad}^2 p, \quad (10)$$

где Π – пористость породы;

μ – динамическая вязкость жидкости;

d – эффективный размер зерен, составляющих пористую породу.

Как видно из этой формулы, производство фильтрационной энтропии p_{SF} монотонно возрастает с увеличением пористости породы.

При наличии градиентного термического поля наряду с фильтрационной энтропией генерируется также и энтропия, обусловленная тепловым потоком, приближающим систему к состоянию термодинамического равновесия. В работе [3] было показано, что величина производства энтропии p_{SQ} , обусловленной теплопроводностью, определяется формулой

$$p_{SQ} = -\lambda(\Pi) \text{grad } T \cdot \text{grad} \left(\frac{1}{T} \right) = \frac{\lambda(\Pi)}{T^2} \text{grad}^2 T, \quad (11)$$

где $\lambda(\Pi)$ – коэффициент теплопроводности (иногда эту величину называют теплопроводностью), который является функцией пористости Π горной породы. Многочисленные экспериментальные данные свидетельствуют об уменьшении коэффициента теплопроводности λ с возрастанием пористости. Аналитически зависимость коэффициента теплопроводности материала от его пористости определяется [5] по формуле В.И. Оделевского

$$\lambda = \lambda_c (1 - 1,5\Pi), \quad (12-a)$$

при $\Pi \leq 0,66$

и по формуле В.В. Скорохода

$$\lambda = \lambda_c (1 - \Pi)^2 \quad (12-b)$$

при $\Pi \leq 0,4$,

где λ_c – коэффициент теплопроводности компактного материала.

Из формул (11), (12) следует, что производство энтропии, обусловленное теплопроводностью, уменьшается с возрастанием пористости (в то время как производство энтропии, обусловленное фильтрацией и диффузией возрастает с увеличением пористости).

Если в некоторой геосистеме все три диссипативных процесса (диффузия, фильтрация и теплопроводность) протекают совместно, то полное производство энтропии p_s

$$p_s = p_{sd} + p_{sf} + p_{sq} \frac{\eta\Pi}{1+k_H} kD_0 \frac{\text{grad}^2 n}{n} \approx \frac{1}{T} \left[\frac{\Pi^3 d^2}{120(1-\Pi)^2 \mu} \text{grad}^2 p + \frac{\lambda(\Pi)}{T} \text{grad}^2 T \right]. \quad (13)$$

Произведем оценку порядка величины отдельных слагаемых в полученном уравнении. Как было показано в работе [3], величины p_{sf} и p_{sq} имеют один и тот же порядок $\sim(10^{-9} \div 10^{-8})$ Вт/(м³ К). Для определения порядка величины диффузионного слагаемого производства энтропии p_{sd} приведем характерные значения величин, входящих в формулу (9). По справочным данным, метан, диффундирующий в воде, характеризуется коэффициентом диффузии $D_0 = 0,85 \cdot 10^{-9}$ м²/с. Характерные величины концентрации n и градиента концентрации $\text{grad } n$ можно определить на основании данных, приведенных в работе [6]. В соответствии с этими данными, диффузионное поле характеризуется давлением порядка сотен технических атмосфер, а средняя величина градиента давления составляет $\sim 0,5$ ат/м, что соответствует значениям концентрации $n \approx 10^{28}$ м⁻³ и градиенту концентрации $\text{grad } n \approx 5 \cdot 10^{25}$ м⁻³. Подстановка этих значений в формулу (9) дает величину $p_{sd} \approx 10^{-8}$ Вт/(м³ К), т. е. того же порядка, что и остальные члены в уравнении (13). Поскольку все рассматриваемые явления переноса дают вклад в производство энтропии одного порядка, проанализируем их совместное влияние на вмещающую среду.

Рассмотрим вначале случай фильтрации флюида с учетом поровой диффузии при отсутствии градиентного термического поля, т. е. полагая равным нулю второй член в квадратных скобках. В соответствии с теоремой И. Пригожина, производство энтро-

определяется как сумма соответствующих ее частей, определяемых уравнениями (9), (10), (11):

пии в слабонеравновесной открытой системе должно стремиться к минимуму, что обеспечивается как уменьшением пористости в процессе диагенетического уплотнения породы [3] (главным образом), так и зарастанием пор за счет адсорбции вещества (в значительно меньшей степени, так как обычно величина коэффициента адсорбции $k_H \ll 1$).

Рассмотрим теперь фильтрационно-диффузионный процесс, протекающий при наличии градиента температуры, и для которого производство энтропии определяется уравнением (13). При наличии адсорбции во втором члене этого уравнения следует учитывать увеличение эффективного размера d зерен за счет толщины d^* адсорбционного слоя, которую можно оценить с помощью уравнения Ленгмюра. В соответствии с этим уравнением при невысоких давлениях p степень покрытия θ поверхности пропорциональна величине давления p , т. е.

$$\theta \approx k_H p. \quad (14)$$

Степень покрытия представляет собой отношение объема V адсорбированного слоя к величине молекулярного монослоя V_M

$$(\theta = V/V_M). \quad (15)$$

Обозначая толщину монослоя d_M , из уравнений (14),(15) получим значение величины адсорбированного слоя:

$$d^* = k_H p d_M. \quad (16)$$

С учетом этой величины уравнение (13) приобретает вид

$$p_s = p_{sd} + p_{sf} + p_{sq} \frac{\eta\Pi}{1+k_H} kD_0 \frac{\text{grad}^2 n}{n} + \frac{1}{T} \left[\frac{\Pi^3 (d+k_H p d_M)^2}{120(1-\Pi)^2 \mu} \text{grad}^2 p + \frac{\lambda(\Pi)}{T} \text{grad}^2 T \right]. \quad (13-a)$$

Рассмотрим асимптотику этого уравнения, соответствующую малой и большой пористости (для случая малой пористости формально $\Pi \ll 1$, а для большой $\Pi \rightarrow 1$).

В случае большой пористости второй член существенно превосходит остальные,

что соответствует доминированию фильтрации над остальными процессами. Как уже упоминалось, при этом имеется тенденция к уменьшению пористости в процессе диагенеза. В случае же малой пористости уравне-

ние (13-а) с учетом формулы (12-а) приобретает вид

$$p_s = \lambda_c \frac{\text{grad}^2 T}{T^2} + \left(\frac{\eta k}{1+k_H} \frac{\text{grad}^2 n}{n} D_0 - 1,5 \lambda_c \frac{\text{grad}^2 T}{T^2} \right) \Pi + \frac{1}{T} \frac{(d+k_H p d_M)^2 \text{grad}^2 p}{120\mu} \Pi^3. \quad (13-б)$$

В соответствии с условием экстремума

$$\frac{\partial p_s}{\partial \Pi} = \frac{\eta k}{1+k_H} \frac{\text{grad}^2 n}{n} D_0 - 1,5 \lambda_c \frac{\text{grad}^2 T}{T^2} + \frac{1}{T} \frac{(d+k_H p d_M)^2 \text{grad}^2 p}{40\mu} \Pi^2 = 0,$$

откуда определяется значение равновесной (т. е., согласно [3], соответствующей минимуму производства энтропии) пористости:

$$\Pi_0 = 2 \sqrt{\frac{\left(1,5 \lambda_c \frac{\text{grad}^2 T}{T^2} - \frac{\eta k}{1+k_H} \frac{\text{grad}^2 n}{n} D_0 \right) 10 \mu T}{(d+k_H d_M \cdot p) \text{grad} p}}. \quad (14)$$

Очевидно, что полученное выражение имеет смысл при условии неотрицательности выражения, стоящего в скобках. Такое ограничение связано с предположением о малой величине пористости пород (например, крупнозернистый песок). Из этого выражения следует, что равновесная пористость уменьшается с увеличением коэффициента диффузии D_0 , что объясняется заполнением пор диффундирующим веществом. Уменьшение равновесной пористости происходит также и при уменьшении отношения $\frac{\text{grad} T}{T}$. Этот вывод согласуется с данными [7] о том, что «при нагревании и, следовательно, выделении газа из твердой фазы в поле малого градиента температуры идет массоперенос между стенками трещины», в процессе которого происходит зарастание пор. Возрастание градиентов давления, кон-

центрации и эффективного размера гранул также приводит к уменьшению пористости, что согласуется с результатами работы [3].

Выводы. Поровая диффузия флюида, происходящая при наличии фильтрационного и термического полей, оказывает на вмещающую породу физическое влияние. Вместе с фильтрационным и тепловым потоками диффузионный поток влияет в процессе диагенеза на пористость породы таким образом, что ее величина уменьшается с увеличением коэффициента диффузии D_0 , а также при возрастании градиентов давления, концентрации и эффективного размера гранул. При возрастании же отношения $\frac{\text{grad} T}{T}$ величина равновесной пористости увеличивается.

Литература

1. Голубев В. С. Динамика геохимических процессов. – М.: Недра, 1981.- 208с.
2. Филиппов Л. П. Явления переноса. –М.: изд. МГУ, 1986.-120 с.
3. Березняков А. И., Немец К. А. Формирование равновесной пористости обломочных пород при фильтрации в термическом поле. // Вісник Харківського національного університету ім. В.Н. Каразіна. № 804. Геологія - географія – екологія. Харків, 2008. С. 123 – 127.
4. Березняков А. И., Немец К. А. Термодинамические особенности слабонравновесного геофильтрационного потока // Вісник Харківського національного університету ім. В.Н. Каразіна № 620. Геологія – географія – екологія. Харків, 2004. С. 46 – 47.
5. Пористые проницаемые материалы: Спр. изд./ Под ред. С.В. Белоусова. М.: Гостехиздат, 1985.– 286 с.
6. Терещенко В. А. К вопросу исследования диффузионного массообмена между залежами углеводородов и окружающей средой. Проблемы гидрогеологии и инженерного грунтоведения, вып. 2. К.: Наукова думка, 1972. С.134 – 142.
7. Сидоров А. М., Лучков А. Д. Механизм теплопереноса в горных породах. Новосибирск: Наука, Сибир. отд. 1989. – 96 с.