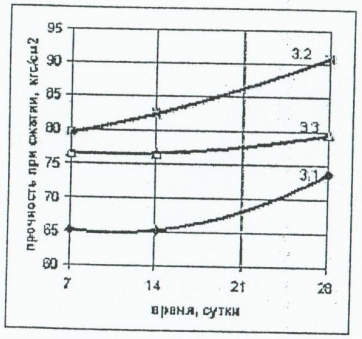

Рис. 6. Зависимость прочности брикетов от времени выдержки на воздухе в нормальных условиях : 3.1-3.3 - номера образцов (см. табл. 2)

$Y_{3.1} = 0{,}029x^2 - 0{,}6088x + 68{,}182$ (7)

$Y_{3.2} = 0{,}0097x^2 + 0{,}2029x + 77{,}652$ (8)

$Y_{3.3} = 0{,}0097x^2 - 0{,}2029x + 77{,}652$ (9)

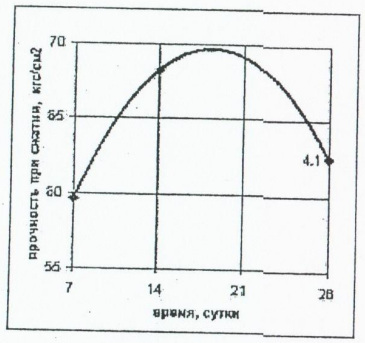

Рис. 7. Зависимость прочности брикетов от времени выдержки на воздухе в нормальных условиях : 4.1 -номера образцов (см.табл.2)

$Y_{4.1} = -0{,}0773x^2 + 2{,}8409x + 43{,}561$ (10)

использован как вяжущий компонент при получении шламосодержащих брикетов с содержанием шлама – 85 %. Введение в шихту от 1 % до 3 % ДП-1 (см. рис. 6) показало, что прочность шламошлаковых брикетов в процессе выдержки возрастает. Максимальную прочность P_{max} =8908,20 кПа приобретают брикеты серии 3.2 с соотношением: "Шлам: шлак: добавка "- 85:13:2. Увеличение содержания добавки ДП-1 до 10 % не даёт положительного эффекта и даже приводит к снижению прочности брикетов на 28 день выдержки (см. рис. 7).

Выводы

1. Самораспадающиеся электроферросплавные шлаки с модулем основности Мо>2 могут быть использованы при окусковании мелкозернистых отходов методом прессования.

2. При прессовании (с усилием Fсж =4,508 кН) самораспадающихся электроферросплавных шлаков прочность полученных брикетов снижается на 45-50 % в течение 20-22 дней при их выдержке в нормальных условиях.

3. Введение в шлак добавки ДП-1 (2 % по массе) позволило повысить прочность брикетов на 50 % после 14 дней выдержки и на 103,6 % после 28 дней довести их прочность до Рсж = 11,136 МПа.

4. Повышение прочности шламосодержащих брикетов обеспечивается путем введения в шихту шлака и добавки (2 % ДП-1).

Библиографический список

1. Лисин В.С., Юсфин Ю.С. Ресурсо-экономические проблемы XXI века и металлургия. – М.: Высшая школа, 1998.- 447 с.

2. Гасик М.И.,Лякишев Н.П. Физикохимия и технология электроферросплавов: Учебник для вузов. – Днепропетровск : ГНПП «Системные технологии», 2005. – 448 с.

3. Бобылев В.П., Таран Ю.Н., Плисковский С.Т. Анализ природоохранной деятельности предприятий черной металлургии Юга страны, стратегии исследований, разработки и практической реализации экологически чистых технологий // Тез. докл. засед. науч. совета ГКНТ СССР "Новые процессы в черной металлургии". – Москва, 1990. - С. 25-27.

4. Таран Ю.Н., Бобылев В.П., Плисковский С.Т. Принцип автотрофности – теоритическая основа концепции создания экологически чистых производственных модулей и многоотраслевых промышленных центров // Всеукр. науч.-практ. конф. "Теория и практика решений экологических проблем в горнодобывающей и металлургической промышленности". - Днепропетровск, 1993. - С. 3.

5. Величко А.Г., Пройдак Ю.С., Бобылев В.П. Экологизация металлургических предприятий и многоотраслевых промышленных центров Украины :Сб. науч. тр. Нац. горного университета. - 2003. -№ 17. Том 2. – С. 616-620.

6. Бобылев В.П. Модульный подход к решению экологических проблем металлургии Украины // Сталь. - 1999. - № 8. - С. 83-86.

7. Бобылев В.П. Разработка рециркуляционной производственной системы с учетом критериев устойчивого развития и принципов техногенной безопасности // Теория и практика металлургии.- 1999. - № 5. - С. 57-60.

8. Бобылев В.П. Теоретические основы и технология утилизации металлосодержащих шламов // Тез. докл. междунар. конф. по проблемам исследования (ARV). Конверсия и экология. Научн. Программа НАТО и стран ассоц. членов. - Днепропетровск, 1997. - С. 46-47.

9. Новиков Н.В.,Соколов К.А.,Капран И.И.,Овчарук А.Н.Исследование химического,минералогического и фазового состава никелевых руд для выплавки ферроникеля // Металлург. и горноруд. пром-сть. - 2005. - № 3.- С. 19-22.

Поступила 20.09.05

УДК 631.4

В.Н. Савосько /к.б.н./, **Н.Я. Стрежеус**
Криворожский государственный педагогический университет
А.П. Нониченко
НМетУ, КМФ

Биоремедиационные технологии в оздоровлении почв Кривбасса, загрязненных тяжелыми металлами

Рассмотрены теоретические основы и современные представления о методах биоремедиации. Обобщены литературные данные о накоплении в почвах Кривбасса техногенных тяжелых металлов. Предложены направления и способы применения методов биоремедиации для оздоровления загрязненных почв Кривбасса. Библиогр.: 9 назв.

почва, тяжелые металлы, биоремедиация, Кривбасс

Введение

Общепризнанно, что современная деятельность человечества сопровождается систематическими и интенсивными эмиссиями в окружающую среду тяжелых металлов, которые в значительных количествах накапливаются в почвах. При этом необходимо подчеркнуть, что аккумуляция металлов в почвах особенно актуальны для индустриальных регионов. В Украине к числу таких регионов относят: Донбасс, Киевскую и Днепропетровскую области, а также Кривбасс [1].

Кривбасс это крупнейший в мире горно-металлургический регион, где более ста лет осуществляется добыча железной руды, ее обогащение, а также функционирует металлургическое производство. Так по данным литературы, ежегодно в атмосферный воздух Криворожья выбрасывается до 150 000 т пыли, которая содержит в своем составе ряд высокотоксичных металлов [1]. Следует отметить, что более 60-70 % выбросов приходится на Криворожский металлургический комбинат [1].

Токсичность тяжелых металлов, а также продолжительность их естественного самовыведения из почв актуализировали разработку и внедрение разнообразных природоохранных мероприятий. В последнее время получили распространение, так называемые, ремедиационные технологии, которые направлены на удаление загрязнителей из почвы. Несмотря на значительное число публикаций, касающихся оздоровления окружающей среды Кривбасса, ряд важных аспектов этой проблемы освящен недостаточно полно. В частности, практически не проработаны вопросы, касающиеся возможности применения микроорганизмов (технологий биоремедиации) для очистки почв региона.

В связи с выше изложенным, представляется важным и актуальным обосновать перспективность использования биоремедиационных технологий для оздоровления загрязненных почв Кривбасса. Рассмотрение этой проблемы и было выбрано целью настоящей работы.

Современные представления о биоремедиации

В отечественной природоохранной деятельности наиболее применяемыми технологиями восстановления нарушенных/загрязненных земель является их рекультивация. Однако следует отметить, что в последнее время в научной литературе также получило широкое распространение термин ремедиация (remediation), который заимствован в наш лексикон из англоязычных публикаций (в основном американских).

Данные литературы свидетельствуют, что появление термина ремедиация совпало с началом девяностых годов прошлого века. Вместе с тем, несмотря на многочисленное и многолетнее применение этого научно-практического понятия, до сих пор в украинской научной литературе отсутствует его общепризнанное определение.

Согласно определению, которое было предложено экспертами Агентства по охране окружающей среды США (Environmental Protection Agency, USA), под ремедиацией подразумевают комплекс мероприятий, приводящих к уменьшению содержания загрязнителей в объектах природы (в основном почвы, грунтовые и поверхностные воды, а также почвенные субстраты). Классически считается, что в ремедиации выделяют три основных направления: фиторемедиация (phytoremediation), хеморемедиация (chemoremediation), биоремедиация (bioremediation) [2]. Выбор названия направления определяется приоритетными агентами, чья деятельность приводит к уменьшению концентраций поллютанов (растения, химические вещества, микроорганизмы).

Обобщенный анализ литературных источников показал, что под биоремедиацией понимают технологии направленные на уменьшение содержания загрязнителей посредством преднамеренного использования культуры микроорганизмов (в основном бактерий) [3].

Установлено, что успешность оздоровления почвы методами биоремедиации обуславливается присутствием следующих экологических факторов: кислорода (для облигатных аэробных бактерий) или его отсутствия (для облигатных анаэробных бактерий); питательных элементов (в основном азота и фосфора); доступной влаги [4]. Помимо вышеотмеченных факторов, эффект очистки почв также зависит от наличия наиболее благоприят-

© В.Н. Савосько, А.П. Нониченко, Н.Я. Стрежеус, 2005 г.

ного диапазона температуры, не токсичных для микроорганизмов концентраций химических веществ, а также достаточного количества соответствующей культуры микроорганизмов [5]. Также отмечается, что биоремедиация загрязненных земель очень медленно протекающий процесс, который в ряде случаев может протекать до пяти лет [2, 3].

Согласно современным представлениям, биоремедиация, как и другие ремедиационные технологии, может реализовываться двумя методами: in-situ (непосредственно в полевых условиях) и ex-situ (в промышленных условиях вне поля). В последнем случае, снимают загрязненный слой почвы, который впоследствии очищают в специальных технологических установках (биореакторах), или компостируют [5].

Обзор литературы показал, что микроорганизмы, применяемые для биоремедиации, используют вещества-загрязнители в своих метаболических процессах. В большинстве случаев поллютанты попросту служат пищей для бактерий [2, 3]. Особенно этот процесс приемлем лишь для высокомолекулярных органических веществ, богатых химическими связями, в то время как механизмы вовлечения тяжелых металлов в метаболизм микроорганизмов несколько иные.

Исследователями отмечается два типа воздействия микроорганизмов на содержание тяжелых металлов в почвах: прямое и опосредованное. При прямом - металлы накапливаются в организмах бактерий в основном в клеточной стенке. Опосредованное воздействие заключается в изменении степени мобильности/доступности этих загрязнителей или их трансформации в летучие соединения.

Как результат многолетних теоретических изысканий и практических апробаций можно рассматривать многочисленные примеры успешного использования биоремедиационных технологий для очистки почв от чрезмерного содержания тяжелых металлов.

Классическим примером может служить способ оздоровления земель, описанный в [6]. Авторами для очистки почв, загрязненных тяжелыми металлами, предложено использовать шламовый реактор биологической очистки (BMSR). В реактор помимо почвы помещали воду, питательные добавки, а также культуру микроорганизмов (Ralstonia metalludurans штамм CH34). Под действием бактерий тяжелые металлы адсорбировались на клеточных стенках микроорганизмов. В дальнейшем очищенная почва осаждалась на дно реактора, в то время как бактерии оставались во взвешенном состоянии. На завершающей стадии работы реактора микроорганизмы извлекались методом флотации или флокуляции. Отмечается, что содержание кадмия в почве после применения описанного метода уменьшилось с 5 до 1 мг/кг, а остальных металлов до 10 раз.

В работе [7] для очистки промышленных отходов и почв, загрязненных углеводородами и тяжелыми металлами, также предложено использование биологического реактора. Главным агентом этого реактора является культура сероокислительных бактерий Thiobacillus thiooxidans штамм AZ11. Авторами отмечается, что при оптимальных условиях в течение 8 дней из почв извлекалось: до 94 % Zn; до 70 Cu; до 54 Pb; до 46 % Cd.

Интересные результаты применения биоремедиации описаны в работе [8] (Индия). Авторами предложено использование культуры грибов Phanerochete chrysosporium. Показано, что в полевых условиях указанные микроорганизмы способны очень интенсивно аккумулировать ряд тяжелых металлов (Cu, Cr, Cd).

В работе [5] обобщены технологии очистки почвы от чрезмерного содержания селена. Рассматривая особенности и перспективность использования для этих целей биоремедиацию, авторы отмечают два основных направления применения микроорганизмов: диссимиляция почвенного селена и образование его летучих соединений. Отмечается, что биореактор, используя культуру Thauera selenatis, способен уменьшить содержание селена в почвах с 50 до 0,2 мг/кг. Для биореактора также перспективно использовать штаммы Pseudomonas stutzeri.

Как известно, особенностью геохимии селена является его способность образовывать летучие соединения. На этом оригинальном его свойстве базируются некоторые биоремедиационные технологии. Так, в полевых условиях, используя культуру Chlorella, удаляли из почвы от 50 до 88 % селена (путем образования диметил-селенида). Отмечается, что максимальные эмиссии селена достигали 800 нг/м² загрязненной почвы. Также необходимо подчеркнуть, что для получения значимого эффекта применения биоремедиационных технологий необходимо было потратить от 118 дней до 100 месяцев.

В общем, многочисленные публикации убедительно показывают инвертальную перспективность и экономическую доступность использования биоремедиационных технологий в индустриальных регионах Украины для оздоровления почв загрязненных тяжелыми металлами.

Тяжелые металлы в почвах Кривбасса

Повышенное содержание тяжелых металлов в почвах Кривбасса неоднократно становилось темой научных публикаций, среди которых четко прослеживаются три основных направления (подходы) к рассматриваемой проблеме: гигиеническое, геологическое и биологическое.

Публикации сотрудников лаборатории промышленной экологии и здоровья (УКРНИИПРОММЕД), а также сотрудников санитарно-эпидемиологических станций различных уровней (районного, городского и областного) составляют первое гигиеническое направление. Авторы рассматривают почву как составную часть среды обитания человека и в данном аспекте анализируют содержание тяжелых металлов в почвах Кривбасса. В этой связи, экологами-гигиенистами изучена особенность загрязнения тяжелыми металлами санитарно-защитной зоны Криворожского металлургического комбината, а также селитебной зоны города. Особое внимание ими уделяется транслокации металлов в миграционные потоки и, особенно, в пищевые цепи. Для этой цели был проведен комплексный анализ накопления металлов в пищевых продуктах растительного и животного происхождения и волосах детей 4-6 лет проживающих в различных районах города.

Научные работы сотрудников экологического центра Криворожской геологической экспедиции и Криворожского отдела геологической экологии НИИ геологии НАН Украины представляют так называемое геологическое направление [9]. Геологи-экологи особое внимание уделяют загрязнению тяжелыми металлами плодородного слоя почвы. Имея в своем распоряжении значительные материально-технические ресурсы, ими выполнен колоссальный объем работ по инвентаризации загрязненных земель Кривбасса, в результате чего была составлена карта загрязнения верхнего (0-20 см) слоя почвы региона. Несомненным научным и практическим успехом экологов-геологов является предпринятая ими попытка увязать содержание тяжелых металлов в различных геологических средах (горные породы, почва, донные отложения) [9].

Статьи биологов составляют наиболее многочисленную группу исследователей, работающих над проблемой повышенного содержания тяжелых металлов в почвах Кривбасса. На эту тему в литературе имеются публикации сотрудников Криворожского государственного педагогического университета, Криворожского ботанического сада НАН Украины, а также Днепропетровского национального университета. В большинстве случаев экологи-биологи рассматривают почву как важнейший миграционный центр биосферы. Поэтому ими особое внимание уделяется не только накоплению тяжелых металлов в верхнем слое почвы, но и их распределению по почвенному профилю. К сказанному необходимо отметить, что биологи-экологи также интересуются закономерностями перехода тяжелых металлов в системе почва-растение.

В общем, многочисленными публикациями убедительно доказано, что почвы Криворожского региона подвергаются интенсивному загрязнению тяжелыми металлами. Основными путями поступления металлов в почвы являются: аэрогенный (с атмосферными пылевыми выбросами) и гидрогенный (с минерализованными грунтовыми водами). Среди тяжелых металлов к числу приоритетных загрязнителей почв региона следует отнести: железо, марганец, цинк, никель, свинец, медь, кадмий, хром.

Уровни накопления техногенных тяжелых металлов в почвах Кривбасса колеблются в достаточно широких интервалах: от 1,5 до 100 единиц предельно-допустимых концентраций (ПДК). Однако в большинстве случаев они составляют 5-15 ПДК. Эпицентрами загрязнения закономерно являются территории, непосредственно прилегающие к крупным промышленным предприятиям: Криворожскому металлургическому комбинату, Криворожским горно-обогатительным комбинатам. Особую зону загрязнения составляют территории, находящиеся в зоне воздействия хвостохранилищ, где имеются участки со значительными уровнями содержания металлов в почвах. В последнем случае превышение контрольных фоновых значений составляет до 40-50 раз.

Также необходимо отметить, что некоторые участки Кривбасса, несмотря на удаление от промышленных предприятий, имеют в почвах достаточно высокие уровни содержания тяжелых металлов. Особенно актуально это для селитебной зоны, в частности территорий жилых массивов и детских дошкольных учреждений. Как было установлено исследованиями, именно такие почвы загрязнены рядом тяжелых металлов, чье содержание до 10 раз превышает контрольные значения.

Перспективы биоремедиации в оздоровлении почв Кривбасса

По нашему мнению биоремедиационные технологии весьма перспективно использовать для санации загрязненных земель Кривбасса. При этом необходимо отметить, что они могут быть применены как методом in-situ, так и методом ex-situ. Однако, исходя из экономической целесообразности, следует считать приоритетными природоохранные технологии, реализуемые непосредственно в полевых условиях (методы in-situ).

В Криворожском регионе в промышленных установках по извлечению тяжелых металлов с помощью микроорганизмов (биореакторах) целесообразно перерабатывать почву в первую очередь приоритетных участков. К числу таких, по нашему мнению, необходимо отнести территории: 1) с максимальными уровнями содержания тяжелых металлов первой группы опасности (свинец, ртуть, хром, никель, цинк); 2) представляющие наибольшую угрозу (максимальный риск) здоровью жителей региона.

Учитывая вышеизложенное, в Кривбассе необходимо провести тщательное исследование почв селитебных территорий, находящихся в зоне аэроэхногенного влияния крупных промышленных предприятий города. Как известно, санитарно-защитная зона Криворожского металлургического комбината включает участки жилой зоны. Почвы этих территорий и им подобных должны в первую очередь подлежать санации методами ex-situ биоремедиации.

Также необходимо отметить, что особого внимания заслуживают почвы детских учебных заведений: детских садов и школ. Как известно, в этих учреждениях происходит непосредственный контакт детей с почвой, что обуславливает интенсивное поступление ее загрязнителей в детский организм. Хотя детские учреждения и строились вдали от основных источников эмиссий, их почвы содержат значительное количество тяжелых металлов. Вот почему по нашему мнению почвы детских учреждений подлежат дополнительным исследованиям

на предмет их загрязнения и последующему оздоровлению методами биоремедиации ex-situ.

В литературе отмечается, что применение in-situ биоремедиационных технологий приоритетно для участков, имеющих комплексное загрязнение: тяжелыми металлами и органическими соединениями [2, 3]. В этом случае органика используется как питательная среда для микроорганизмов, которые осуществляют детоксикацию тяжелых металлов. В Кривбассе такими территориями являются земли, прилегающие к нефтехранилищам (терминалам) и заправочным станциям. Поэтому для их санации также целесообразно и перспективно использовать биоремедиацию методами in-situ.

Особого внимания заслуживают почвы загрязненные тяжелыми металлами гидрогенного происхождения. В Кривбассе такие почвы встречаются в зоне влияния хвостохранилищ горно-обогатительных комбинатов. Особую опасность для состояния окружающей среды региона представляет каскад этих гидротехнических сооружений в районе Южного и Новокриворожского горно-обогатительных комбинатов. С целью повышения эффективности оздоровления земель, подтапливаемых хвостохранилищами, целесообразно сочетать методы биоремедиации с другими подобными технологиями, в частности с хеморемедиацией.

По нашему мнению, еще одним перспективным для Кривбасса применением биоремедиации является ее комплексное использование в восстановлении нарушенных земель методами рекультивации. Как известно, классически рекультивация предусматривает нанесение на поверхности техногенных ландшафтов слоя глины и плодородной почвы. Однако в современных условиях это проблематично с экономической и организационной точек зрения. Поэтому ученые в последнее время интенсивно ищут способы возделывания древесно-кустарниковых культур непосредственно на техногенных субстратах, которые не всегда благоприятны для роста и развития растений. В этой связи, применение биоремедиационных технологий может быть с успехом использовано для уменьшения токсичности для растений субстратов отвалов и хвостохранилищ.

Заключение

Провозглашенный в Рио-де-Жанейро курс на реализацию идей устойчивого развития, как философской основы взаимодействия человечества и окружающей природной среды, требует практической конкретизации. Вот почему так актуальна и важна разработка стратегий и тактики оздоровления загрязненных земель в крупных индустриальных регионах Украины, таких так Кривбасс.

В настоящее время биоремедиация рассматривается как высокоэффективный способ оздоровления почв загрязненных тяжелыми металлами. В последние годы накоплен значительный положительный опыт по успешному применению этой природоохранной технологии в различных регионах мира. Поэтому биоремедиация почв загрязненных тяжелыми металлами может и должна быть использована для санации почв Кривбасса.

В условиях Кривбасса для биоремедиации почв методами ex-situ приоритетными являются территории селитебных зон и детских дошкольных учреждений. Для повышения эффективности использования биоремедиации методами in-situ целесообразно ее сочетание с другими природоохранными технологиями как классическими (рекультивация), так и новаторскими (другими видами ремедиации).

В дальнейшем для повышения инвестиционной и экономической эффективности применения биоремедиации в оздоровлении почв Кривбасса, загрязненных тяжелыми металлами, целесообразно проведение комплексного исследования. Основными задачами будущих изысканий должны быть следующие: 1) подбор и апробация культур микроорганизмов и их штаммов приемлемых для условий региона; 2) уточнение технологий применения биоремедиации для различных территорий региона; 3) организация комплексного экологического менеджмента оздоровления загрязненных земель региона.

Библиографический список

1. Комплексная разработка рудных месторождений / Под. ред. А.Д. Черных. – К.: Техника, 2005. - 376 с.
2. A. Citizen's Guideto Bioremediation. EPA 542-F-96-007/ - Wasyington, DC, 1996. – 9 p.
3. Bioremediation. - EPA-542-R-95-002. - PB95-182911. Washington, DC, 1995. – 45 p.
4. Ibeanusi V.M. Archibold E., Hannon L.T. and all. Bioremediation of Metals from an Acid Mine Drainage at Cane Creek, Coal Valley Site. In: The Sixth International Symposium "In Situ and On –Site Bioremediation". – San Diego, 2001. – P. 190-192.
5. Leszczynska D., Dzurik A., Markey M. Arsenic Contamination in Soil and Groundwater: Review of Remediation Methods. In: Fifth International Symposium and Exhibition on Environmental Contamination in Central and Eastern Europe. – Prague, 2000. – P. 220-228.
6. Диелс Л., Де Смет М., Гойбергс Л. идр. Биовосстановление почв загрязненных тяжелыми металлами с использованием реактора биологической очистки сточных вод // Сем. по анализу, методам обработки и восстановлению загрязненных почв и подземных вод. – Париж, 2001. – С. 97-98.
7. Bumhan Bae, Kyung-Sook Cto, Sung-Jae Lee at all. Remediation of Sediments Ccontaminated with Pahs and Heavy Metals Using a Sequental Biosurry Reactor. – In: The Sixth International Symposium "In Situ And On-Site Bioremediation". – San Diego, 2001. – P. 15.
8. Pakshirajan K., Swaminathan Heavy Metal Removal byBiosorptionUsiong Pyanerochaete Chrysosporium. In: Fifth International Symposium fnd Exhibition on Environmental Contamination in Central and Eastern Europe. – Prague, 2000. – P/ 273.
9. Малахов И.М., Маяков И.Д., Храмцов В.А., Могилевский Л.М. Геолого-экологические исследования почв Кривбасса и прилегающих районов // Металлург. и горноруд. пром-сть. - 2000. - № 3. - С. 100-102.

Поступила 04.08.05

УДК 669.054.8

И.С. Долгополов /к.т.н./, В.Т. Тучин, А.В.Чернышов, А.С. Минаева
Днепродзержинский государственный технический университет
В.А. Носков /д.т.н./
Институт черной металлургии НАН Украины

Топологоэксергетический анализ параметров агрегата для сушки промышленных отходов (сообщ. 2)

Приведены аналитические выражения диссипаторов эксергии в сушильном агрегате для металлической стружки. Получены аналитические зависимости критериев реальной эксергетической эффективности рассмотренного агрегата (*TD* и $\eta_{ер}$ – критерии). Табл. 1. Библиогр.: 3 назв.

Металлическая стружка, сушка, сушильный агрегат, математическая модель, эксергия, топологоэксергетический анализ

Введение

В первом сообщении статьи представлена идеология топологоэксергетического моделирования сушильного радиационно-конвективного агрегата для сушки промышленных отходов, в частности, металлической стружки [1]. Разработаны кодовая диаграмма и топологоэксергетическая структура связи сушильного агрегата, получена система уравнений, отражающая картину эксергетических взаимосвязей и взаимодействий в рассматриваемом агрегате. На основании топологоэксергетического анализа определены зависимости критерия *TD*, характеризующего диссипацию энергии на R^2- элементах, и идеального эксергетического к.п.д. η_e рассматриваемого сушильного агрегата.

Второе сообщение статьи посвящено получению аналитических форм реальных критериев эксергетической эффективности и представлению в развернутой форме диссипаторов эксергии (R^2 – элементов).

Постановка задачи

Для определения зависимостей реальной эксергетической эффективности агрегата от его конструктивно-технологических параметров необходимо раскрыть физический смысл диссипаторов эксергии, получить их аналитические выражения. Затем, используя аналитические формы *TD*–критерия и реального коэффициента $\eta_{ер}$, рассмотреть влияние конструктивно-технологических параметров агрегата на его эксергетическую эффективность, а следовательно, на энергосберегающий аспект решения задачи.

Методика исследований

В сообщении 1 приведен TD-критерий (уравнение (5) [1]), позволяющий определить в аналитической форме отношение обобщенной эксергодиссипативной функции сушильного агрегата к эксергии, введенной в агрегат. Обобщенная эксергодиссипативная функция дает возможность определить суммарную диссипацию эксергии всех видов энергии, используемой в технологическом процессе сушки.

Для получения развернутой формы *TD* - критерия выведены аналитические зависимости для R_i^2 диссипаторов, представленные в таблице. Эти диссипаторы эксергии отражают отношение обобщенного эксергетического усилия к обобщенному потоку на R^2 -элементах

Условные обозначения к таблице:

T_{oc}- температура окружающей среды, К; $s_Г$ - энтропия девальвации природного газа при температуре $T_Г$ и давлении газа $P_Г$, Дж/кг·К [2]; $\dot{m}_{60}$ - массовый расход воздуха на агрегат, кг/с; s_{60} - энтропия воздуха при температуре $T_в$ и давлении $P_в$, Дж/кг·К; s_1 - энтропия продуктов сгорания при температуре $T_{ух}$ и давлении $P_{ух}$ уходящих газов, кДж/кг·К; $\dot{Q}_п$ - поток тепловых потерь от корпуса горелки, Вт; $T_{кг}$- температура корпуса горелки, К; $T_и$- температура излучения горелки, К; $T_м$ - температура материала (стружки), в стационарном режиме принимается равной температуре мокрого термометра, К; $\varepsilon_п$ - приведенная степень черноты системы «излучатель-стружка»; C_o – коэффициент излучения абсолютного черного тела Вт/м²·К⁴; $F_и$ - поверхность излучателя, м²; C_s - средняя удельная массовая теплоемкость уходящих газов, кДж/кг·К; $\dot{Q}_{са}$ - тепловая мощность, поступающая в сушилку, Вт; $T_{са}^{ср}$ - средняя температура по длине барабана, град; $\dot{m}_{21}$ - массовый расход высушиваемого материала, кг/с; C_{21} – удельная массовая теплоемкость высушиваемого материала, кДж/кг·град; $T'_м, T''_м$ - температура материала на входе и выходе сушильного барабана соответственно, К; $T''_{са}$ - температура газа на выходе барабана, К; $\dot{m}_{18}$ - массовый расход испаренной влаги, кг/с; $R_п$ – газовая постоянная пара, Дж/моль·град; $D_ч$- диаметр частиц, м; $M_п$– молекулярный

© И.С. Долгополов, В.Т. Тучин, А.В. Чернышов, А.С. Минаева, В.А. Носков, 2005 г.