

УДК 663.18:669...3

ЧЖЭН ЧЖИХУН<sup>1,2</sup>, Л.Н. КРЫЛОВА<sup>1,\*</sup>, СУН ЧЖЭН ШЮЭ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГОУ ВПО «Национальный исследовательский технологический университет «Московский институт стали и сплавов (МИСиС)», Москва, 119049

<sup>2</sup>Восточный китайский технологический институт, г. Фучжоу

e-mail: krulov@yandex.ru

## Исследование режимов окисления железа (II) иммобилизованной биомассой в сернокислой среде

С целью разработки технологии регенерации окислителя — ионов железа (III) — для выщелачивания металлов из сульфидных и урановых руд в сернокислой среде исследованы режимы окисления железа (II) биомассой аэробных кислотолюбивых хемолитоавтотрофных микроорганизмов, преимущественно бактерий *Acidithiobacillus ferrooxidans*, сконцентрированных путем адсорбционной иммобилизации на неподвижных твердых носителях (цеолите и древесной стружке) в биореакторах колонного типа. В результате исследований определено влияние на скорость окисления железа способа подачи воздуха для аэрации (в раствор, направляемый на биоокисление, или непосредственно в биореактор), расхода воздуха на аэрацию в зависимости от скорости подачи окисляемого раствора, способа подачи этого раствора (в верхнюю или нижнюю часть реактора) и применяемого носителя для иммобилизации микроорганизмов.

*Ключевые слова:* бактерии, иммобилизация, концентрация, микроорганизмы, направление движения раствора, носитель, окисление железа (II), расход воздуха, скорость окисления, скорость подачи раствора, способ аэрации.

Окисление железа микроорганизмами позволяет с наименьшими затратами регенерировать эффективный окислитель — ионы железа (III) в сернокислой среде и активно используется в гидрометаллургии для выщелачивания цветных металлов из сульфидных руд и концентратов, а также урана из упорных руд. Значительно повысить скорость окисления железа позволяет концентрирование микробных клеток путем адсорбционной иммобилизации на твердых материалах.

По литературным данным, окислительная активность иммобилизованных клеток *Acidithiobacillus ferrooxidans* в 3—50 раз больше, чем неприкрепленных, свободно плавающих бактерий. В отдельных случаях скорость окисления достигает

78 г/л · ч [1, 2]. На количество и прочность прикрепления железокисляющих микроорганизмов влияют физико-химические свойства используемых носителей [3, 4]. Прикрепленные бактерии с высокой скоростью окисляют железо при значении pH 1,6—1,8 [5, 6] и расходе воздуха 1—3 объема на 1 объем носителя в 1 мин [7, 8]. Большинство исследований выполнено при поступлении раствора в биореактор снизу [7] и подаче воздуха либо в этот раствор [4], либо в нижнюю часть реактора [8].

Цель данной работы состояла в исследовании различных режимов окисления железа иммобилизованной биомассой, обеспечивающих наибольшую скорость процесса, с целью разработки эффективной технологии регенерации окислителя.

Чжен Чжихун, Крылова Любовь Николаевна, Сун Чжен Шюэ.

\* Автор для переписки.

## УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

**Материалы, микроорганизмы.** Исследования проводили в биореакторах из оргстекла колонного типа объемом 1,1 л, высотой 550 мм и внутренним диаметром 50 мм. Раствор в биореактор подавался насосом, аэрация воздухом обеспечивалась с помощью компрессора. Для иммобилизации микроорганизмов применяли недорогие и доступные материалы, ранее с этой целью не применявшиеся, — цеолит (из природного месторождения, Китай) с размером частиц 2—5 мм и древесная стружка (получена в лаборатории) размером 5—50 мм. В биореакторы до уровня 520 мм загружали либо 1300 г цеолита, причем объем биореактора, не занятый материалом, составлял 340 мл, либо 60 г стружки, причем свободный объем составлял 830 мл.

Для исследований использовали ассоциацию ацидофильных железоокисляющих микроорганизмов, преимущественно бактерий вида *Acidithiobacillus ferrooxidans* из коллекции микроорганизмов кафедры обогащения НИТУ МИСиС.

**Иммобилизация биомассы.** Концентрирование биомассы на материалах, находящихся в биореакторах, проводили путем многократного прокачивания исходного раствора с инокулятом (культуральной средой, содержащей активные бактерии *A. ferrooxidans* в концентрации  $(0,6—1,0) \cdot 10^5$  кл/мл) до достижения стабильного увеличения скорости окисления железа в количествах, использованных в экспериментах. При иммобилизации биомассы суспензию микроорганизмов подавали в нижнюю часть биореактора; из верхней части биореактора происходил отток жидкости и возвращение ее в емкость с исходной суспензией. Эта жидкость циркулировала через биореактор до момента, когда концентрация железа (II) в вытекающем растворе снижалась до 0,1—0,5 г/л, после чего цикл завершался и проводили смену раствора. Воздушный поток для аэрации воздухом направляли в емкость-сборник раствора, поступающего в биореактор, или в нижнюю часть биореактора.

**Эффективность накопления биомассы на носителях** в биореакторе за один цикл оценивали по средней скорости окисления железа, рассчитываемой как разница между концентрацией железа (II) в исходном растворе и в вытекающем растворе в конце цикла, деленная на продолжительность цикла. Иммобилизация биомассы на носителе прекращалась после того, как средняя скорость окисления железа в биореакторе начинала устойчиво возрастать без дополнительного введения инокулята.

**При изучении режимов биоокисления железа** иммобилизованной биомассой исходный рас-

твор прокачивали через биореактор только один раз; вытекающий раствор собирали в отдельную емкость. На биоокисление подавали раствор сернокислой питательной среды Сильвермана — Лунгрена 9К следующего состава, г/л:  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  — 44,2;  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  — 3,0;  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  — 0,5;  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  — 0,5;  $\text{KCl}$  — 0,1;  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  — 0,01;  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (10 н.) — 1 мл; исходное значение pH составляло около 1,6. В процессе окисления анализировали концентрацию железа (II) трилонометрическим титрованием [9], а также контролировали значение pH ионометрическим методом. Величину pH 1,6 поддерживали добавлением серной кислоты. Все исследования выполнены при температуре 25—28°, концентрацию железа (II) анализировали вплоть до ее снижения до нуля.

**Эффективность режима биоокисления** оценивали по скорости окисления железа (II), определяемой после установления постоянного значения концентрации железа (II) в вытекающем из биореактора растворе (рассчитываемой как разница концентрации железа (II) в исходном и в вытекающем из биореактора растворе, измеренной одновременно, деленная на время, за которое раствор протекает через биореактор).

Схема установок, использованных для изучения окисления железа (II) иммобилизованной биомассой, приведена на рис. 1.

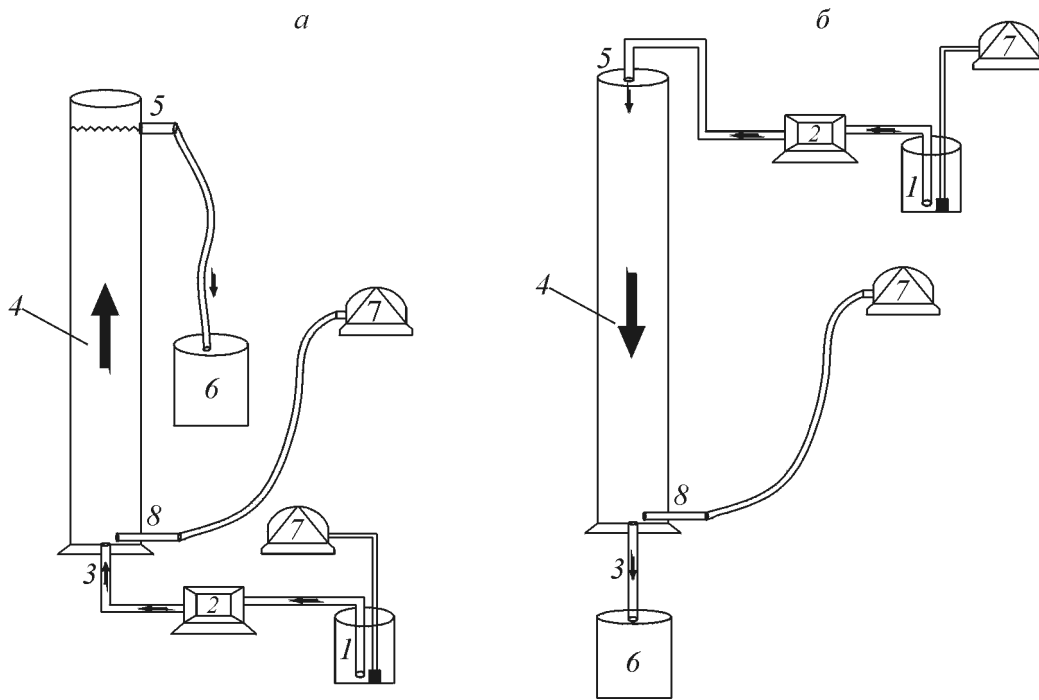
## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### Иммобилизация биомассы на носителях

Для иммобилизации биомассы на носителях в каждом цикле использовали 1,7 л исходного раствора, скорость подачи которого в биореакторы составляла 0,5 л/ч, расход воздуха, подаваемого в раствор или в биореактор, составлял 1,5 л/мин. На биоокисление подавали культуральную жидкость, разбавленную питательной средой в 5—10 раз. В каждом следующем процессе биоокисления происходило разбавление культуральной жидкости вдвое (на 50%). При осуществлении последних 2—3 циклов инокулята не добавляли, так как достигалось устойчивое увеличение скорости окисления железа (рис. 2).

При фиксации биомассы на носителях средняя скорость окисления железа увеличивалась почти в каждом последующем цикле иммобилизации и достигала наибольшего значения в последних (см. рис. 2).

Несмотря то, что количество стружки в биореакторе было почти в 20 раз меньше, чем цеолита, для достижения необходимой концентрации биомассы на древесной стружке потребовалось

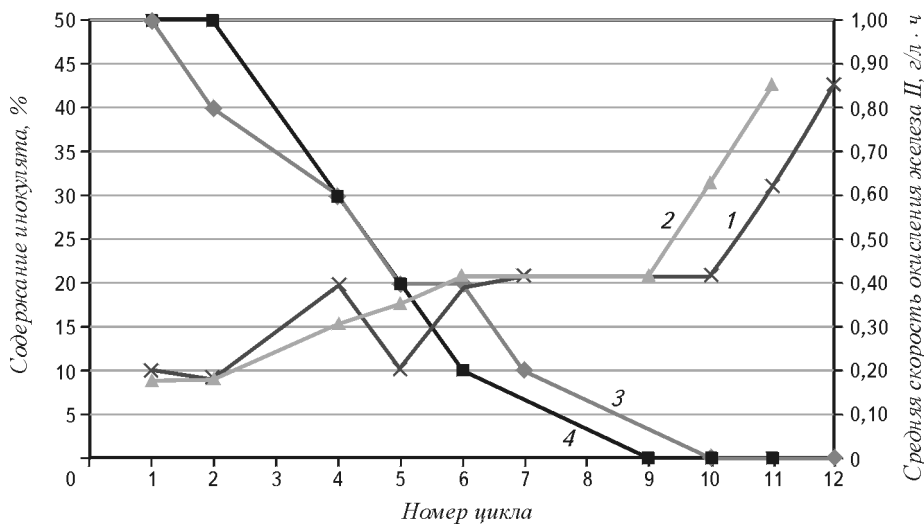


**Рис. 1.** Схема установок, использованных для изучения режимов окисления железа иммобилизованной биомассой: *а* — движение раствора снизу вверх; *б* — движение раствора сверху вниз; 1 — емкость исходного раствора; 2 — перистальтический насос; 3 — вход исходного раствора (выход); 4 — биореактор с иммобилизатором; 5 — выход (вход) раствора; 6 — емкость-сборник вытекающего раствора; 7 — компрессор воздуха; 8 — вход воздуха

меньше циклов со сменой раствора — 9, чем на цеолите — 10 (см. рис. 2); продолжительность иммобилизации биомассы на обоих материалах составила 19 сут. На основании этих данных можно заключить, что на древесной стружке микроорганизмы адсорбируются интенсивнее, чем на цеолите.

### Сравнение эффективности способов аэрации

Изучали 3 способа подачи воздуха в биореактор: аэрация раствора, подаваемого в биореактор, аэрация самого биореактора, и аэрация и раствора, и биореактора.



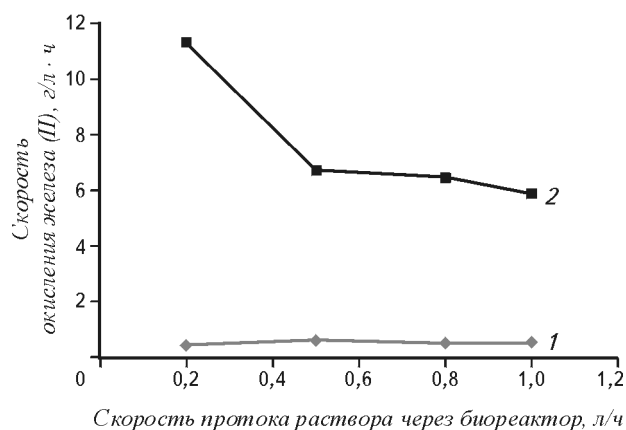
**Рис. 2.** Иммобилизация биомассы на твердых носителях в биореакторе: 1, 2 — средняя скорость окисления железа за цикл; 3, 4 — содержание инокулята в исходном растворе; 1, 3 — иммобилизация на цеолите; 2, 4 — иммобилизация на древесной стружке

Влияние способа аэрации на окисление железа иммобилизованной биомассой исследовано при подаче воздуха в раствор и в биореактор со скоростью 1,5 л/мин, а раствора в биореактор — от 0,2 до 1,0 л/ч. Эти параметры были выбраны на основе ранее выполненных исследований. В качестве носителя при этом применяли цеолит, так как при использовании древесной стружки интенсивность биоокисления при всех режимах аэрации была примерно одинаковой.

Скорость окисления железа при подаче раствора в нижнюю часть биореактора и при аэрации только исходного раствора не превышала 0,6 г/л · ч (рис. 3, кривая 1, табл. 1), что свидетельствует о недостаточности имеющегося кислорода для окисления железа иммобилизованной биомассой.

Зависимость продолжительности протекания раствора через биореактор от скорости подачи раствора в нижнюю часть биореактора не является прямо пропорциональной. Так как при увеличении скорости подачи раствора в биореактор продолжительность протекания раствора через биореактор уменьшается (см. табл. 1), можно было бы предположить, что и скорость окисления железа должна также уменьшаться. Наблюдаемое повышение скорости окисления железа при увеличении скорости подачи раствора в биореактор при аэрации только исходного раствора может объясняться продолжением адсорбции микроорганизмов из раствора на материале-носителе.

При аэрации как раствора, подаваемого в биореактор, так одновременно и биореактора скорость окисления железа в 11,1—26,3 раз больше, чем при аэрации только раствора (см. табл. 1 и рис. 3). При этом с увеличением скорости подачи раствора в биореактор с 0,2 до 0,5 л/ч скорость окисления железа снижается в 1,7 раза, при даль-



**Рис. 3.** Влияние различных способов аэрации на скорость окисления железа при подаче раствора в нижнюю часть биореактора: 1 — аэрация раствора, подаваемого в биореактор; 2 — аэрация раствора и биореактора

нейшем увеличении подачи раствора с 0,5 до 1,0 л/ч — скорость окисления железа снижается в 1,1 раза (см. табл. 1).

Таким образом, аэрация биореактора и раствора значительно эффективнее, чем аэрация только раствора, подаваемого в нижнюю часть биореактора с иммобилизованной биомассой, поэтому целесообразно использовать подачу воздуха только в биореактор.

При подаче раствора в верхнюю часть биореактора достигается высокая скорость окисления железа (II) иммобилизованной биомассой даже без принудительной аэрации — 27,3 г/л · ч, что в 2,4 раза больше, чем максимальная скорость окисления железа при подаче раствора в нижнюю часть биореактора и аэрации раствора и биореактора (см. табл. 1 и табл. 2). Полученные данные

Таблица 1

**Влияние способа аэрации на окисление железа (II) иммобилизованной биомассой при подаче раствора в нижнюю биореактора**

Скорость подачи раствора в биореактор, л/ч	Аэрация			
	исходного раствора		раствора и биореактора	
	Время протекания раствора через биореактор, мин	Скорость окисления железа (II), г/л · ч	Время протекания раствора через биореактор, мин	Скорость окисления железа (II), г/л · ч
0,2	112	0,43	74	11,31
0,5	50	0,60	40	6,68
0,8	30	0,50	20	6,45
1,0	22,5	0,53	17	5,87

(см. табл. 2) свидетельствуют о том, что в режиме подачи раствора в верхнюю часть биореактора с иммобилизованной биомассой со скоростью 0,5 л/ч

— аэрация раствора неэффективна, скорость окисления железа одинакова при и без аэрации в течение 3 сут — 27,3 г/л · ч;

— скорость окисления железа при аэрации только биореактора (32,7 г/л · ч) на 16% выше, чем при аэрации раствора (27,3 г/л · ч) и одинаковом расходе воздуха 1,5 л/ч или даже в отсутствие аэрации;

— прекращение аэрации биореактора и раствора на 1 ч приводит к снижению скорости окисления железа (с 31,6 г/л · ч до 28,9 г/л · ч).

При скорости подачи раствора 1,0 л/ч и аэрации биореактора скорость окисления железа на 17% больше, чем без аэрации (32,7 г/л · ч против 27,9 г/л · ч), т.е. тенденция, отмеченная при скорости подачи раствора 0,5 л/ч, сохраняется.

Таким образом, при подаче раствора в верхнюю часть биореактора биоокисление происходит интенсивно даже без принудительной аэрации и при использовании одинакового способа и режима аэрации достигается большая скорость окисления железа иммобилизованной биомассой, чем при подаче раствора в нижнюю часть биореактора.

### Расход воздуха на аэрацию

Исследовали влияние расхода воздуха на скорость окисления железа (II) иммобилизованной биомассой при подаче раствора в нижнюю часть биореактора как наиболее часто используемый режим работы при иммобилизации биомас-

сы) при уровне аэрации 0,5—2,75 л/мин. С увеличением расхода воздуха на аэрацию биореактора скорость окисления железа микроорганизмами, иммобилизованными и на цеолите, и на древесной стружке, повышается (табл. 3).

При расходе воздуха 1,5 л/мин и скорости подачи раствора 1,8 л/ч скорость окисления железа биомассой, иммобилизованной на цеолите, в 24,4 раза, на древесной стружке в 17 раз больше, чем в отсутствие аэрации и скорости подачи раствора 1,0 л/ч (см. табл. 3). При увеличении расхода воздуха до 2,75 л/мин в реакторе с цеолитом скорость окисления повышается еще в 1,3 раза и достигает 16,9 г/л·ч, а на древесной стружке — увеличивается в 1,64 раза до 7,5 г/л·ч. Скорость окисления железа бактериями, иммобилизованными на цеолите при  $Q = 2,75$  л/мин и  $v_p = 1,8$  л/ч в 2,0—2,8 раза больше, чем на древесной стружке при прочих схожих параметрах (см. табл. 3). Время протекания раствора через биореактор со стружкой в указанных условиях в 3 раза больше, чем с цеолитом, так как в биореактор стружки загружается меньше, чем цеолита, а свободный объем биореактора, незанятый стружкой, в 2,44 раза больше свободного объема, незанятого цеолитом. Разница концентрации железа (II) в поступающем и вытекающем растворе с использованием биомассы, иммобилизованной на цеолите, во всех вариантах меньше, чем на древесной стружке; при этом скорость окисления железа на цеолите всегда больше, чем на стружке, так как время протекания раствора через биореактор со стружкой и соответственно контакта раствора с находящейся там биомассой меньше, чем в случае с цеолитом и степень биоокисления ниже.

Таблица 2

### Влияние способа аэрации на скорость окисления железа иммобилизованной биомассой при подаче раствора в верхнюю часть биореактора (расход воздуха 1,5 л/мин)

Скорость подачи раствора, л/ч	Способ аэрации	Скорость окисления железа, г/л·ч
0,5	Аэрация раствора, подаваемого в биореактор	27,3
0,5	Аэрация раствора прекращена за 3 дня до измерений	27,3
0,5	Аэрация биореактора и раствора	31,6
0,5	Аэрация биореактора и раствора прекращена за 1 ч до измерений	28,9
1,0	Без аэрации	27,9
1,0	Аэрация биореактора	32,7

**Влияние расхода воздуха на скорость окисления железа иммобилизованной биомассой (подача раствора в нижнюю часть биореактора)**

Режим окисления	Параметры	Носитель		Кратность изменения параметра
		Цеолит	Древесная стружка	
$Q = 0,0$ $v_p = 1,0$	$t$	22 мин 30 с	67 мин	2,97↓
	$C_{вх} - C_{вых}$	0,2 г/л	0,3 г/л	1,5↓
	$v$	0,53 г/л·ч	0,27 г/л·ч	1,96↑
$Q = 1,5$ $v_p = 1,8$	$t$	8 мин 35с	25 мин 30 с	2,97↓
	$C_{вх} - C_{вых}$	1,85 г/л	1,95 г/л	1,05↓
	$v$	12,93 г/л·ч	4,59 г/л·ч	2,81↑
$Q = 2,75$ $v_p = 1,8$	$t$	8 мин	23 мин 55 с	2,98↓
	$C_{вх} - C_{вых}$	2,25 г/л	3,0 г/л	1,33↓
	$v$	16,88 г/л·ч	7,53 г/л·ч	2,24↑

Обозначения:  $Q$  — расход воздуха на аэрацию, л/мин;  $v_p$  — скорость подачи раствора;  $t$  — время протекания раствора через биореактор;  $C_{вх} - C_{вых}$  — разница концентрации железа (II) в подаваемом и вытекающем растворе;  $v$  — скорость окисления железа; ↓ — уменьшение значения параметра; ↑ — увеличение значения параметра при использовании цеолита относительно применения древесной стружки.

**Направление движения раствора в биореакторе**

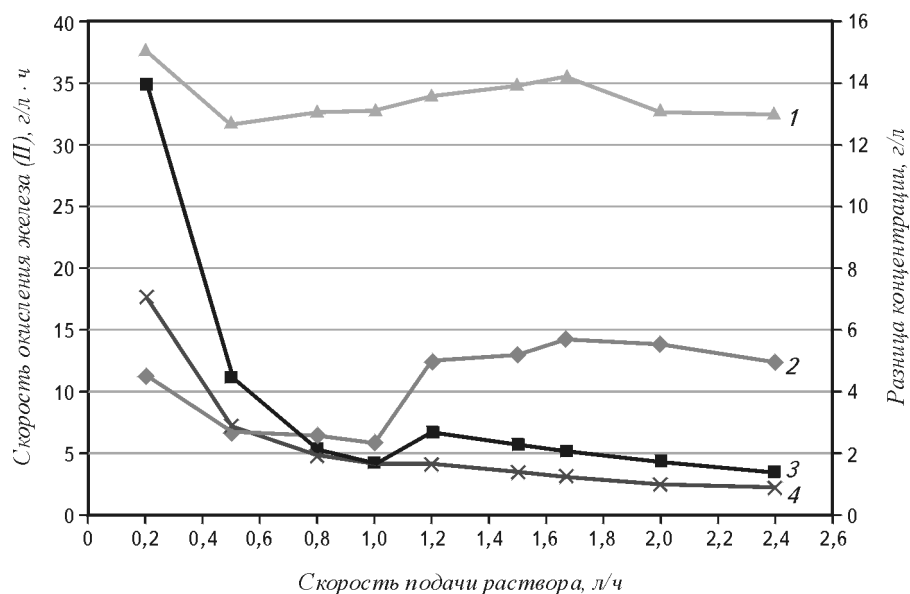
При подаче раствора в нижнюю часть биореактора и соответственно движению раствора снизу вверх разница концентраций железа (II) в поступающем на окисление и вытекающем из биореактора растворе больше, чем при подаче раствора в верхнюю часть биореактора и движении раствора сверху вниз. При этом скорость окисления железа при подаче раствора снизу значительно меньше, чем при подаче сверху. Эти результаты объясняются меньшим временем протекания раствора через биореактор при движении раствора сверху вниз вследствие действия силы тяжести и меньшим временем контакта окисляемого раствора с биомассой, чем при подаче раствора в нижнюю часть биореактора (рис. 4).

При движении раствора в биореакторе сверху вниз максимальная скорость окисления железа достигает 35,5—37,6 г/л · ч, что почти в 2,5 раза больше, чем скорость окисления железа при движении раствора в биореакторе снизу вверх (14,3 г/л · ч).

Большая скорость окисления железа иммобилизованной биомассой при поступлении раствора в биореактор сверху объясняется менее гомогенным заполнением раствором объема биореактора, свободного от материала-носителя, и большим контактом раствора с воздухом, что характерно для подачи жидкости в сосуд сверху вниз.

**Влияние скорости подачи раствора и природы носителя**

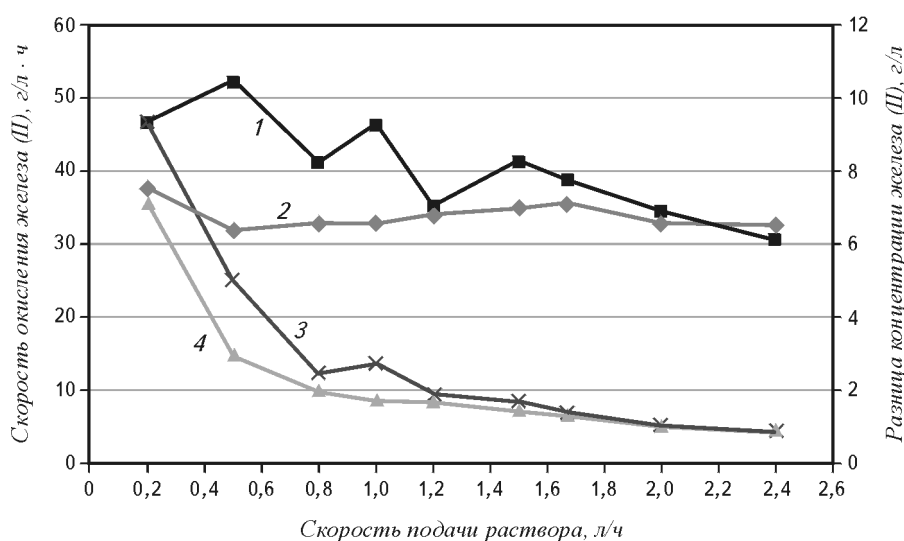
При увеличении скорости подачи раствора в биореактор ожидается, что скорость окисления железа иммобилизованной биомассой должна снижаться, так как продолжительность биоокисления и контакта с биомассой уменьшаются [10]. Полученные результаты свидетельствуют, что при увеличении скорости подачи раствора в верхнюю часть биореактора скорость окисления железа биомассой, иммобилизованной на стружке, изменяется разнонаправленно — то повышается, то снижается, но в среднем имеет тенденцию к снижению, причем это тенденция характерна в большей степени для стружки, чем для цеолита как носителя (рис. 5).



**Рис. 4.** Влияние направления движения раствора в биореакторе на скорость окисления железа (II) биомассой, иммобилизованной на цеолите, при скорости подачи воздуха в биореактор 1,5 л/мин: 1, 2 — скорость окисления железа; 3, 4 — разница концентраций железа (II) в подаваемом в биореактор и вытекающем из биореактора растворе; 1, 4 — подача раствора в верхнюю часть биореактора; 2, 3 — подача раствора в нижнюю часть биореактора

При увеличении скорости подачи раствора в биореактор с 0,2 до 0,8 л/ч разница концентрации железа (II) в подаваемом и вытекающем растворах при использовании обоих носителей снижается с большой скоростью, а при увеличении скорости подачи раствора с 0,8 до 2,4 л/ч снижение замедляется (см. рис. 4), что согласуется с результатами исследований других авторов [9].

При одинаковой скорости подачи раствора в верхнюю часть биореактора, не превышающей 1,2 л/ч, аэрации биореактора и расходе воздуха 1,5 л/мин скорость окисления железа микроорганизмами, иммобилизованными на древесной стружке, в 1,65 раз больше, чем на цеолите, а разница концентрации железа (II) в подаваемом и вытекающем из биореактора растворе на стружке до 30% больше, чем на цеолите.



**Рис. 5.** Влияние скорости подачи раствора в верхнюю часть биореактора на окисление железа при расходе воздуха 1,5 л/мин: 1, 2 — скорость окисления железа; 3, 4 — разница концентрации железа (II) в подаваемом и вытекающем из биореактора растворе; 1, 3 — иммобилизация на древесной стружке; 2, 4 — иммобилизация на цеолите

Различные показатели окисления железа биомассой, иммобилизованной на стружке и цеолите, объясняются различием свойств этих материалов, которые влияют на процесс адсорбции микроорганизмов, а также на уровень аэрации. Древесная стружка — более легкий материал, занимающий меньший объем в биореакторе, чем цеолит; свободный объем в биореакторе в первом случае составляет 0,83 л, а во втором — 0,34 л. При увеличении скорости подачи раствора стружка интенсивнее колеблется в растворе, что может приводить к разрушению образовавшихся при иммобилизации биопленок бактерий на поверхности стружки, вымыванию микроорганизмов из биореактора с потоком раствора и уменьшению количества иммобилизованной биомассы и соответственно скорости окисления железа. Значительные колебания скорости окисления железа при увеличении скорости подачи и протекания раствора могут объясняться нестабильностью микробной ассоциации, вызываемой разрушением биопленок на стружке и их вымыванием, при использовании же цеолита такие процессы не наблюдаются. Показатели окисления железа биомассой, иммобилизованной на цеолите, более стабильны, чем на стружке. Применение для окисления железа биомассы, иммобилизованной на древесной стружке вместе с цеолитом, вероятно, позволит использовать преимущества обоих материалов и нивелировать их недостатки.

Более эффективным способом аэрации при окислении иммобилизованной биомассой является подача воздуха непосредственно в нижнюю часть биореактора в сравнении с аэрацией раствора, поступающего в верхнюю часть биореактора.

Скорость окисления железа иммобилизованной биомассой повышается при увеличении подачи воздуха в биореактор, равной 1,5—2,75 л/мин.

Наибольшая скорость окисления железа (II) иммобилизованной биомассой — 46—52 г/л · ч — достигается при подаче раствора в верхнюю часть биореактора насосом со скоростью 0,2—0,5 л/ч и остается достаточно высокой (27 г/л · ч) даже без принудительной аэрации.

Скорость окисления железа бактериями, иммобилизованными на цеолите, в 2,0—2,8 раза больше, чем на древесной стружке, при одинаковых скорости подачи раствора в нижнюю часть биореактора и расходе воздуха; при подаче раствора сверху скорость окисления с использованием цеолита ~ в 1,65 раз меньше, чем с использованием стружки. При увеличении скорости подачи раствора в верхнюю часть биореактора от 0,2 до 2,4 л/ч скорость окисления железа биомассой, адсорбирован-

ной на древесной стружке, снижается в большей степени, чем адсорбированной на цеолите. Применение цеолита для иммобилизации биомассы позволяет получить более стабильные показатели окисления, чем применение древесной стружки.

Исследования выполнены в рамках соглашения о сотрудничестве между НИТУ «МИСиС» и Восточным китайским технологическим институтом по международному проекту №2011DFR60830.

Получено 11.02.15

## ЛИТЕРАТУРА

1. Zhou Hongbo. Immobilization of *Acidithiobacillus ferrooxidans* and ferric iron production / Zhou Hongbo, Liu Xi, Guo Guanzhou, Liu Jianshe, Chen Xinhua // Transactions of Non-ferrous Metals Society of China. — 2006. — N.16. — P. 931—936.
2. Junfeng, Y. Ferrous sulphate oxidation using *Acidithiobacillus ferrooxidans* cells immobilized in Ceramicbeads / Y. Junfeng, L. Guoliang, C. Wei // Chem. Biochem. Eng. — 2007. — V.21. — N.2. — P. 175—179.
3. Zhang Xiuxia. Study on the selection of immobilized carrier and its performance / Zhang Xiuxia, Qin Lijiao, Huang Congcong, Kong Tiantian, Bai Xuejing, Liu Yongbo // Chem. Ind. Engineer. Prog. — 2011. — V. 30. — N.12. — P. 2781—2786.
4. Гусаков М.С., Крылова Л.Н., Адамов Э.В. Использование иммобилизованной биомассы в биотехнологии извлечения металлов: Сб. мат. VIII Конгресс обогатителей стран СНГ. Т. 1. — М.: МИСиС, 2011. — С.57—60.
5. Gmez, J.M. Immobilisation of *Thiobacillus ferrooxidans* cells on nickel alloy fibre for ferrous sulfate oxidation / J. M. Gmez, D. Cantero, C. Webb // Appl. Microbiol. Biotechnol. — 2000. — N.54. — P. 335—340.
6. Wang Yujian. Ferrous iron oxidation of immobilized *Acidithiobacillus ferrooxidans* / Wang Yujian, Tu Wei, Yang Xiaojuan, Li Hongyu, Tang Deping // Chem. Ind. Engineer. Prog. — 2006. — V.25. — N.8. — P. 954—958.
7. Li Zhizhang. Study on Immobilization of *Thiobacillus ferrooxidans* Oxidation of Fe<sup>2+</sup> / Li Zhizhang, Zhou Xiaosi, Yang Jiawen // J. Kunming Metallurgy College. — 2012. — V.28. — N.5. — P. 5—8.
8. Nemati, M. Effect of ferrous iron concentration on the catalytic activity of immobilized cells of *Thiobacillus ferrooxidans* / M. Nemati, C. Webb // Appl. Microbiol. Biotechnol. — 1996. — N.46. — P. 250—255.
9. Филуннова Н. А. Анализ руд цветных металлов и продуктов их переработки. — М.: Металлургия, 1980. — 224 с.
10. Zheng Huijie. Oxidation of Fe<sup>2+</sup> by immobilized *Thiobacillus ferrooxidans* in packed bed bioreactor / Zheng Huijie, Chen



Xun, Di Jinshen // Petrochemical. Technol. — 2008. — V.37.  
— N.6. — P. 628—632.

ZHENG ZHIHONG<sup>1,2</sup>, L.N. KRYLOVA<sup>1,\*</sup>,  
and SUN ZHANXUE<sup>2</sup>

<sup>1</sup>The National Research Technological University, Moscow Institute for Steel and Alloys (MISiS), 119049, Moscow Russia

<sup>2</sup>The Eastern Chinese Institute for Technology, Fuchjow China

*e-mail*: krulov@yandex.ru

### Investigation of Regimes of Iron (II) Oxidation by Immobilized Biomass in Sulfuric Acid Medium

In order to develop technologies for the regeneration of an oxidant, ions of iron (III), for the leaching of metals from sulfide and uranium ores in sulfuric acid, the oxidation regimes for iron (II) oxidation by biomass of aerobic hemolitoautotrophic acidophilic microorganisms, predominantly the *Acidithiobacillus ferrooxidans* bacteria concentrated by adsorption immobilization on fixed solid carriers in column type bioreactors has been selected. The effect on the oxidation rate of way of aeration (to a solution supplied to the biooxidation, or directly to the bioreactor); aeration air flow rate, depending on the rate of the solution supply to the bioreactor; method for feeding with the solution to oxidize, in the top or bottom part of the bioreactor; feeding rate and carrier material used for the microorganism immobilization (zeolite and wood shavings) was examined.

*Key words*: air flow rate, bacteria, carrier, concentration, direction of flux motion, immobilization, iron (II) oxidation, method of aeration, microorganisms, oxidation rate, solution flow rate.

---

\* Author for correspondence.