

**ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ФАЗО- И  
СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ, ПРОТЕКАЮЩИХ ПРИ  
СОВМЕСТНОМ ПИРОЛИЗЕ РАСТИТЕЛЬНЫХ ОТХОДОВ  
АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА БЕЛГОРОДСКОЙ  
ОБЛАСТИ С МОНТМОРИЛЛОНИТ СОДЕРЖАЩИМИ  
ГЛИНАМИ**

---

*vesentsev@bsu.edu.ru*

**Везенцев А.И., д-р техн. наук, проф.,  
Перистый В.А., канд. техн. наук, проф.,  
Тохтарь В.К., д-р биолог. наук, проф.,  
Коробов В.А., д-р с-х. наук, проф.,  
Буханов В.Д., канд. вет. наук, доц.,  
Соколовский П.В., канд. техн. наук,  
Перистая Л.Ф., доцент,  
Михайлюкова М.О., аспирант**

*Белгородский государственный национальный  
исследовательский университет*

**Аннотация.** В данной статье представлены результаты фундаментальных исследований по изучению процессов фазо- и структурообразования, протекающих при совместном пиролизе растительных отходов агропромышленного комплекса Белгородской области с местными монтмориллонит содержащими глинами, подтвержденные экспериментальными данными. Дано термодинамическое (термохимическое) описание процессов фазообразования при совместном пиролизе растительных отходов, экранированных монтмориллонит содержащей глиной. Выявлено влияние вещественного состава, текстурных и структурно-морфологических характеристик на сорбционные свойства экспериментальных композиционных сорбентов. Разработаны физико-химические основы способа получения порошкообразных и гранулированных композиционных сорбентов для очистки модельных водных растворов от ионов тяжелых металлов ( $Fe^{3+}$ ), органических красителей (метиленовый голубой (МГ) и конго красный (КК)), условно-патогенных бактерий (тест-культура *Escherichia coli* ATCC 25922) в статическом и динамическом режимах. Выявлены кинетические закономерности очистки модельных водных растворов от ионов тяжелых металлов, органических веществ, условно-патогенных

бактерий экспериментальными сорбентами в статическом и динамическом режимах. Методом биоиндикации в вегетационном опыте на модельных растениях, с использованием листовой ИК-спектроскопии определена эффективность детоксикации почвы от пестицидов при внесении экспериментальных сорбентов.

**Ключевые слова:** синтез, пиролиз, механизм сорбции, исследование процессов, термодинамика, фазообразование, экология, ионы тяжелых металлов, условно-патогенные бактерии, пестициды, композиционный сорбент, отходы растениеводства, агропромышленный комплекс, монтмориллонит содержащие глины.

На сегодняшний день глобальной проблемой человечества является загрязнение окружающей среды. Исследователи всего мира проводят фундаментальные и прикладные исследования, направленные на разработку новых сорбционно-активных материалов для ингибирования воздействия различных поллютантов [1 - 3]. В данной работе на основании разработанной научной гипотезы и проведенных фундаментальных исследований предложены физико-химические основы технологии получения композиционных сорбентов из недорогих сырьевых материалов, имеющихся на территории Белгородской области: монтмориллонит содержащих глин и растительных отходов агропромышленного комплекса (лузги семян подсолнечника). Выбор сырьевых компонентов обусловлен их доступностью, низкой себестоимостью и большими запасами. Кроме того, отходы растениеводства относятся к возобновляемым ресурсам. Оба вида ресурсов имеют широкую сырьевую базу, достаточную для промышленного производства сорбентов на их основе [4, 5]. Процесс получения композиционных сорбентов из данных материалов представляет собой высокоэффективный энергосберегающий пиролиз в среде с ограниченным доступом кислорода. Это обеспечивается тем, что формируется композит из растительных отходов совместно с монтмориллонитовой глиной и подвергается термической обработке. Причем глина обволакивает поверхность растительных отходов, обеспечивая ограничение доступа кислорода, что позволяет вести пиролиз без использования вакуума или среды инертных газов, или азота.

#### **Материалы и метод исследования**

В качестве сырьевых материалов для получения композиционных сорбентов использовалась монтмориллонит содержащая глина

Белгородской области проявления Нелидовка (Корочанский район) и растительные отходы агропромышленного комплекса Белгородской области (лузга семян подсолнечника). На основе сырьевых материалов получены композиционные сорбенты в порошкообразном и гранулированном виде. Способ получения композиционных сорбентов заключался в следующем. Исходную монтмориллонитовую глину (влажностью до 20 масс. %) дополнительно увлажняли до пастообразного состояния и смешивали с лузгой семян подсолнечника таким образом, чтобы глина полностью ее покрывала. Затем полученный композит загружали в фарфоровый тигель и проводили термообработку в интервале температур 20 – 750°C. Температуру, продолжительность термической обработки и массовое соотношение компонентов глина: лузга семян подсолнечника (Г : Л) изменяли для определения оптимальных параметров синтеза композиционного сорбента. Важным моментом являлось то, что для полного предотвращения доступа воздуха к лузге семян подсолнечника, 1/4 часть тигля сверху засыпали монтмориллонитовой глиной влажностью до 15 масс. % и с размером частиц менее 80 мкм. Принципиальная схема получения композиционных сорбентов представлена на рисунке 1. Выбор оптимального режима термической обработки и состава композиционного сорбента производился по выходу конечного продукта в процессе синтеза. При определении оптимальных параметров синтеза композиционного сорбента оценивался массовый выход конечного продукта – композиционного сорбента после проведенного пиролиза при различных температурах и массовом соотношении глина: лузга семян подсолнечника. Результаты представлены на рисунке 2.

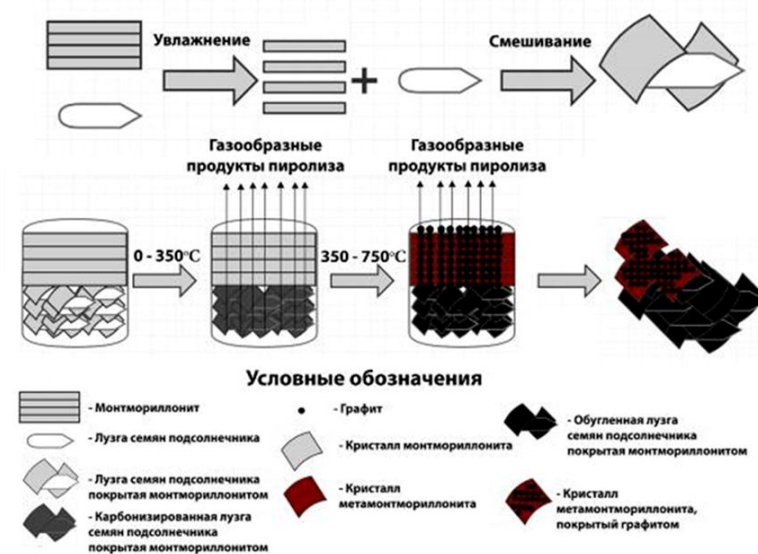


Рисунок 1 – Принципиальная схема получения композиционных сорбентов

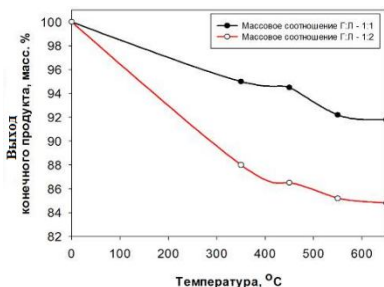


Рисунок 2 – Зависимость выхода конечного продукта – гранулированного композиционного сорбента от параметров синтеза (массового соотношения Г : Л и температуры)

В данной работе проведено термодинамическое описание процессов фазообразования при совместном пиролизе растительного сырья, экранированного монтмориллонит содержащей глиной. С этой целью сконструирована и изготовлена экспериментальная установка пиролиза, схема которой представлена на рисунке 3.

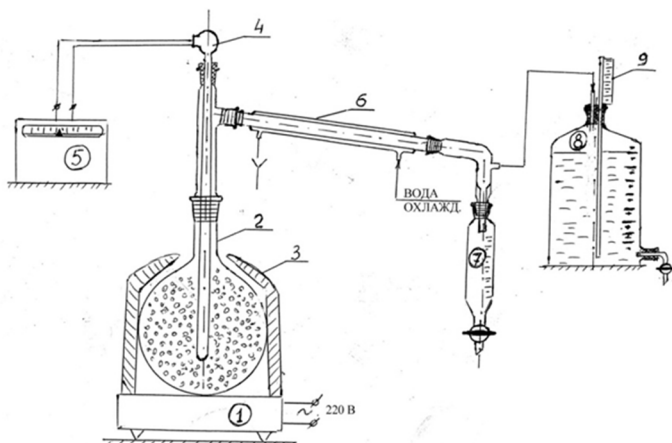


Рисунок 3 – Схема экспериментальной лабораторной установки исследования термохимии фазообразования процесса пиролиза растительного сырья, экранированного монтмориллонит содержащей глиной: 1 – электрообогрев; 2 – термоколба; 3 – термоизоляция; 4 – термопара, ХА; 5 – электронный потенциометр, КСП-4; 6 – холодильник Либиха; 7 – сборник дистиллята; 8 – газосборник; 9 – манометрическая трубка.

С целью изучения теплового режима пиролиза растительного сырья, экранированного монтмориллонит содержащей глиной, была сконструирована и изготовлена термокамера, схема которой представлена на рисунке 4.

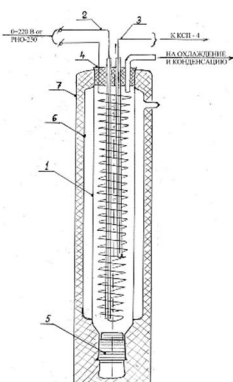


Рисунок 4 – Схема экспериментальной термокамеры для изучения термодинамического (термохимического) режима пиролиза отходов растительного сырья, экранированного монтмориллонит содержащей глиной (1 – корпус термокамеры; 2 – спираль электрическая; 3 – термопара; 4 – пробка уплотнитель; 5 – загрузочное горло; 6 – вакуумная рубашка; 7- термоизоляция)

Исследование адсорбции ионов  $Fe^{3+}$  на порошкообразном композиционном сорбенте проводилось в статических условиях [9], а на гранулированном – в динамических условиях. При проведении эксперимента в динамических условиях раствор, содержащий адсорбтив, пропускался с фиксированной скоростью через колонку, содержащую адсорбент. Фильтрат на выходе из колонки подвергался анализу. Концентрация модельного раствора была установлена по результатам исследования адсорбции ионов  $Fe^{3+}$  в статических условиях. Исходное значение концентрации  $Fe^{3+}$  составило 5 мг/л, что соответствует содержанию железа в поверхностных водах некоторых районов Белгородской области (для питьевой воды ПДК<sub>Fe</sub> = 0,3 мг/л). Скорость фильтрации раствора устанавливается постоянной - 10 мл/мин. Высота слоя сорбента 1 см, масса навески сорбента 10 г, высота слоя жидкости над сорбентом 2 см, диаметр фильтра Шотта 2,9 см. Отбор фильтрата производили по 25 мл и 100 мл, в зависимости от дисперсности сорбента, до полного насыщения сорбента ионами  $Fe^{3+}$ , концентрация ионов  $Fe^{3+}$  в фильтрате становится равной исходной концентрации.

При определении сорбционных свойств композиционных сорбентов по отношению к органическим красителям в динамических условиях использовали метиленовый голубой и конго красный с исходной концентрацией 50 мг/л, которая была определена в ходе эксперимента в статических условиях. Отбор фильтрата производили по 25 мл и 100 мл, в зависимости от дисперсности сорбента до полного насыщения сорбента (концентрация красителей в фильтрате становится равной исходной концентрации).

Выяснение ингибирующего действия разработанных композиционных сорбентов по отношению к патогенным микроорганизмам (тест-культура *Escherichia coli* ATCC 25922) в зависимости от их концентрации осуществляли на мясопептонном агаре (МПА) в статических условиях по методике, описанной ранее [7]. Исследование антибактериальной активности в динамических условиях проводили с использованием сменной фильтрующей кассеты «БАРЬЕР-4» бытового фильтра для очистки воды. Через фильтрующую кассету пропускали модельные растворы питьевой воды, заведомо загрязненных кишечной палочкой (тест-культура *Escherichia coli* ATCC 25922). Опытные и контрольные образцы сорбционно-фильтрующих субстанций в одинаковом количестве (по 3 г) взвешивали на аналитических весах ОНАУС РА-114С (производитель компания ОНАУС Corporation, США) и помещали в воронки с фильтрами Шотта

(воронка фильтровальная ВФ-3, ГОСТ Р 51232-98), через которые производили фильтрацию модельных суспензий кишечной палочки. Размер пор в фильтре Шотта составлял 16-40 мкм (ГОСТ Р 51232-98). Концентрация эшерихий в контаминированных модельных взвешях превышала нормативы ГОСТа Р 51232-98 «Вода питьевая. Общие требования к организации и методам контроля качества». При этом коли-титр был в 100 тыс, 1 млн, 10 млн, 100 млн и 1 млрд раз выше нормы (300 мл питьевой воды содержали 100 тыс, 1 млн, 10 млн, 100 млн и 1 млрд колониеобразующих единиц (КОЕ) эшерихий).

Эффективность детоксикации почвы от пестицидов проверена при внесении в почву порошкообразных и гранулированных композиционных сорбентов. Оценка очищающего действия композиционных сорбентов в почве проведена методом биоиндикации в вегетационном опыте на модельных растениях с использованием листовой ИК-спектроскопии. Данный метод подробно описан в работах [8, 9].

### **Основная часть**

Для изучения процессов фазо- и структурообразования, происходящих при пиролизе лузги семян подсолнечника, экранированной монтмориллонит содержащей глиной, проводили термическую обработку в реторте из нержавеющей стали в интервале температур 20 – 850°C в течение 120 минут [8]. Установлено, что газы (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O) начинают выделяться при температуре 400°C спустя 20 минут после начала процесса пиролиза. Через 30 минут, когда температура достигла 600°C, началось выделение смол, которые представляют собой высоковязкую жидкость темно-коричневого (почти черного) цвета, с резким неприятным кисловатым запахом. Состав смол очень сложный и включает более 50 различных соединений. Спустя 42 минуты при температуре 700°C происходит выгорание органических смол, содержащихся в исходном сырье. На 44 минуте при температуре 800°C происходит выделение горючих газов (CH<sub>4</sub>, CO, H<sub>2</sub>). Установлено, что на протяжении всего процесса пиролиза лузги семян подсолнечника выделяется CO<sub>2</sub> в количестве 56,4 – 65,7 масс.% и CO в количестве 19,2 – 35,5 масс.%. Интенсивное выделение CH<sub>4</sub> начинается через 120 мин от начала термообработки и составляет 10,1 масс.%. Количество H<sub>2</sub> составляет 1,8 – 8,2 масс.%. Выбор оптимального режима термической обработки и состава гранулированного композиционного сорбента осуществлялся по выходу конечного продукта в процессе пиролиза. Основываясь на полученных данных

(рис. 2), сделан вывод о том, что оптимальными параметрами синтеза гранулированных композиционных сорбентов являются: массовое соотношение компонентов Г: Л = 1:1, температура изотермической стадии пиролиза 350 – 450°C. Это обусловлено тем, что увеличивая содержание лузги семян подсолнечника в композиционном сорбенте прочностные характеристики гранул не соответствуют требованиям, предъявляемым к сорбентам, которые используются в динамическом режиме.

С применением разработанных экспериментальной установки (рис. 3) и термокамеры (рис. 4) определены термодинамическое (термохимические) параметры процессов фазообразования при пиролизе отходов растительного сырья, экранированных монтмориллонит содержащей глиной. Термодинамика (термохимия) протекания процесса фазообразования при пиролизе лузги семян подсолнечника, экранированной монтмориллонит содержащей глиной, представлена в таблице 1.

Пересчитав данные таблицы 1 относительно продуктов пиролиза, сделаны выводы о материальном балансе процесса пиролиза относительно лузги семян подсолнечника, экранированной монтмориллонит содержащей глиной, а именно, массовый выход продуктов составил: 18,6 масс. % - газовая фаза пиролиза (плотность ее принята по СО); 34,2 масс. % - жидкий дистиллят (в том числе, смола отстойная 6,4 масс.%); 44,0 масс. % - уголь композитный (твердая фаза). Выходы ацетона, метанола, уксусной кислоты (в пересчете на исходную лузгу семян подсолнечника) составили: 1,09; 2,0 и 6,6 масс. %, соответственно.

Термодинамический (термохимический) режим пиролиза определяли при электронагреве лузги семян подсолнечника, экранированной монтмориллонит содержащей глиной в термокамере (рис. 4). Количество тепловой энергии рассчитывали согласно закону Джоуля – Ленца:  $Q=I^2R\tau$ , где I - сила тока нагревателя термокамеры, А; R – сопротивление, Ом;  $\tau$  – время, с. Полученные результаты представлены в таблице 2.



Таблица 1 – Термодинамика (термохимия) протекания процесса фазообразования при пиролизе лузги подсолнечника, экранированной монтмориллонит содержащей глиной

№ п/п	Температура, °С	Продукты фазообразования пиролиза			Примечание
		газовая фаза пиролиза, л	жидкий дистиллят, мл	композит, г (твердая фаза)	
1	200	0,6	0,3	-	
2	300	6,8	10,2	-	Быстрое повышение температуры
3	400	10,4	31,1	-	Карбонизация
4	500	14,1	34,0	-	Карбонизация
5	600	14,3 <sup>1)</sup>	34,2 <sup>2)</sup>	244,0	Затухание процесса газовой выделения и конденсатовыделения
<p><b>Примечание:</b> <sup>1)</sup> Газовая фаза по окончании пиролиза содержала: CO<sub>2</sub> – 41 об.%; CO – 36 об.%; углеводороды – 19 об.%.  <sup>2)</sup> Жидкий дистиллят по окончании пиролиза содержал: ацетон – 3,5 масс.%; метанол – 5,8 масс.%; кислота уксусная – 31,2 масс.%; смола отстойная – 19 масс.%.         </p>					

Установлено, что общее суммарное количество тепловой энергии, необходимое для осуществления процесса пиролиза, составляет 1,4 кДж на 1 кг композита, полученного из смеси монтмориллонит содержащей глины и лузги семян подсолнечника в массовом соотношении 1 : 2. Причем, процесс пиролиза в промышленных условиях следует проводить при переменном режиме теплопередачи, а именно: эффективный обогрев (подвод тепла) следует осуществлять до достижения температуры 200 - 300°С; при достижении этой температуры необходимо снизить количество подводимой тепловой энергии; при достижении температуры порядка 400 - 450°С необходимо возобновить более интенсивный подвод тепла и закончить нагрев при достижении температуры порядка 600°С.

Таблица 2 – Термодинамический (термохимический) режим пиролиза лужги семян подсолнечника, экранированной монтмориллонит содержащей глиной (массовое соотношение Г: Л = 1:2)

№ п/п	Количество подведенного тепла, кДж/кг	Температура пиролиза, °С	Примечание
1	0,420	150	
2	0,300	250	
3	0,210	320	Начало экзотермии
4	0,085	450	Экзотермия
5	0,380	600	Практически отсутствие экзотермии

Определение сорбционной способности по отношению к ионам  $Fe^{3+}$  (табл. 3) и органическим красителям – метиленовому голубому (МГ) и конго красному (КК) (табл. 4) определяли в динамическом режиме, масса сорбента 10,00 г. Композиционный сорбент использовали с дисперсностью  $d > 200 \mu\text{м}$  и  $67 < d < 200 \mu\text{м}$ .

Таблица 3 – Зависимость динамической обменной емкости (ДОЕ) и удельной очищающей способности от дисперсности сорбента по отношению к ионам  $Fe^{3+}$

V, мл	A	C ф-та, мг/л	ДОЕ, мг/г	Удельная очищающая способность сорбента, мг/г	Степень насыщения сорбента ионами $Fe^{3+}$ , %
Фракция $d > 200 \mu\text{м}$					
0	0	0	0,01	0	0
25	0,17	1,2953		0,0052	25,9
50	0,66	4,9768		0,0147	99,5
75	1,39	4,9814		0,0001	99,6
Фракция $67 < d < 200 \mu\text{м}$					
0	0	0	0,05	0	0
100	0,03	0,1040		0,0001	2
200	0,04	0,2341		0,0001	5
300	0,07	0,4165		0,0002	8
400	0,13	0,9849		0,0006	20
500	0,25	1,9706		0,0010	39
600	0,57	4,6279		0,0027	93
700	0,58	4,7634		0,0001	95

Установлено, что сорбент фракции  $d > 200 \mu\text{м}$  перестает работать при пропускании объема 75 мл, в то время как сорбент фракции  $67 < d < 200 \mu\text{м}$  продолжает работать вплоть до 700 мл. По анализу значений динамической обменной емкости (ДОО) сделан вывод, что для очистки воды от ионов  $\text{Fe}^{3+}$  оптимально использовать композиционный сорбент с размером частиц  $67 < d < 200 \mu\text{м}$ . Для исследования сорбционной способности по отношению к органическим красителям (табл. 4), основываясь на предыдущих выводах, выбран сорбент с размером частиц  $67 < d < 200 \mu\text{м}$ , так как на сорбенте с размером частиц  $d > 200 \mu\text{м}$  сорбция МГ и КК не эффективна. Сорбент фракции  $d > 200 \mu\text{м}$  не удерживает МГ и КК из раствора. Установлено, что сорбент с размером частиц  $67 < d < 200 \mu\text{м}$  способен очистить 1300 мл модельного раствора, содержащего МГ и 1500 мл модельного раствора, содержащего КК.

При оценке антибактериальной активности композиционных сорбентов выявлен тот факт, что соблюдается закон равновесной концентрации в процессе очистки питьевой воды от кишечной палочки опытными и контрольными образцами сорбционно-фильтрующих субстанций. Установлено, что 3 г опытного (гранулированный композиционный сорбент) и 3 г контрольного (сорбирующего компоненты сменной фильтрующей кассеты «БАРЬЕР-4» бытового фильтра для очистки воды) сорбентов способны адсорбировать 1 млрд 667 млн и 1 млрд КОЕ *Escherichia coli* соответственно. Определены параметры очистки воды, характеризующие эффективность адсорбции *Escherichia coli* разработанным композиционным сорбентом в динамических условиях. Установлено, что при фильтрации взвеси кишечной палочки со скоростью 10 мл/мин 1 г композиционного сорбента, он способен адсорбировать 556 млн КОЕ эшерихий. Сопоставляя полученные данные, становится очевидной повышенная эффективность адсорбции кишечной палочки экспериментальным композиционным сорбентом по сравнению с сорбентом – наполнителем кассеты «БАРЬЕР-4» в 1,7 раза. Объяснением повышенной эффективности адсорбционного действия композиционного сорбента, полученного при пиролизе растительных отходов агропромышленного комплекса Белгородской области, экранированных местными монтмориллонит содержащими глинами при очистке воды от представителей условно-патогенной микрофлоры, надо полагать является: высокая площадь удельной поверхности (до  $200,0 \text{ м}^2/\text{г}$ ), мелкая зернистость гранул (от 67 до  $200 \mu\text{м}$ ) и наличие микро- и макропор (общая удельная пористость  $0,351 \text{ см}^3/\text{г}$ ).

Таблица 4 – Результаты определения динамической обменной емкости композиционного сорбента (фракция 67<d<200мкм) по отношению к органическим красителям: метиленовому голубому и конго красному

V, мл	A	C ф-та, мг/л	ДОЕ, мг/г	Удельная сорбционная способность, мг/г	Степень насыщения сорбента ионами Fe <sup>3+</sup> , %
МГ					
0	0	0	0,116	0	0
25	0,25	3,7282		0,0149	7
50	0,36	5,3580		0,0065	11
75	0,73	10,8450		0,0219	22
100	0,86	12,6854		0,0074	25
200	1,38	20,3909		0,0077	41
300	2,42	35,8420		0,0155	72
400	2,90	43,0404		0,0072	86
500	3,14	46,5046		0,0035	93
600	3,20	47,4715		0,0010	95
700	3,21	47,6569		0,0002	95
800	3,25	48,1967		0,0005	96
900	3,27	48,5363		0,0003	97
1000	3,28	48,6119		0,0001	97
1100	3,31	49,1577		0,0005	98
1200	3,35	49,7434		0,0006	99
1300	3,37	49,9926	0,0002	100	
КК					
0	0	0	0,093	0	0
25	0,56	12,7785		0,0511	26
50	1,23	28,1643		0,0615	56
75	1,55	35,3621		0,0288	71
100	1,66	38,0701		0,0108	76
200	1,74	39,9090		0,0018	80
300	1,81	41,5008		0,0016	83
400	1,84	42,0200		0,0005	84
500	1,86	42,4432		0,0004	85
600	1,87	42,8000		0,0004	86
700	1,89	43,1979		0,0004	86
800	1,89	43,1934		0,0000	86
900	1,90	43,3786		0,0002	87
1000	1,92	43,9962		0,0006	88
1100	1,95	44,7052		0,0007	89
1200	1,97	45,1283		0,0004	90
1300	2,06	47,0312	0,0019	94	
1400	2,17	49,5197	0,0025	99	
1500	2,18	49,7553	0,0002	100	

Таблица 5 – Влияние сорбентов на фенологию растений сои сорта «Ланцетная»

	Порошкообразный композиционный сорбент		Гранулированный композиционный сорбент	
	% растений в стадии развития			
	семядоли	2х настоящих листьев	семядоли	2х настоящих листьев
Контроль	37,5	62,5	37,8	62,2
Торнадо	85,7	14,3	75,7	24,3
Торнадо+композиционный сорбент (КС), 50 г на 1 кг почвы	100,0	0	70,0	30,0
Торнадо+композиционный сорбент (КС), 100 г на 1 кг почвы	50,0	50,0	40,0	60,0
Торнадо+композиционный сорбент (КС), 150 г на 1 кг почвы	72,7	27,3	74,5	25,5
Торнадо+композиционный сорбент (КС), 25 г и монтмориллонитовая глина, 25 г на 1 кг почвы	75,0	25,0	73,0	27,0
Торнадо+композиционный сорбент (КС), 25 г и монтмориллонитовая глина, 50 г на 1 кг почвы	72,7	27,3	73,9	26,1
Торнадо+композиционный сорбент (КС), 25 г и монтмориллонитовая глина, 100 г на 1 кг почвы	60,0	40,0	58,8	41,2

Проведенные эксперименты по детоксикации почвы от гербицида сплошного действия «Торнадо» (табл. 5) свидетельствуют о высокой эффективности разработанных композиционных сорбентов. Оптимальной дозой внесения гранулированного композиционного сорбента в почву является 100 г на 1 кг почвы, так как при данном соотношении 60 % модельных растений имеют два настоящих листа. Гранулированная форма композиционного сорбента предпочтительнее для детоксикации почвы от пестицидов, что обусловлено следующими факторами: за счет меньшей степени вымывания, гранулированный композиционный сорбент дольше находится в верхнем слое почвы, чем порошкообразный, и следовательно более пролонгированно и эффективно сорбирует пестицид; композиционный сорбент обладает высокой технологичностью, так как соответствует размеру посевной фильеры, следовательно, его можно вносить в почву одновременно с

семенами. Методом ИК-листовой диагностики экспериментально определено количество хлорофилла, флавоноидов и азотный статус в листьях модельных растений (соя сорта «Ланцетная») в контрольной группе - 28,94; 29,10 и 1,27 условных единиц dualex соответственно и при внесении пестицида Торнадо совместно с гранулированным композиционным сорбентом в почву - 28,5; 28,7 и 1,32 условных единиц dualex соответственно. Полученные данные свидетельствует о высокой эффективности связывания гербицида Торнадо, при его совместном внесении с экспериментальным сорбентом. Причем содержание хлорофилла, флавоноидов и азотный статус модельных растений остается на уровне контрольных.

### **Выводы**

1. Разработаны физико-химические основы энергоэффективной технологии (за счет снижения температуры синтеза сорбционно-активных материалов на 300 - 350°C по сравнению с температурой, необходимой для получения традиционного активного угля) получения композиционных сорбентов на основе растительных отходов агропромышленного комплекса Белгородской области и местных монтмориллонит содержащих глин. Определены оптимальные параметры синтеза гранулированных (массовое соотношение компонентов глина: лузга – 1:1, температура изотермической стадии пиролиза 350 - 450°C) и порошкообразных (массовое соотношение компонентов глина: лузга – 1:2, температура изотермической стадии пиролиза 450 - 650°C) композиционных сорбентов.

2. Изучены процессы фазо- и структурообразования, протекающие при совместном пиролизе растительных отходов с монтмориллонит содержащими глинами. Выявлена стадийность процессов, протекающих при пиролизе: до 400°C начинают выделяться CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O; 600°C – выделение смол; 800°C - выделение горючих газов (CH<sub>4</sub>, CO, H<sub>2</sub>). Установлено, что на протяжении всего процесса пиролиза лузги семян подсолнечника выделяется CO<sub>2</sub> в количестве 56,4 – 65,7 масс. % и CO в количестве 19,2 – 35,5 масс.%. Интенсивное выделение CH<sub>4</sub> начинается через 120 мин от начала термообработки и составляет 10,1 масс.%. Количество H<sub>2</sub> составляет 1,8 – 8,2 масс.%.

3. Дано термохимическое описание процессов фазообразования при пиролизе растительного сырья, экранированного монтмориллонит содержащей глиной. Установлено, что общее суммарное количество тепловой энергии, необходимое для осуществления процесса пиролиза, составляет 1,4 кДж на 1 кг композита.

4. Установлено, что в процессе пиролиза происходит обогащение поверхности кристаллической решетки монтмориллонита углеродом без изменения параметров элементарной ячейки.

5. Выявлены кинетические закономерности очистки модельных водных растворов от ионов тяжелых металлов ( $\text{Fe}^{3+}$ ), органических красителей (метиленовый голубой (МГ) и конго красный (КК)), условно-патогенных бактерий (тест-культура *Escherichia coli* ATCC 25922) в статическом и динамическом режиме. Порошкообразные композиционные сорбенты имеют высокую сорбционную способность по отношению к ионам  $\text{Fe}^{3+}$ , которая достигает 97,07%, по отношению к метиленовому голубому достигает 82,6%. По анализу значений динамической обменной емкости гранулированных композиционных сорбентов сделан вывод, что для очистки воды от ионов  $\text{Fe}^{3+}$  и органических красителей (МГ и КК) оптимально использовать композиционный сорбент с размером частиц от 67 до 200 мкм. Доказано, что результативность адсорбции кишечной палочки при очистке инфицированной воды гранулированным композиционным сорбентом в 1,7 раза эффективнее комплексного сорбента коммерческой сменной фильтрующей кассеты «БАРЬЕР-4».

6. Определены параметры очистки воды, характеризующие эффективность адсорбции *Escherichia coli* разработанным композиционным сорбентом в динамических условиях. Установлено, что при фильтрации взвеси кишечной палочки со скоростью 10 мл/мин 1 г композиционного сорбента способен адсорбировать 556 млн КОЕ эшерихий.

7. Установлена высокая эффективность связывания гербицида Торнадо, при его совместном внесении с гранулированным композиционным сорбентом. Оптимальной дозой внесения гранулированного композиционного сорбента в почву является 100 г на 1 кг почвы.

8. Установлено, что благодаря своей низкой стоимости (150 руб за кг) разработанный композиционный сорбент найдет широкое применение в народном хозяйстве при очистке сточных и поверхностных вод, загрязненных условно-патогенной микрофлорой, тяжелыми металлами и органическими поллютантами.

*Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Белгородской области в рамках проекта №14-43-08021 «р\_офи\_м».*

### Список литературы:

1. Zohra M, Rose J., Borschneck D. Urban Wastewater Treatment by Adsorption of Organic Matters on Modified Bentonite by (Iron-Aluminum). // *Journal of Encapsulation and Adsorption Sciences*, 4, 2014. – pp.71-79.
2. Naddafi K., Mahvi A.M., Nasser S., Mokhtari M., Zeraati H. Evaluation of the Efficiency of Clay Pots in Removal of Water Impurities. // *Iranian J Env Health Sci Eng*, V.2, № 2, 2005. pp. 12-16.
3. Ismadji S., Soetaredjo F.E., Ayucitra A. Clay Materials for Environmental Remediation. // *Springer Briefs*, 2015. 124 p.
4. Везенцев А.И., Трубицын М.А., Романщак А.А. Сорбционно-активные породы Белгородской области // *Горный журнал*, №1, 2004. С. 51-52.
5. Мухин В.М., Чебыкин В.В. Галкин Е.А. Активные угли. Эластичные сорбенты, катализаторы, осушители и химические поглотители на их основе. Каталог: Под общей ред. д.т.н. В.М. Мухина. М.: Издательский дом «Руда и металлы», 2003. 278 с.
6. Губин – Вель. Методы органической химии, Т II, методы анализа. Издание 2-е стереотипное. М.: Химия, 1967. 764 с.
7. Буханов В.Д., Везенцев А.И., Нгуен Хоай Тъяу, Покровский М.В., Шапошников А.А., Панькова О.Н., Соколовский П.В., Козубова Л.А., Жеребенко С.В. Влияние концентрации монтмориллонит содержащего сорбента и рН питательной среды на чувствительность *Esherichia Coli* к антибактериальным препаратам. // *Научные ведомости БелГУ. Серия Медицина и фармация*, №11(182), Выпуск 26/1, 2014 г. С. 209 – 212.
8. Везенцев А.И., Тохтарь В.К., Коробов В.А., Буханов В.Д., Перистый В.А., Соколовский П.В. Оптимизация условий синтеза композиционного сорбента. // В сборнике: Региональная научно-техническая конференция по итогам ориентированных фундаментальных исследований по междисциплинарным темам, проводимого Российским фондом фундаментальных исследований и Правительством Белгородской области сборник докладов, 2016. С. 101-118.
9. Везенцев А.И., Тохтарь В.К., Коробов В.А., Буханов В.Д., Перистый В.А., Соколовский П.В. Разработка композиционного сорбента. // В сборнике: Региональная научно-техническая конференция по итогам конкурса ориентированных фундаментальных исследований по междисциплинарным темам, проводимого Российским фондом фундаментальных исследований и Правительством Белгородской области Белгородский государственный технологический университет им. В.В. Шухова, 2015. С. 92-103.