

ОБЕЗВРЕЖИВАНИЕ ГЕТЕРОФАЗНЫХ ОТХОДОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УПРАВЛЯЕМЫХ ГАЗОКОНТАКТНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

К.Л. Чертес, Д.В. Зеленцов, О.В. Тупицына, В.Н. Пыстин, О.И. Кондратьев

Самарский государственный технический университет

Рассмотрены методы естественной и принудительной подачи и удаления газов в массивах гетерофазных отходов различной природы, используемые в управляемых газоконтактных технологиях обезвреживания. Дана классификация основных параметров отходов с разделением на группы — механическую, фильтрационную, температурную, химическую и биологическую. На основе анализа параметров предложены обобщенные критерии для определения области возможности применения газоконтактных технологий. Описана реализация технологии управления газовыми потоками, примером которой выступают комплексы биотермической обработки нефтезагрязненных грунтов. Основным элементом подобного комплекса выступает система комбинированной аэрации, которая необходима для повышения скорости биохимического разложения трудноразалагаемых углеводородов в нефтеотходах. Представлены результаты эксперимента, проведенного в рамках расчета и конструирования системы аэрации из-за недостаточности исходных данных. Показана необходимость создания общей теоретической модели управляемых газовых потоков в пористых, водонасыщенных, тугопластичных средах как в естественных условиях, так и под действием искусственного перепада давления.

Ключевые слова: гетерофазные отходы, газоконтактные технологии, биодеструкция, воздухопроницаемость, нефтезагрязненные грунты

Detoxification of Heterophase Wastes Using Controlled Gas-Contact Technologies

K.L. Chertes, D.V. Zelentsov, O.V. Tupitsyna, V.N. Pystin, O.I. Kondratyev

Samara State Technical University, 443100 Samara, Russia

The methods of natural and forced supply and removal of gases in arrays of heterophase wastes of various nature used in controlled gas-contact detoxification technologies are considered. The classification of the main parameters of the waste is divided into groups – mechanical, filtration, temperature, chemical and biological. Based on the analysis of the parameters, generalized criteria for determining the scope of application of gas-contact technologies are proposed. The implementation of gas flow control technology is described, an example of which are complexes biothermal treatment of oil-contaminated soils. The main element of this complex is the combined aeration system, which is necessary to increase the rate of biochemical decomposition of hardly decomposable hydrocarbons in oil waste. The results of the experiment conducted in the framework of the calculation and design of the aeration system due to the insufficiency of the initial data are presented. Shown the need to create a general theoretical model of controlled gas flows in porous, water-saturated, hard plastic media, both in natural conditions and under the action of an artificial pressure drop.

Keywords: heterophase wastes, gas-contact technologies, biodegradation, air permeability, oil-contaminated soils

DOI: 10.18412/1816-0395-2019-02-4-9

При обезвреживании гетерофазных отходов различного вида используют методы естественной и принудительной подачи газов. Данные методы получили широкое распространение в технологиях химического и биотермического окисления органики осадков городских сточных вод, для гомогениза-

ции твердых и пастообразных компонентов, аэрации штабелей нефтезагрязненных грунтов и шламов в смеси с пористыми наполнителями. Естественная и принудительная вытяжка используется для дегазации свалочных тел полигонов твердых коммунальных отходов. Сушка шламов под большим давлением также со-

пряжена с проницаемостью газового потока в пористых и псевдопористых средах различного влагонасыщения. Внедряется в практику метод термического обезвреживания фосфорсодержащих отходов в присутствии инертного газа [1].

Все вышеперечисленные методы требуют не просто по-



Рис. 1. Классификация газоконтактных технологий

Fig. 1. Classification of gas-contact technologies

дачи или отдувки кислорода, азота, углекислоты, аммиака, метана из техногенного массива отходов, но и управления расходом и давлением газовых флюидов в средах с постоянно изменяющимися параметрами пористости, гранулометрии, влажности (водонасыщения), температуры, характера фаз, а также контактного взаимодействия не только на механическом, но и на химическом уровне. Под контактным взаимодействием химической природы понимается образование вторичных соединений в подвергаемых газовому воздействию отходах или массивах на их основе. При этом происходит образование и "схлопывание" новых пор, их наполнение и последующий отток "стехиометрической" влаги разложения органики.

В современной практике обращения с отходами возможность внедрения газоконтактных технологий сдерживается отсутствием системного подхода к оценке и управлению трансфером газовых потоков на этапах их подачи, распределения в среде, сбора и удаления. Без подобного подхода весьма затруднительно конструирование нагнетательного, аэрационного, газодренажного оборудования с его последующим внедрением в инженерные комплексы обезвреживания гетерофазных отходов самой различной природы.

Управление газовыми потоками требует учета огромного количества параметров, а также создания обобщенных критериев оценки состояния системы, ключевыми элементами

которой выступают: нагнетательное устройство, система распределения и сбора, техногенный массив, компоненты окружающей среды.

Применительно к возможности внедрения газоконтактных методов в практику обращения с наиболее крупнотоннажными видами гетерофазных отходов изучены основные параметры их состояния. Данные параметры классифицированы в группы: механическую (прочностную), водо- и воздухофильтрационную, температурную, а также химическую и биологическую (см. таблицу).

Материалы таблицы представляют собой многомерный массив данных. Не все из перечисленных параметров являются главными для создания обобщенных критериев выбора технологии. В качестве таких критериев нами предложены: газодинамический критерий среды — отношение фактической газопроductивности массива к расчетной максимальной; гидродинамический критерий среды — отношение фильтрационных характеристик (коэффициента фильтрации, коэффициента проницаемости) массива к характеристикам природного грунта; критерий проницаемости — отношение воздухопроницаемости массива к воздухопроницаемости аналога на основе природных грунтовых материалов; геоэкологический критерий, показывающий отношение фактической концентрации загрязняющего вещества к его предельно допустимой концентрации в среде (грунт, природная вода, воздух), который

может быть индивидуальным (по конкретному веществу) или обобщенным (по совокупности загрязнителей). Геоэкологический критерий важен как фактор безопасности для геосреды в процессе обращения с отходами, например при учете вторичного загрязнения. Также предлагается использовать уже введенные критерии, в первом приближении к ним относят: геомеханический — соотношение прочностных свойств свалочного грунта и природного [2], органического вещества — отношение концентрации легкоразлагаемой органики в свалочном грунте к общему содержанию органического вещества [2].

Кроме того, был рассмотрен значительный объем видов газоконтактных технологий, применяемых не только в практике обращения с отходами, но и в смежных отраслях, таких как строительство, энергетика, сельское хозяйство, химические технологии. Нами предложено дифференцирование данных технологий на приточные и вытяжные (рис. 1). Приточная технология, в свою очередь, делится на естественную (например, механическое рыхление), принудительную низконапорную и принудительную высоконапорную. Вытяжная технология также делится на естественную (пассивная дегазация) и принудительную (активную). Возможно применение комбинаций данных технологий. Также в отдельной группе предполагается использование газоконтактной технологии с одновременным химическим взаимо-

Основные параметры ПТС
The main parameters of the TCP

Вид отхода	Объект размещения	Параметры											
		Механические			Фильтрационные				Температурные		Химические и биологические		
		$\rho_d, \text{т/м}^3$	$\rho_s, \text{т/м}^3$	$E_d, \text{МПа}$	$w, \%$	$K_f, \text{см/с}$	$m, \%$	$K_{\text{вп}}, \text{кг/(м}^2\text{ч}\cdot\text{Па)}$	$T_{\text{окр}}, \text{°C}$	$T_{\text{отк}}, \text{°C}$	$C_{\text{орг}}, \%$	$\text{CH}_4, \%$	$C_{\text{омч}}, \text{кЛ/г}$
ТБО:													
свежие	Полигон ТБО "Узюково", г. Тольятти	0,3-1,3	0,5-1,5	x	70	x	30-40	x	4,2	12-65	60-70	20	10^6-10^8
1 год	Полигон ТБО "Эколайн", г. Тольятти	0,7-1,4	0,9-1,6	x	<65	x	30-40	x	4,2	12-65	>45	45	10^6-10^8
10 лет	Полигон г. Новокуйбышевска	0,9-1,5	1,1-1,7	2,5-5,5	<50	$8 \cdot 10^{-4}$	35-45	x	4,2	10-50	>35	25	10^6-10^8
50 лет	Рекультивированная свалка "Красный Пахарь", г. Самара	1,6	2,7	3-6	15-35	$7 \cdot 10^{-4}$	40-50	x	4,2	10-40	>25	2	10^6-10^8
Компостируемые нефтегрунты:													
стадия роста температуры	Комплекс биодеструкции Михайловско-Коханского месторождения, Самаранефтегаз	1,5	2,7	1,5-3,5	<55	10^{-4}	40-50	0,0006-0,001	4,2	10-70	>50	x	$>10^7$
стадия высоких температур		1,65	3	1,5-3,5	<55	10^{-4}	40-50	0,0006-0,001	4,2	50-70	>50	x	$>10^7$
стадия снижения температуры		1,8	3,3	2-4	<55	10^{-4}	30-40	0,0005-0,0009	4,2	10-50	>50	x	$>10^7$
Буровые шламы	Ванкорнефть, Красноярский край	1-1,2	1,2-1,3	0,9-1,4	80-95	$5 \cdot 10^{-5}-10^{-4}$	4-7	x	4,2	25-35	>15	x	10^2-10^6
Шламы водного хозяйства	Куйбышевский НПЗ	0,8-1,1	0,9-1,2	0,1-0,3	65-80	$4 \cdot 10^{-5}-6 \cdot 10^{-4}$	8-11	x	4,2	25-30	20-30	x	$<10^9$
Избыточный активный ил	КОС, г. Новокуйбышевск	0,7-0,8	0,9-1	0	45-97	x	20-22	x	4,2	47-62	65-85	x	$<10^{10}$

Примечание. ρ_d — плотность массива, т/м^3 ; ρ_s — плотность частиц, т/м^3 ; E_d — модуль деформации, МПа; w — влажность, %; K_f — коэффициент фильтрации, см/с ; m — пористость, %; $K_{\text{вп}}$ — коэффициент воздухо-проницаемости, $\text{кг/(м}^2\text{ч}\cdot\text{Па)}$; $T_{\text{окр}}$ — температура окружающей среды (средняя за год), $^{\circ}\text{C}$; $T_{\text{отк}}$ — температура отходов, $^{\circ}\text{C}$; $C_{\text{орг}}$ — содержание органического углерода, %; CH_4 — содержание метана в газовой вытяжке, %; $C_{\text{омч}}$ — содержание микрофлоры-редуктора по ОМЧ, кЛ/г ; x — параметр не определяется.

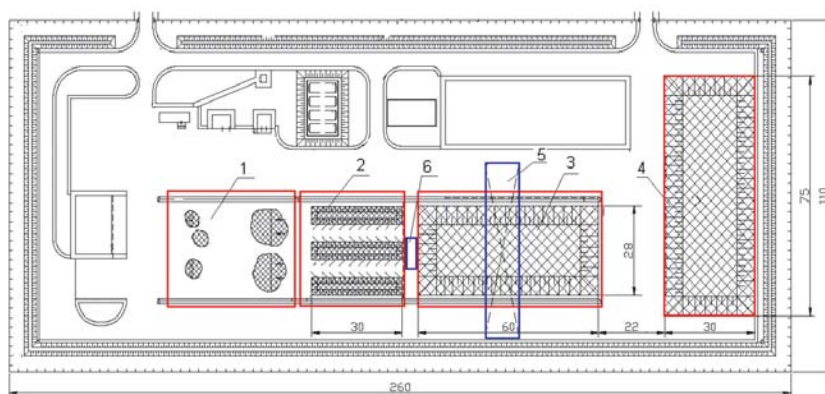


Рис. 2. Схема комплекса биотермической обработки на Михайловско-Коханском месторождении ОАО "Самаранефтегаз":

1 — участок приготовления компостной смеси; 2 — зона непрерывной принудительной аэрации (штабеля инокуляции); 3 — зона периодической принудительной аэрации (штабельно-кавалерной биодеструкции); 4 — зона естественной аэрации без перемешивания (бурт дозревания); 5 — мостовой кран с грейферным ковшом; 6 — воздушные устройства

Fig. 2. Scheme of the complex of biothermal treatment at the Mikhailovskoye deposit of Samaraneftgaz OJSC:

1 — section for preparing the compost mixture; 2 — zone of continuous forced aeration (piles of inoculation); 3 — zone of periodic forced aeration (stacked cavalry biodegradation); 4 — zone of natural aeration without stirring (ripening rim); 5 — overhead crane with grab bucket; 6 — blower devices

действием в системе "газ — техногенная среда". Решение об использовании той или иной газоконтактной технологии должно приниматься на базе теоретических предпосылок, единой методики и рациональных способов реализации.

Разработка теоретических основ и практических методов управления газовыми потоками в отходах как в гетерофазных, пористых, водонасыщенных средах в целях обезвреживания ставит задачу оценки их состояния как многопараметрической природно-техногенной системы (ПТС). Подобная система включает такие компоненты (параметры), как плотность, пористость (величина, характер, заполнение пор (газ или жидкость)), прочностные свойства и т.д. Основные параметры и их численные

значения представлены в таблице.

Обработка массива вышеуказанных параметров требует создания нового или адаптации существующего в смежных отраслях математического аппарата. Кроме того, важной составляющей выступает конструктивно-технологическое оформление процессов аэрации пористых, водонасыщенных, тугопластичных сред с изменяемой за счет химического взаимодействия пористостью.

Примером реализации технологии управления газовыми потоками выступают комплексы биотермической обработки [3, 4] нефтезагрязненных грунтов ОАО "Самаранефтегаз", запроектированные и построенные при участии авторов на Михайловско-Коханском и Горбатовском месторождениях Самарской области [5]. Комплексы биотермической обработки включают функциональные зоны: участки входного контроля, площадки промежуточного размещения, зоны непрерывной принудительной аэрации (инокуляции), периодической принудительной аэрации (штабельно-кавалерной биодеструкции) и естественной аэрации без перемешивания

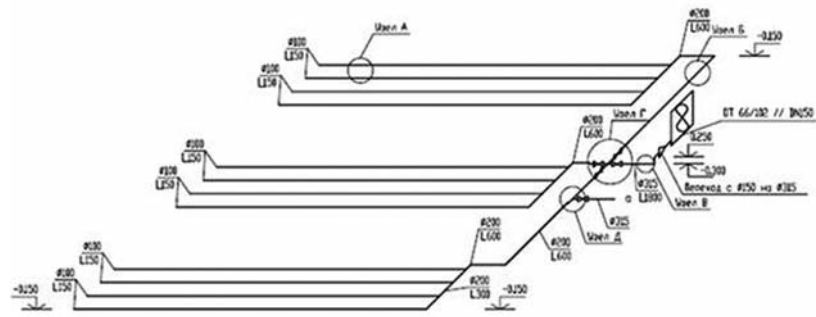


Рис. 3. Схема системы и разрез аэриционного канала высоконапорной аэрации комплекса биотермической обработки на Михайловско-Коханском месторождении ОАО "Самаранефтегаз":

1 – перфорированный аэриционный воздуховод; 2 – бетонный канал для размещения воздуховод; 3 – керамзитовая засыпка; 4 – стальной просечной лист

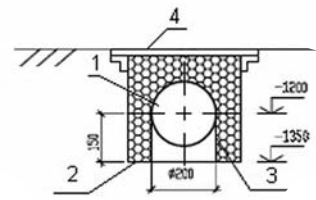


Fig. 3. System diagram and section of the aeration channel of the high-pressure aeration of the biothermal treatment complex at the Mikhailovsky-Kokhanskoye deposit of Samaraneftgaz OJSC:

1 – perforated aeration duct; 2 – concrete channel to accommodate the duct; 3 – expanded clay backfill; 4 – steel clearance sheet

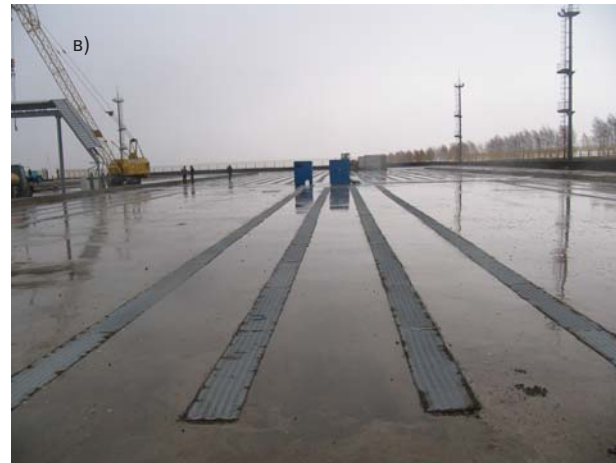
(зона дозревания) (рис. 2). Основными зонами являются зоны принудительной аэрации, в которых за счет применения газоконтактных технологий с химическим взаимодействием происходит деструкция нефтепродуктов в загрязненных грунтах.

Основным элементом комплекса выступает система комбинированной аэрации (принудительной от воздуходувных устройств и естественной механической путем перемешивания).

Система была необходима для повышения скорости биохимического разложения углеводов в нефтеотходах (рис. 3).

Рис. 4. Общий вид и система аэрации комплекса биотермической обработки на Михайловско-Коханском месторождении ОАО "Самаранефтегаз":
а – общий вид комплекса с воздушными каналами; б – воздуходувка для аэрации штабелей; в – аэриционные каналы

Fig. 4. General view and system of aeration of the complex of biothermal treatment at the Mikhailovsky-Kokhanskoye deposit of Samaraneftgaz OJSC:
a – a general view of the complex with air channels; b – blower for stack aeration; c – aeration channels



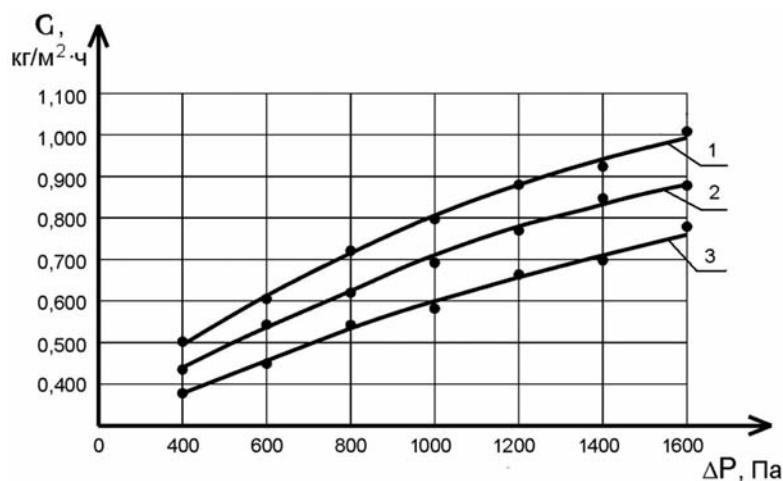


Рис. 5. Экспериментальная зависимость воздухопроницаемости материала от потерь давления:

1 – зона непрерывной принудительной аэрации (штабели инокуляции); 2 – зона периодической принудительной аэрации (штабельно-кавалерной биодеструкции); 3 – зона естественной аэрации без перемешивания (бурт дозревания)

Fig. 5. Experimental dependence of the material air permeability on pressure loss: 1 – zone of continuous forced aeration (piles of inoculation); 2 – zone of periodic forced aeration (stacked cavalry biodegradation); 3 – zone of natural aeration without mixing (ripening rim)

Применение комбинированной системы обуславливалось большими размерами штабелей компостируемого материала (высотой до 8 м), в результате чего аэрация была запроектирована принудительной в нижней части от стационарных воздуходувок (рис. 4, б) в систему перфорированных аэрационных каналов (рис. 4, а, в) и естественной в верхней путем механического перемешивания грейферным ковшом, установленным на мостовом кране (рис. 4, а). При расчете и конструировании системы высоконапорной аэрации: подборе воздуходувок, аэродинамическом расчете каналов, в результате недостаточности исходных данных возникла необходимость в проведении эксперимента.

Полученные экспериментальные данные (рис. 5) показали, что в данном случае процесс аэрации проходит в режиме развитого турбулентного движения с квадратичным законом сопротивления, что можно экстраполировать на аналогичные массивы отходов.

Наиболее распространенными видами отходов выступают ТКО как на стадии их биотермического компостирования в интенсифицированных

заводских аэрационных условиях (заводах по переработке твердых бытовых отходов), так и при анаэробном сбраживании в толще осадков городских сточных вод и родственных им промышленных сточных вод, содержащих биоразлагаемые отходы, нефтегрунты, нефтешламы и т.п.

Для данных отходов применялись и применяются обезвреживание и минерализация. Показатели, необходимые для управления этими процессами, — плотность, влагосодержание, коэффициент фильтрации, модуль деформации, воздухопроницаемость и др. Многие из вышеперечисленных показателей, необходимые для разработки технологии обращения с отходами, недостаточно изучены, например такой важный показатель для управления газовыми потоками, как воздухопроницаемость массивов отходов различного типа на разных временных стадиях (промежутках), что требует проведения эксперимента (см. выше).

Для упрощения решения задачи управления газовыми потоками, снижения зависимости от проведения физических экспериментов, особенно на предварительной стадии, использу-

ется предварительная оценка массивов отходов методом многомерных данных. В связи с чем, в целях повышения эффективности управления газовыми потоками, возникает необходимость дифференциации массивов больших линейных размеров на области различного аэрационного режима:

- интенсивного аэриоза (аэробная);
- замедленного (стесненного) аэриоза;
- аноксидную (денитрификации);
- анаэробную.

Анализ плотных массивов больших линейных размеров показал наличие в них областей со всеми вышеуказанными видами аэрационного режима. Наличие последней области приводит к появлению локальных очагов анаэриоза, возникновение которых должно быть предотвращено. Для предотвращения образования очагов анаэриоза или их ликвидации, а также для интенсификации процессов обезвреживания гетерофазных отходов в остальных областях наиболее предпочтительным методом с технологической и экономической точек зрения является метод биотермического компостирования в условиях комбинированной аэрации [5, 6]. Таким образом, наличие в массиве областей неоднородного аэрационного режима диктует необходимость их выделения в целях управления процессом с использованием наиболее оптимальных технологий.

Аэрация областей интенсивного аэриоза проводится при помощи перемешивающих устройств. Аэрация областей замедленного аэриоза осуществляется за счет принудительной аэрации высоконапорными воздуходувными устройствами. Для предотвращения образования анаэробных областей производится совместная аэрация путем механического перемешивания и принудительной аэрации высоконапорными воздуходувными устройствами.

Таким образом, предварительная оценка методом многомерных данных позволяет выделить в большом количестве видов отходов граничные области, каждой из которых соответствует своя технология управления газовыми потоками, а также их сочетания.

Для свежих ТБО в технологии барабанной обработки на ЗПБО рекомендовано аэробное биотермическое компостирование с механической и низконапорной аэрацией.

Для полуразложившихся ТБО в массивах рекомендована технология дегазации (вытяж-

ки) продуктов распада (биогаза) без механического рыхления (с возможной последующей аэрацией) [7]; для высоконагружаемых комплексов биодеградации нефтепродуктов (НГ, НШ и др.) — высоконапорная аэрация и механическое рыхление.

Для ОСВ рекомендовано обезвоживание, термическая обработка и т.д.

Как показал пример конструирования комплексов биотермической обработки нефтезагрязненных грунтов ОАО "Самаранефтегаз", практически реализовать технологию управ-

ления газовыми потоками в гетерофазной среде возможно, хотя для этого потребовалось провести комплекс теоретических и экспериментальных исследований.

Выходом в данной ситуации является создание общей теоретической модели управляемых газовых потоков в пористых, водонасыщенных, тугопластичных средах в естественных условиях и под действием искусственно создаваемого перепада давления и разработка на основе полученной модели методического обеспечения и конструктивного оформления.

Литература

1. Петрук В.Г., Скоробогач И.Л., Петрук Р.В. Термическое обезвреживание фосфорсодержащих пестицидных препаратов в восстановительной среде. Научные труды ВНТУ. № 3. 2008. С. 1–9.
2. Быков Д.Е., Чертес К.Л., Тупицына О.В., Щербина Е.В., Савельев А.А. Обеспечение геоэкологической устойчивости массивов коммунальных отходов для их строительного освоения. Экология и промышленность России. 2016. Т. 20. № 8. С. 4–11.
3. Пат. РФ № 2250146, МПК 7 В09С1/10. Способ переработки нефтешламов и очистки замасоченных грунтов. Д.Е. Быков, В.А. Бурлака, К.Л. Чертес, М.Ю. Шинкевич; заявитель и патентообладатель Самарский государственный технический университет, № 2004101583/15; заявл. 19.01.04; опубл. 20.04.05. Бюл. № 11. 12 с.
4. Пат. №2450873, Россия: МПК В09С 1/10. Способ переработки нефтешламов и очистки замасоченных грунтов. К.Л. Чертес, Д.Е. Быков, О.В. Тупицына, В.М. Радомский, Н.А. Уварова, О.А. Самарина, Е.П. Истомина, Д.В. Зеленцов; заявитель и патентообладатель Самарский государственный технический университет, № 2010134446/05; заявл. 17.08.10; опубл. 20.05.12. Бюл. № 14. 12 с.
5. Зеленцов Д.В., Чертес К.Л., Быков Д.Е., Тупицына О.В., Гладышев Н.Г. Комплекс биодеструкции нефтеотходов. Экология и промышленность России. 2011. Март. С. 33–34.
6. Чертес К.Л., Быков Д.Е., Тупицына О.В. и др. Интенсивная биотермическая обработка шламовых отходов нефтяного комплекса. Экология и промышленность России. 2010. Март. С. 36–39.
7. Зеленцов Д.В., Савельев А.А., Чертес К.Л. Устройство системы пассивной дегазации массивов существующих объектов размещения отходов. Градостроительство и архитектура. 2015. № 4 (21). С. 100–102.

References

1. Petruk V.G., Skorobogach I.L., Petruk R.V. Termicheskoe obezvrezhivanie fosforsoderzhashchikh pestitsidnykh preparatov v vosstanovitel'noi srede. Nauchnye trudy VNTU. № 3. 2008. S. 1–9.
2. Bykov D.E., Chertes K.L., Tupitsyna O.V., Shcherbina E.V., Savel'ev A.A. Obespechenie geoekologicheskoi ustoichivosti massivov kommunal'nykh otkhodov dlya ikh stroitel'no-khozyaistvennogo osvoeniya. Ekologiya i promyshlennost' Rossii. 2016. T. 20. № 8. S. 4–11.
3. Pat. RF № 2250146, MPK 7 V09S1/10. Spособ pererabotki nefteshlamov i ochistki zamazuchennykh gruntov. D.E. Bykov, V.A. Burlaka, K.L. Chertes, M.Yu. Shinkevich; zayavitel' i patentoobladatel' Samarskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, № 2004101583/15; zayavl. 19.01.04; opubl. 20.04.05. Byul. № 11. 12 s.
4. Pat. №2450873, Rossiya: MPK V09S 1/10. Spособ pererabotki nefteshlamov i ochistki zamazuchennykh gruntov. K.L. Chertes, D.E. Bykov, O.V. Tupitsyna, V.M. Radomskii, N.A. Uvarova, O.A. Samarina, E.P. Istomina, D.V. Zelentsov; zayavitel' i patentoobladatel' Samarskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, № 2010134446/05; zayavl. 17.08.10; opubl. 20.05.12. Byul. № 14. 12 s.
5. Zelentsov D.V., Chertes K.L., Bykov D.E., Tupitsyna O.V., Gladyshev N.G. Kompleks biodestruktsii nefteotkhodov. Ekologiya i promyshlennost' Rossii. 2011. Mart. S. 33–34.
6. Chertes K.L., Bykov D.E., Tupitsyna O.V. i dr. Intensivnaya biotermicheskaya obrabotka shlamovykh otkhodov neftyanogo kompleksa. Ekologiya i promyshlennost' Rossii. 2010. Mart. S. 36–39.
7. Zelentsov D.V., Savel'ev A.A., Chertes K.L. Ustroistvo sistemy passivnoi degazatsii massivov sushchestvuyushchikh ob'ektov razmeshcheniya otkhodov. Gradostroitel'stvo i arkhitektura. 2015. № 4 (21). S. 100–102.

К.Л. Чертес — д-р техн. наук, профессор, Самарский государственный технический университет, 443100 Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская 244, e-mail: chertes2007@yandex.ru • Д.В. Зеленцов — канд. техн. наук, зав. кафедрой, e-mail: dzelentsov@mail.ru • О.В. Тупицына — д-р техн. наук, профессор, e-mail: olgatupicyna@yandex.ru • В.Н. Пыстин — канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, e-mail: vitaliy.pystin@yandex.ru • О.И. Кондратьев — магистрант, e-mail: olkondor95@gmail.com

K.L. Chertes — Dr. Sci. (Eng.), Professor, Samara State Technical University, 443100 Russia, Samara, Molodogvardeyskaya Str. 244, e-mail: chertes2007@yandex.ru • D.V. Zelentsov — Cand. Sci. (Eng.), Head of Department, e-mail: dzelentsov@mail.ru • O.V. Tupitsyna — Dr. Sci. (Eng.), Professor, e-mail: olgatupicyna@yandex.ru • V.N. Pystin — Cand. Sci. (Eng.), Senior Research Fellow, e-mail: vitaliy.pystin@yandex.ru • O.I. Kondratyev — Graduate Student, e-mail: olkondor95@gmail.com