

Р и с. 2. Зависимости энергий активации самодиффузии и диффузии примесных атомов от температуры плавления матрицы:

1 — самодиффузия; 2 — диффузия урана; 3 — диффузия углерода.

ния коэффициента пропорциональности ниже, чем для самодиффузии и диффузии примесей замещения (см. рис. 2).

Поступило в Редакцию 23/XI 1970 г.
В окончательной редакции 12/IV 1971 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. Б. Федоров, Ф. И. Жомов, Е. А. Смирнов. В сб. «Металлургия и металлостроение чистых металлов». Вып. VIII. М., Атомиздат, 1969, стр. 145.
2. Г. Б. Федоров, Ф. И. Жомов, Е. А. Смирнов. Там же. Вып. VII, 1968, стр. 128.

3. А. Д. Ле Клер. В сб. «Диффузия в металлах с объемноцентрированной решеткой». М., «Металлургия», 1969, стр. 11.
4. Г. Б. Федоров, Е. А. Смирнов, В. Н. Гусев. «Атомная энергия», 27, 149 (1969).
5. Р. Ф. Пирт. См. [3], стр. 247.
6. R. Eager, D. Langmuir. Phys. Rev., 89, 911 (1953).
7. J. Askill, D. Tomlin. Philos. Mag., 8, 997 (1963).
8. G. Kidson, J. McGurn. Canad. J. Phys., 39, 1146 (1961).
9. J. Federer, T. Lundy. Trans. AIME, 227, 592 (1963).
10. G. Kidson. Canad. J. Phys., 41, 1563 (1963).
11. Л. В. Павлинов, А. И. Наконечников, В. Н. Быков. «Атомная энергия», 19, 521 (1965).

Об изменении фильтрационных свойств пород при подземном выщелачивании урана раствором серной кислоты

В. И. БЕЛЕЦКИЙ, В. Г. БАХУРОВ, Р. Х. САДЫКОВ

УДК 622.775:622.349.5

Подземное выщелачивание урана из пластовых месторождений осадочного типа [1—4] обычно в той или иной степени сопровождается коагуляцией порового пространства, которая может существенно ухудшать показатели этого процесса. Особенно большие изменения проницаемости пород наблюдаются в случае значительного содержания в них карбонатных примесей. Изучение влияния карбоната кальция, исходной концентрации H_2SO_4 , а также скорости фильтрации растворов на коагуляцию порового пространства послужило предметом настоящего исследования.

В опытах использовали кварцевый песок (диаметр частиц 0,2—0,25 мм), тщательно перемешанный с определенным количеством карбоната кальция той же

крупности. Песок загружали в плексигласовые колонки длиной 50 см и диаметром 3 см. В начале опыта колонки с породой промывали водой для получения стабильных исходных значений дебита. Затем в них подавали раствор серной кислоты. Напорные градиенты поддерживали неизменными в течение всего опыта. При такой постановке эксперимента величина дебита характеризовала изменение проницаемости песка.

В качестве примера на рис. 1 приведен график изменения дебита во времени. Четко выделяются три стадии.

Первая (на рис. 1 от начала опыта до точки А) характеризовалась резким ухудшением фильтрационных свойств песка, связанным главным образом с обра-



Рис. 1. Влияние химического взаимодействия раствора H_2SO_4 (50 г/л) с карбонатной составляющей песка на его фильтрационные свойства.

Содержание $CaCO_3$ — 1%. Дебиты жидкости: — — — — на входе в колонку; — — — — на выходе из колонки; ■ — интервал выхода растворов, содержащих гипс во взвешенном состоянии; цифры — значения pH.

званием CO_2 и распространением его по длине колонки. В этот же период, очевидно, началось образование насыщенного раствора гипса и выпадение его в поровом пространстве. На этой стадии дебит жидкости на выходе из колонки превышал дебит на входе в нее. Количество газа увеличивалось, песок заметно осушался. После достижения газом противоположного конца колонки началась дегазация песка. Газ в колонке перемещался главным образом в виде самостоятельной фазы и частично в растворенном состоянии. В конце первой стадии дебит поступающего в колонку раствора был равен дебиту вытекавшей из нее жидкости. Этот момент (точка А) соответствовал наибольшему объему свободного газа, находящегося в колонке. Величина pH раствора — около 7.

Во вторую стадию (на рис. 1 между точками А и В) происходило постепенное восстановление проницаемости песка. Дебит поступающей в колонку жидкости преобладал над дебитом вытекавшей. Поровое пространство заполнялось раствором. Процесс дегазации преобладал над газообразованием. В эту стадию отмечалось появление на выходе из колонки растворов, содержащих во взвешенном состоянии осадок гипса. Реакция среды постепенно становилась кислой.

Третья стадия (на рис. 1 правее точки В) характеризовалась отсутствием газопроявлений и осадкообразования. Концентрация кислоты достигала исходного значения, взаимодействие ее с породой заканчивалось, дебиты жидкости на входе и выходе совпадали и практически стабилизировались во времени. Величина дебита в конце опыта была несколько ниже исходного значения, что соответствовало проявлению необратимой химической кольтматации, связанной с выпадением труднорастворимого осадка гипса.

Для раздельной оценки газовой и химической кольтматации были проведены опыты с растворами H_2SO_4 и HCl эквивалентной концентрации (рис. 2, а). Их результаты позволили сделать вывод, что резкое ухудшение фильтрационных свойств песка при движении по нему растворов кислот связано с газовой кольтматацией. Вместе с тем результаты опытов показали, что влияние осадка гипса на кольтматацию пород

в начале опыта невелико. На первых двух стадиях оно проявилось главным образом в виде образования на поверхности частиц тонкой пленки, затруднявшей свободное течение реакции и замедлявшей выделение газа. В третью стадию выпадение из растворов гипса заметно влияло на скорость реакции. Протекавшее при отсутствии химической кольтматации взаимодействие соляной кислоты с карбонатами породы закончилось раньше (3 ч 45 мин), чем серной (4 ч 45 мин).

Стабилизация дебита растворов соляной кислоты произошла на уровне примерно 125% его исходного значения, что соответствовало полному растворению карбонатной составляющей породы и образованию более широких поровых каналов. Дебит раствора серной кислоты в конце опыта составлял лишь 85% первоначальной величины. Неполное восстановление фильтрационных свойств связано в основном с образованием осадка $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ и в меньшей мере с излучением части карбонатного вещества гипсовой оболочкой.

Результаты, полученные в опытах, которые провели с растворами серной кислоты различной concentra-

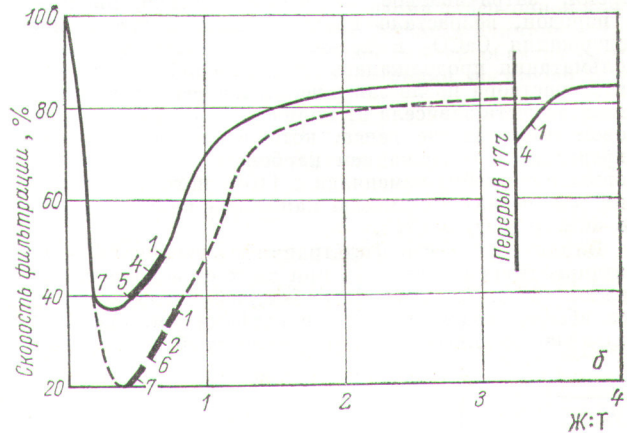
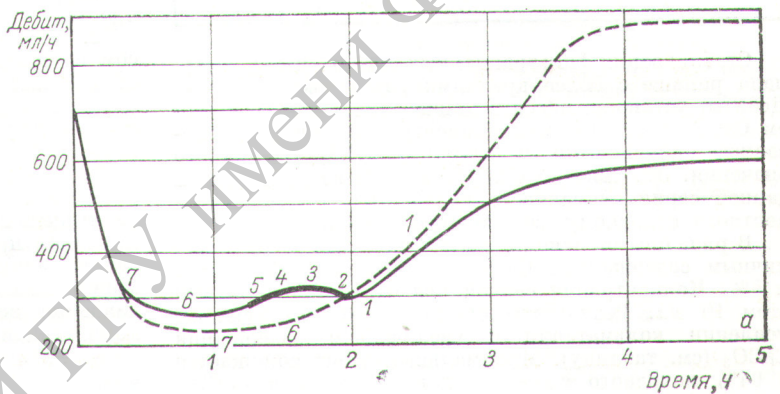


Рис. 2. Изменение фильтрационных свойств песка, содержащего 1% $CaCO_3$ (показаны дебиты растворов на выходе из колонки):

а — при фильтрации растворов HCl (— — — —) и H_2SO_4 (—) эквивалентных концентраций; б — при фильтрации раствора H_2SO_4 (10 г/л) с исходными скоростями фильтрации на входе в колонку 70 см/ч (—) и 36 см/ч (— — —). Условные обозначения см. на рис. 1.

ции (см. таблицу), показывают, что с ее повышением газовая кольматация усиливается. При этом минимальный дебит, составивший 69% исходной величины при концентрации H_2SO_4 2,5 г/л, уменьшался до 16% при концентрации 100 г/л.

Изменение коэффициента фильтрации (К) кварцевого песка, содержащего примесь $CaCO_3$, при взаимодействии с раствором H_2SO_4

H_2SO_4 , г/л	$CaCO_3$, %	К, % исходного	
		минимальный	установившийся в конце опыта
5	1	61	85
10	1	37	85
50	1	19	85
100	1	16	85
10	0,25	64	116
10	0,5	45	95
10	5	28	46

Стабилизация фильтрационных свойств песка наступала раньше с более крепкими растворами кислоты. Дебиты, установившиеся в конце опытов с содержанием $CaCO_3$ 1%, при всех концентрациях кислоты оказались одинаковыми и составляли 85% исходного значения. Это связано с образованием во всех опытах данной серии одинакового количества гипса, эквивалентного исходному содержанию карбоната кальция.

В ряде опытов использовали кварцевый песок с различным содержанием $CaCO_3$, а именно: 0,25; 0,5; 1 и 5%. Концентрация серной кислоты составляла при этом 10 г/л. Результаты опытов свидетельствуют об усилении кольматации с увеличением содержания $CaCO_3$ (см. таблицу). Минимальный дебит понижается с 64% исходного значения при содержании $CaCO_3$ равном 0,25%, до 28% при содержании $CaCO_3$ 5%. Время, затрачиваемое на взаимодействие кислоты с породой, возрастало пропорционально увеличению содержания $CaCO_3$ в песке. Соответственно газовая кольматация продолжалась дольше. Стабилизация дебитов раствора после завершения процесса взаимодействия веществ зависела от количества выпавшего в поровом пространстве гипса, которое, в свою очередь, определялось содержанием карбоната кальция. Установившийся дебит изменялся с 116% исходного значения для песка с примесью карбоната кальция 0,25% до 46% ($CaCO_3$ — 5%).

Влияние скорости фильтрации растворов на кольматацию песков изучалось при двух ее исходных значениях (70 и 36 см/ч). Для большей наглядности по оси абсцисс соответствующего графика (см. рис. 2, б) отложено отношение объема прошедшей через песок

жидкости к весу твердого тела (Ж:Т). Результаты опытов показали, что при меньшей скорости фильтрации взаимодействие H_2SO_4 с $CaCO_3$ протекало полнее и длилось дольше, чем этого можно было бы ожидать исходя из соотношения скоростей. Сильнее проявилась и газовая кольматация. Скорости фильтрации в конце опытов совпадали. Это свидетельствовало о том, что количество прореагировавших веществ в обоих случаях было одинаковым.

Полученный экспериментальный материал позволяет сделать следующие выводы:

1. Наибольшее снижение фильтрационных свойств происходит при выделении газа. Однако газовая кольматация имеет временный (обратимый) характер, так как образующийся газ выносится из пласта как путем фильтрации в виде самостоятельной фазы, так и в растворенном состоянии. Величина снижения дебита жидкости определяется в основном количеством выделившегося в порах свободного газа, которое зависит от содержания карбонатов. При большей концентрации кислоты то же количество газа выделяется быстрее, что приводит к более резкому (хотя и кратковременному) ухудшению фильтрационных свойств пласта.

2. Химическая кольматация поровых каналов гипсом не столь значительна, как газовая, но в отличие от нее имеет необратимый характер. Она контролируется исходным содержанием карбонатов и не зависит от концентрации находящейся в избытке серной кислоты.

3. Для улучшения водопроницаемости пласта с повышенным содержанием карбонатов процесс подземного выщелачивания серной кислотой следует по возможности проводить в таких условиях, которые определяют минимальное образование газовой фазы. Этому могут способствовать повышение гидростатического давления жидкости в пласте и снижение исходной концентрации кислоты.

4. Увеличение дебитов скважин (и соответственно скорости фильтрации растворов) также приводит к меньшему проявлению газовой кольматации.

Поступило в Редакцию 16/XI 1970 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. П. Зефирова. Processing of Low Grade Uranium Ores. Vienna, IAEA, 1967.
2. В. Г. Бахуров, С. Г. Вечеркин, И. К. Луценко. Подземное выщелачивание урановых руд. М., Атомиздат, 1969.
3. Б. В. Невский, В. Г. Бахуров. «Атомная энергия», 27, 495 (1969).
4. Н. В. Губкин, А. Т. Десятников, И. К. Руднева. «Атомная энергия», 24, 511 (1968).