

На правах рукописи

Ищенко Евгений Павлович

ОЧИСТКА НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННЫХ ПОЧВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
ЛУЗГИ ПОДСОЛНЕЧНИКА

Специальность 06.01.02 – Мелиорация, рекультивация и охрана почв

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Саратов- 2016

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Самарский государственный технический университет»

Научный руководитель -

**Бурлака Владимир Александрович**  
доктор сельскохозяйственных наук,  
профессор

Официальные оппоненты

**Собгайда Наталья Анатольевна**  
доктор технических наук, профессор  
кафедры «Экология и дизайн»,  
Энгельсский технологический институт  
(филиал) ФГБОУ ВО Саратовский  
государственный технический  
университет

**Заборская Анна Юрьевна**  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Экологическая и промышленная  
биотехнология», ФГБОУ ВО «Московский  
государственный машиностроительный  
университет»

Ведущая организация-

ГНУ «Поволжский НИИ эколого-  
мелиоративных технологий» (ГНУ  
ПНИИЭМТ)

Защита диссертации состоится 24 июня 2016 г. в 12<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 220.061.06 на базе федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования «Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова» по адресу: 410012, г. Саратов, ул. Советская, 60, ауд. 325. им. А.В. Дружкина

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ» и на сайте [www.sgau.ru](http://www.sgau.ru).

Отзыв на автореферат просим высылать по адресу: 410012, г. Саратов, Театральная пл., 1.

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2016 г.

Ученый секретарь совета

Маштаков Дмитрий Анатольевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Загрязненные углеводородами нефти почвы образуются в результате выбросов из скважин при добыче, аварийных разливов в результате повреждения хранилищ при хранении и трубопроводов при транспортировке, а также других процессах. Согласно данным Министерства природных ресурсов и экологии РФ, только за 2015 г. объемы аварийных разливов нефти и нефтепродуктов составляли 21,4 млн. т, в результате чего в среднем образовалось 98,8 млн. т загрязненных углеводородами почв.

Наиболее широко апробированной, простой в исполнении и экономичной технологией очистки нефтезагрязненных почв является та, в которой в качестве носителя углеводородокисляющей микрофлоры используется подстилочный навоз крупного рогатого скота. На наш взгляд, фактором, сдерживающим увеличение объемов очистки нефтезагрязненной почвы по данной технологии, является изменения способов навозоудаления при использовании гидравлических систем.

Сельскохозяйственное производство сопровождается накоплением значительных объемов отходов, в том числе растительных, создающих экологические нагрузки на объекты окружающей среды. Так, в Российской Федерации образуется около 4 млн т/год лузги подсолнечника и гречихи, из них 40% приходится на Поволжский регион. Эти отходы представляют собой значительный источник органического вещества.

При использовании органических веществ для очистки нефтезагрязненных почв одной из основных проблем является создание и поддержание оптимальных условий процесса биодеструкции углеводородов при применении биологических методов. Использование лузги подсолнечника позволяет более эффективно решить проблему очистки почвы и утилизации растительных отходов.

Таким образом, исследования, направленные на совершенствование технологии очистки загрязненных углеводородами нефти почв, имеют важное экологическое, экономическое, сельскохозяйственное и научное значения.

Следовательно, поиск альтернативных органических веществ, улучшающих биодеструкцию углеводородов нефти – одна из актуальных практических задач.

**Степень разработанности темы.** Очистка почвы от загрязнений нефтью и нефтепродуктами исследована многими как отечественными авторами (Бурлака В.А., Чертес К.Л., Исмаиловым Н.М., Пиковским Ю.И., Ягафаровой Г.Г., Глазовской М.А. и т.д.), так и зарубежными (Voopathy R., Walker J.D., Hunt H. и т.д.). В работах этих ученых отражены основные закономерности воздействия нефти и нефтепродуктов на окружающую среду, а также методы восстановления плодородия загрязненных нефтью почв. Однако исследования, посвящённые принципам биодеструкции углеводородов, не учитывают вовлеченность в процесс органики, являющейся отходами других производств и их всестороннего взаимодействия как с нефтью, так и с другими компонентами процесса очистки.

Вследствие этого, требуется разработка, исследование новых и совершенствование наиболее эффективных, апробированных технологий очистки загрязненных почв с вовлечением органических отходов сельскохозяйственного производства, и их комплексное использование.

**Цель работы** – повышение эффективности очистки нефтезагрязненных почв путем улучшения процессов биодеструкции углеводородов нефти от использования лузги подсолнечника.

Достижение этой цели обеспечивается решением следующих задач:

1. Провести анализ и дать оценку влияния биологических и физико-химических свойств органических веществ, в том числе лузги подсолнечника, на процесс очистки нефтезагрязненных почв;
2. Провести исследования процесса биодеструкции углеводородов и определить оптимальные значения параметров эффективного течения процесса очистки нефтезагрязненных почв с использованием лузги подсолнечника;
3. Определить закономерности влияния лузги подсолнечника на процесс очистки нефтезагрязненной почвы от углеводородов нефти;

4. Определить эколого-экономические и энергетические показатели применения усовершенствованной технологии с использованием лузги подсолнечника.

**Научная новизна** работы состоит в том, что:

- исследована и установлена зависимость степени биодеструкции углеводов от доли вносимых органических компонентов;
- исследовано и установлено влияние лузги подсолнечника на процесс очистки почвы от углеводов нефти;
- теоретически установлено и экспериментально подтверждено влияние лузги подсолнечника на время активации и продолжительность процесса очистки почв от углеводов нефти.

**Теоретическая и практическая значимость работы** заключается в научном обосновании влияния лузги подсолнечника на процесс очистки нефтезагрязненных почв. Получена зависимость степени биодеструкции углеводов нефти от соотношений элементов смеси. Установлено оптимальное значение доз компонентов биодеструкции.

Практическая значимость работы заключается в совершенствовании известной, широко апробированной технологии, основанной на биоразложении нефти и нефтепродуктов при снижении трудовых и материальных затрат на очистку загрязнённой почвы.

**Методология и методы исследования.** Теоретические исследования выполнены с использованием методов математического моделирования, а экспериментальные данные обрабатывались с использованием методов математической статистики. Экспериментальные методы включали лабораторные исследования физико-химических свойств нефтезагрязненных почв и лузги подсолнечника, а также полевые исследования, направленные на анализ влияния лузги подсолнечника на процесс очистки нефтезагрязненных почв. Исследования проводились с применением современных стандартных методик и соответствующего оборудования, используемых при химическом, физическом и биологическом анализах.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Экспериментально установленные эмпирические коэффициенты уравнения степени биодеструкции углеводов в зависимости от соотношений компонентов очищаемой смеси;
2. Закономерности процесса очистки нефтезагрязненных почв при использовании лузги подсолнечника;
3. Оптимальная доля лузги подсолнечника и навоза крупного рогатого скота в процессе очистки нефтезагрязненной почвы.

**Степень достоверности и апробации работы** полученных результатов подтверждается адекватностью полученных математических моделей по известным критериям оценки изучаемых процессов, применением отраслевых и государственных стандартов. Основные результаты исследований представлены на научно–практических конференциях разного уровня: Всероссийской научно-практической конференции «Инновационные решения проблем вторичных ресурсов» (Самара, 2012), Международной научно-практической конференции «Ашировские чтения» (Туапсе, 2011), Всероссийской научно-практической конференции «Экологические основы прогрессивных технологий» (Пенза, 2015), Международной научно-практической конференции, посвященной 15-летию создания кафедры "Землеустройство и кадастры" и 70-летию со дня рождения ее основателя д.с-х.н. , проф. Туктарова Б.И. (Саратов, 2015), Международной научно-практической конференции «Вавиловские чтения» (Саратов, 2015). Результаты внедрения компании ООО «НПП Экотон» в 2015 г. продемонстрировали очищение 17864 т нефтезагрязненной почвы с 120 г/кг до 0,840 г/кг.

**Публикации.** По результатам опубликовано 11 работ, в т.ч. 4 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК. Общий объем публикаций 2,65 п.л. из которых 2 п.л. принадлежит лично соискателю.

**СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы, её практическая значимость, приведены основные научные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе «Обзор литературы»** проведён анализ состояния нефтезагрязненных почв, существующих агрохимических мелиорантов, факторов, влияющих на этот процесс, а также математических моделей процесса деструкции углеводов нефти.

На основании анализа установлено, что наиболее важными факторами, влияющими на процесс очистки нефтезагрязненных почв, являются качественные и количественные показатели органических наполнителей, в качестве которых используются навоз крупного рогатого скота, торф, солома и т.д. По результатам проведенной оценки предложено использование лужги подсолнечника в качестве частичной замены части навоза крупного рогатого скота.

**Во второй главе «Очистка нефтезагрязненной почвы с использованием лужги подсолнечника»** рассмотрена математическая модель процесса очистки нефтезагрязненных почв, в основу которой были положены уравнения кинетики первого порядка, описанные в работах Селянина А.А. и Вихиревой В.А., в основном определяющиеся временем.

Убыль субстрата описывается уравнением кинетики первого порядка:

$$\frac{dS}{dt} = -M(t)S, \quad (1)$$

где  $S$  – содержание нефтепродуктов в почве, мг/кг;  $M(t)$  – показатель, линейно зависящий от времени, [1/ время].

$$M(t) = at + b, \quad (2)$$

Параметр « $b$ » имеет размерность [1/ время] и отвечает за скорость процесса биодеструкции, а параметр « $a$ » имеет размерность [1/ время<sup>2</sup>] и отражает величину ускорения или замедления процесса биодеструкции во времени.

Интегрируя уравнение 1, получим выражение:

$$S = S_0 e^{-(b + \frac{at}{2})t}, \quad (3)$$

Параметры  $a$  и  $b$  также являются динамическими и зависят от времени, т.е. для момента времени  $t_k$ , где  $k = 1, 2, 3 \dots k_n$  уравнение 3 примет вид:

$$S_{t_k} = S_0 e^{-(b_{t_k} + \frac{a_{t_k} t}{2})t}, \quad (4)$$

Одним из основных критериев эффективности применения биотехнологий по очистке нефтезагрязненных почв является степень биодеструкции, которая показывает долю углеводов, разложившихся к моменту времени  $t_k$ .

Содержание углеводов также определяется через степень биодеструкции:

$$S_{t_k} = (1 - R) * S_{t_0}, \quad (5)$$

где  $R$  – степень биодеструкции углеводов на временном интервале от  $t_0$  до  $t_k$ ;  $S_{t_k}$  и  $S_{t_0}$  – содержание нефтепродуктов в момент времени  $t_k$  и  $t_0$  соответственно.

Степень биодеструкции в общем виде будет зависеть от множества факторов:

$$R = f(T, t, t_1, P, pH, W_{\text{лузга}}, W_{\text{н}}, R_1, R_{11}, C, K_{\text{п}}); \quad (6)$$

где  $T$  – температура компостируемой почвы, °С;  $t$  – продолжительность биодеструкции, сутки;  $t_1$  – коэффициент, учитывающий сезонные колебания температуры окружающей среды;  $P$  – влажность очищаемой массы;  $pH$  – кислотность среды;  $W_{\text{лузга}}$ ,  $W_{\text{н}}$  – доля лузги подсолнечника и навоза крупного рогатого скота соответственно;  $R_1$  – количественный показатель содержания нефтепродуктов в очищаемом объеме;  $R_{11}$  – коэффициент, учитывающий особенности состава загрязнённых углеводородами почв;  $C$  – коэффициент, учитывающий особенности используемой технологии по очистке почвы от загрязнения;  $K_{\text{п}}$  – коэффициент, учитывающий почвенно-климатические особенности региона.

Наибольшее влияние на динамику процесса оказывает температура и влажность – это параметры, изменяющиеся во времени, которые, в свою очередь, зависят от состояния среды. Именно среда обитания микроорганизмов характеризуется содержанием необходимого количества наполнителя, способного значительное время не только сохранять, но и поддерживать необходимое количество тепла, достаточное для течения биодеструктивных процессов. Как с научной, так и с практической точки зрения нас в большей степени интересует не



факт наличия того или иного компонента, а их доля. Следовательно, обозначив долю лузги подсолнечника по отношению к навозу крупного рогатого скота буквой «А», получим:

$$R = f(A, t); \quad (7)$$

$$A = W_{\text{лузга}}/W_{\text{н}} \quad (8)$$

Таким образом, система уравнений 5 и 7 позволяет получить значения коэффициентов «а» и «b», отвечающих за скорость и ускорение процесса биодеструкции, используя не остаточное содержание углеводов (4), а на основе относительного содержания основных компонентов в очищаемой массе.

На основании теоретических исследований биодеструкции технологии очистки, заключающиеся во внесении микроорганизмов, регуляторов кислотности, органических и минеральных удобрений предложено, для создания оптимальных условий аэрации, влажности и температуры процесса, органику вносить в виде многокомпонентной смеси навоза крупного рогатого скота и лузги подсолнечника (рисунок 1).



Рисунок 1 – Технология очистки нефтезагрязненных почв

**Технология очистки нефтезагрязненной почвы** заключается в использовании лузги подсолнечника в качестве адсорбента на этапе подготовительных работ в необходимом и достаточном количестве, обеспечивающим, в первую очередь, необходимую температуру, влажность и пористость очищаемой массы. Оптимальное значение содержания лузги подсолнечника изменяется в интервале 21,2%-32,7% от общего объема нефтезагрязненной почвы. Известь или гипс до 1% от объема нефтезагрязненной почвы добавляют для достижения кислотности среды 5,5-8,0, укладывают полученную массу в бурты высотой до 4 м и шириной основания до 7 м, каждые 15-20 дней проводят аэрирование компоста путем перекладки бурта.

**В третьей главе «Программа и методики экспериментальных исследований»** изложены общая методика и программа проведения экспериментальных исследований.

Исследования проводились на территории специализированной площадки по очистке нефтезагрязненных почв (НП) ООО «НПП Экотон», расположенной в Самарской области, в районе г. Новокуйбышевск, в период с июня 2013 г. по июнь 2015 г. Почвы загрязненного участка характеризовались как чернозем обыкновенный, среднегумусный, среднесуглинистый по гранулометрическому составу. Содержание гумуса на незагрязненном участке 6,2 %. Сумма обменных оснований 10,3 мг-экв на 100 г почвы. Обеспеченность подвижными формами фосфора – средняя, доступным калием – низкая. Почвы типичные для большинства пахотных почв Самарского региона. Район проведения опытов расположен в засушливой северной части степного Заволжья. Климат района умеренно-континентальный с преобладанием в течение года ясных и малооблачных дней.

Сумма осадков за вегетационный период составила 93 мм в 2013 г., 78 мм в 2014 г., 117 мм в 2015 г. Средняя за вегетационный период температура воздуха составила плюс 18,6 °С в 2013 г, плюс 17,2°С в 2014 г, плюс 17,1°С в 2015 г. Годы исследований характеризовались как средне засушливые при ГТК 0,7 в 2013 г., 0,6 в 2014 г, 0,8 в 2015 г.

Варианты экспериментов формировались с учетом замещения части навоза крупного рогатого скота лузгой подсолнечника (таблица 1).

Таблица 1 – Схема опытов

| № группы | № варианта | Наименование элементов смеси                  | Соотношение элементов смеси (объемное) |
|----------|------------|---|--|
| 1        | 1          | Навоз КРС / лузга подсолнечника / НП          | 0,40/0,10/0,50                         |
|          | 2          |   | 0,30/0,20/0,50                         |
|          | 3          |   | 0,25/0,25/0,50                         |
|          | 4          |   | 0,20/0,30/0,50                         |
|          | 5          |   | 0,10/0,40/0,50                         |
|          | 6          | Навоз КРС / Нефтезагрязненная почва           | 0,5/0,5                                |
| 2        | 1          | Лузга подсолнечника / Нефтезагрязненная почва | 0,50/0,50                              |
|          | 2          |   | 1,00/0,50                              |
|          | 3          |   | 2,00/0,50                              |
|          | 4          | Нефтезагрязненная почва                       |  |
| 3        | 1          | Фоновый незагрязненный участок                |  |
|          | 2          | Загрязненный участок                          |  |
|          | 3          | Навоз КРС / НП                                | 0,50/0,50                              |
|          | 4          | Навоз КРС / лузга подсолнечника / НЗ          | Оптимальное соотношение                |

Все эксперименты проводились в трехкратной повторности, а расположение вариантов по площадке носило рандомизированный характер.

Содержание гумуса определяли по методу мокрого сжигания по ГОСТ 26213 – 91; плотность почвы методом режущего кольца; влажность почвы термостатно-весовым методом ГОСТ 28268 – 89; степень кислотности по ГОСТ 26423-85; определение суммы обменных оснований проводили методом Каппена-Гильковица по ГОСТ 27821-88; аммонийный азот определяли колориметрически ГОСТ 26716-85; нитраты фотометрически по методу Цинао по ГОСТ 26488-85; определение подвижных форм фосфора и калия проводили по методу А. Т.

Кирсанова в соответствии с ГОСТ Р 54650-2011; подвижные формы металлов определяли по методу пламенной атомно-абсорбционной спектрометрии согласно ПНД Ф 16.1:2.2.2.3.78-2013. Оценку всхожести и энергии прорастания озимой пшеницы проводили в соответствии с ГОСТ 30556-98.

Содержание нефтепродуктов в почве определяли по методике ПНД Ф 16.1:2.21-98. Фракционный состав нефти в загрязненной почве определяли согласно ГОСТ 2177-99. Количество адсорбированной нефти и влаги лузгой подсолнечника оценивали согласно ТУ214-10942238-03-95. Микробиологический анализ осуществляли методом разведения в соответствии с ГОСТ Р 54653-2011.

Периодом активации процесса биодеструкции углеводов считали время от формирования очищаемой смеси до момента, когда температура процесса достигнет +37 °С. Под продолжительностью активного периода считали время, когда температура процесса была выше +37°С.

Обработку данных проводили методами математической статистики. Оценку эколого-экономической эффективности проводили в соответствии со стандартными методиками оценки ущерба от разлива нефти РД 03-496-02 и «Методика определения ущерба окружающей природной среде при авариях на магистральных нефтепроводах».

**В четвертой главе «Результаты и анализ экспериментальных исследований»** представлены результаты исследований процесса очистки нефтезагрязненных почв с использованием лузги подсолнечника и навоза КРС. Загрязненная почва характеризовалась высоким содержанием нефтепродуктов (таблица 2)

Таблица 2 – Характеристика нефтезагрязненных почв

|  |       |
|--|-------|
| Массовое содержание нефтепродуктов, г/кг         | 127,3 |
| Плотность нефти, т/м <sup>3</sup>                | 0,898 |
| Плотность загрязненной почвы, т/м <sup>3</sup>   | 1,240 |
| Плотность незагрязненной почвы, т/м <sup>3</sup> | 1,120 |
| рН загрязненной почвы                            | 8,1   |
| рН незагрязненной почвы                          | 7,2   |

Содержание тяжелых металлов в нефтезагрязненной почве не превышало ПДК (таблица 3).

Таблица 3 – Содержание тяжелых металлов в почве

| Варианты опыта       | Содержание, мг/кг |      |      |      |      |      |      |      |
|----------------------|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|
|                      | Pb                | Ni   | Cu   | Zn   | Co   | Mn   | Cr   | Cd   |
| Незагрязненная почва | 8,1               | 38,4 | 12,7 | 44,1 | 12,0 | 1075 | 26,7 | 0,36 |
| Загрязненная почва   | 13,9              | 39,3 | 19,2 | 47,0 | 16,6 | 1445 | 29,4 | 0,52 |
| ПДК                  | 130               | 80   | 132  | 220  | 14   | 1500 | 100  | 2,0  |

В ходе проведения экспериментов установлено, что применение лузги подсолнечника позволяет сократить период активации процесса в 2,1-4,2 раз по сравнению с базовой технологией – вариант 1.6 (таблица 4).

Таблица 4 – Зависимость остаточного содержания нефти от количества лузги подсолнечника и навоза КРС в очищаемой смеси

| Показатели/варианты                                | 1.1         | 1.2         | 1.3         | 1.4   | 1.5   | 1.6         |
|--|-------------|-------------|-------------|-------|-------|-------------|
| Содержание УВ начальное, г/кг                      | 127,3       |             |             |       |       |             |
| через 1 год  | 60,40       | 59,70       | 52,20       | 77,60 | 93,70 | 43,20       |
| через 2 года                                       | 8,40        | 10,50       | 15,70       | 22,40 | 57,92 | 4,10        |
| через 3 года                                       | <b>0,71</b> | <b>0,82</b> | <b>0,96</b> | 15,70 | 52,10 | <b>0,48</b> |
| ПДК УВ, г/кг                                       | 1           |             |             |       |       |             |
| Период активации процесса, сутки                   | 20          | 14          | 6           | 4     | 12    | 26          |
| Средняя продолжительность активного периода, сутки | 45          | 44          | 40          | 27    | 19    | 52          |
| Максимальная температура процесса, °С              | 52          | 54          | 62          | 45    | 41    | 51          |

Использование лузги подсолнечника позволяет продемонстрировать, за первый год исследований, снижение значения степени биодеструкции на 8,4% (вариант 1.3) и составила в среднем 58,7%. Подобная динамика сохранилась и на второй, при этом разница уже составляла 10,2% (вариант 1.3). На третий год предельно допустимых концентраций нефти в почве достигли варианты опытов с содержанием лузги подсолнечника в смеси не более 25 % об. Средняя

продолжительность активного периода процесса была ниже на 13,5%-63,4%, а максимальные температуры выше до 21,6% по сравнению с базовой технологией. Максимальная активность процесса приходится на 16-34 сутки в случае использования лузги подсолнечника по предлагаемой технологии и на 44-46 сутки при применении базовой технологии, что позволяет сократить продолжительность очистки на 30,6%.

Использование лузги подсолнечника без навоза КРС показало положительную динамику по сравнению с фоновыми значениями нефтезагрязненной почвы. Однако степень биодеструкции не превысила 16,3%, что связано с низкой микробиологической активностью и, вероятно, основной вклад вносили абиотические факторы – испарение, выветривание преимущественно низкокипящих фракций углеводородов нефти (таблица 5).

Таблица 5 – Зависимость концентрации углеводородов нефти от содержания лузги подсолнечника в загрязненной почве

| Показатели/варианты                        | 2.1           | 2.2    | 2.3    | 2.4    |
|--|---------------|--------|--------|--------|
| Содержание УВ начальное, г/кг              | 127,3         |        |        |        |
| через 1 год                                | 105,12        | 101,88 | 101,64 | 116,28 |
| через 2 года                               | 96,72         | 96,36  | 95,04  | 111,84 |
| через 3 года                               | 93,48         | 90,36  | 90,24  | 109,56 |
| ПДК УВ, г/кг                               | 1             |        |        |        |
| Период активации процесса, сутки           | Не определяли |        |        |        |
| Продолжительность активного периода, сутки |               |        |        |        |
| Максимальная температура процесса, °С      | 24            | 28     | 27     | 18     |

Так как температура процесса не превысила 37°C, период активации и продолжительность активного периода не определяли.

Средние максимальные температуры очищаемой массы в случае применения лузги подсолнечника (варианты 1.1-1.4) были выше на 16,8-18,7%, что явно лучше отражалось на удалении низкокипящих, наиболее токсичных для углеводород окисляющих микроорганизмов, фракций нефтепродуктов (рисунок 2).

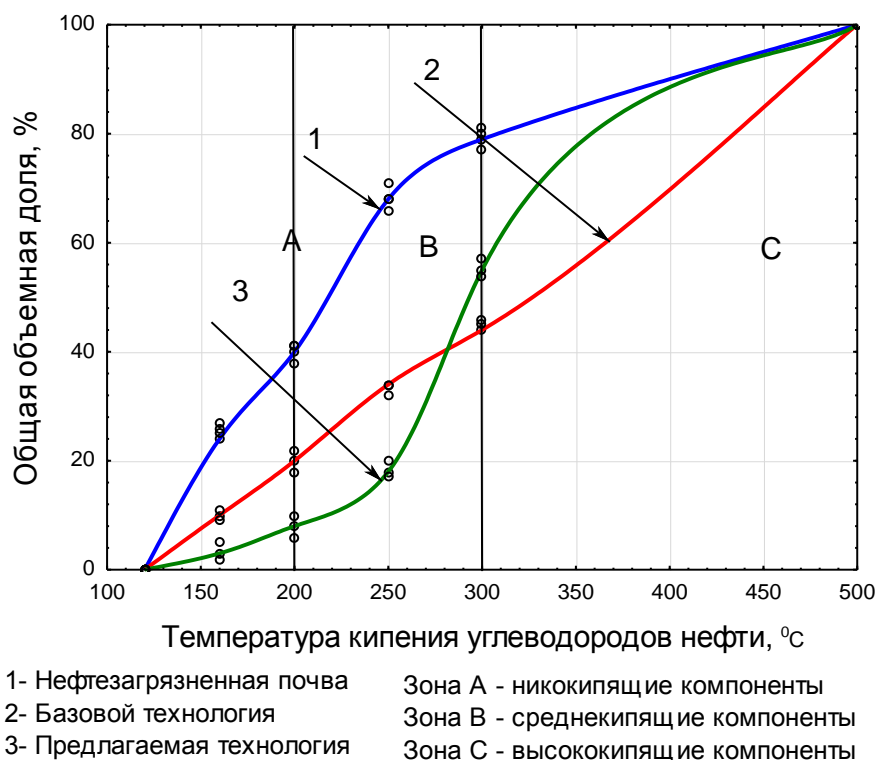


Рисунок 2 – Кривые фракционного состава нефти в очищенной почве

Содержание низкокипящих и среднекипящих компонентов нефти в результате использования лузги подсолнечника снизилось на 82,4% и 68,8% соответственно, что выше значений аналогичных характеристик при использовании базовой технологии на 34,7% и 23,2%.

Проведенные исследования показали, что влажность очищаемой смеси в контрольном варианте 1.6 находилась в оптимальной области значений 80 суток. В вариантах 1.2-1.5 продолжительность оптимального состояния влажности процесса сократилась до 16-44 суток (рисунок 3).

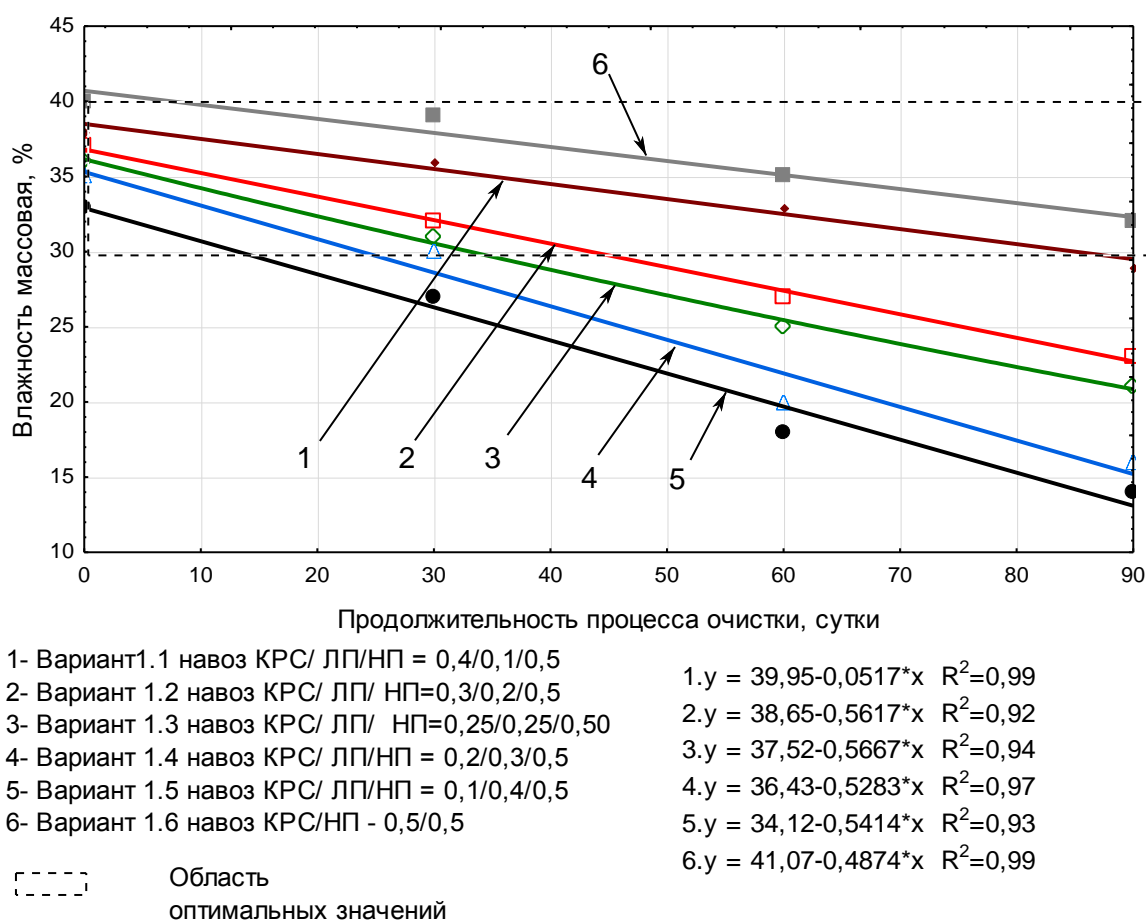


Рисунок 3 – Изменение влажности многокомпонентной смеси в ходе процесса очистки нефтезагрязненной почвы с июня по август

В ходе проведения многофакторного эксперимента уровни и интервалы варьирования факторов выбирались на основании результатов предварительных полевых исследований. Доля навоза КРС составила  $W_n = 0,1 \dots 0,4$ , объемная доля лузги подсолнечника  $W_d = 0,1 \dots 0,4$ , что соответствует интервалу варьирования параметра  $A = 0,25 \dots 4$  и времени биодеструкции  $t = 1 \dots 3$  года. Методом ортогонального композиционного планирования эксперимента найдено уравнение 9:

$$R = 0,072 + 0,152A + 0,004 * t - 0,045A^2 \quad (9)$$

Поверхность отклика степени биодеструкции углеводородов  $R$  от соотношений компонентов смеси  $A$  представляет собой «поднимающийся гребень» (рисунок 4).



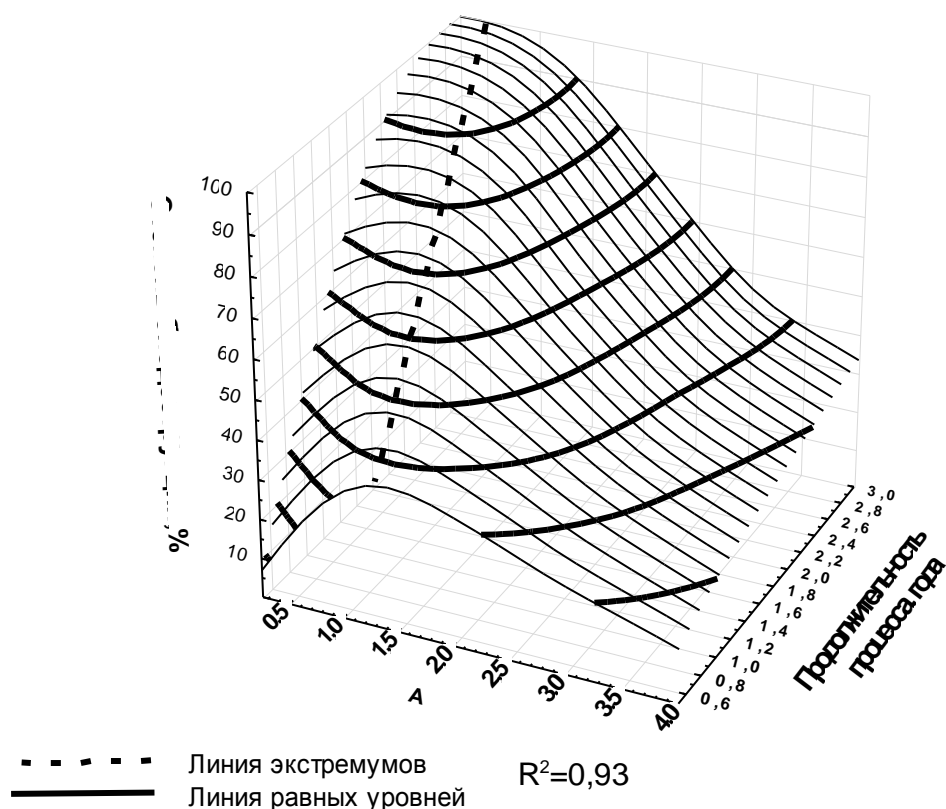


Рисунок 4 – Поверхность отклика изменения степени биодеструкции углеводородов  $R$  от начальной доли компонентов смеси  $A$

Из графического представления поверхности отклика, характеризующей влияние долей компонентов смеси на степень биодеструкции углеводородов нефти, установлено, что максимальная степень биодеструкции достигается при условии  $A=0,10-1,82$ . Линии равного уровня представляют собой параболы, вершины которых характеризуют наименьшую продолжительность процесса при наибольшей степени биодеструкции при заданном значении параметра « $A$ ». Таким образом, экстремум функции находится на «гребне» поверхности отклика.

Сечением поверхности отклика плоскостью  $XOZ$  при  $t=1,30,60,90$  получили следующие зависимости:

$$R_1 = f(A; 1); R_{30} = f(A; 30); R_{60} = f(A; 60); R_{90} = f(A; 90). \quad (10)$$

Найденные экстремумы параболических функций 10 при соединении образуют линию на поверхности отклика, которая определена в интервале  $A \in [0,74 \dots 1,66]$

Исходя из вышеизложенного и в соответствии с целями исследования о максимально возможном сокращении использования навоза крупного рогатого скота без потери эффективности биодеструкции, оптимальная доза компонентов смеси «А» будет изменяться в интервале от 0,74 до 1,82, что соответствует оптимальному содержанию лузги подсолнечника в интервале 21,2%-32,7% и 17,3%-28,8% навоза крупного рогатого скота или 35,5-54,4 кг лузги подсолнечника и 546-776 кг навоза КРС на 1000 кг нефтезагрязненной почвы.

Результаты анализа теоретической и экспериментальной зависимости показали, что обе методики адекватно описывают процесс очистки нефтезагрязненных почв (рисунок 5).

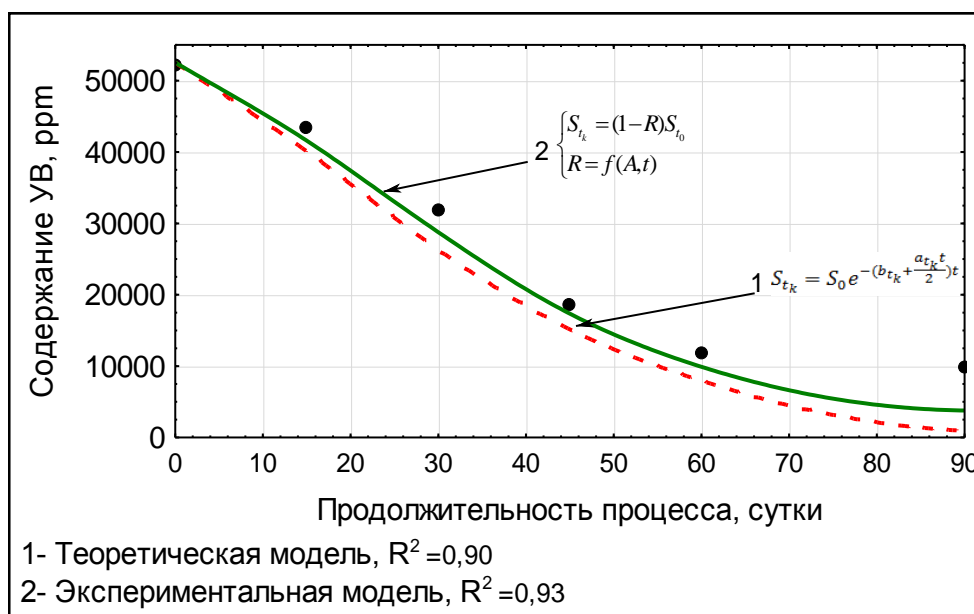


Рисунок 5 – Теоретическая и экспериментальные зависимости биодеструкции углеводов

Экспериментальная и теоретическая модели демонстрируют заниженные значения содержания углеводов, что, вероятно, связано с точностью дозирования элементов смеси. Однако обе модели дают достаточно точное представление о динамике процесса очистки почв в фазе активного роста и размножения микроорганизмов.

Влияние лузги подсолнечника на очистку загрязнённых нефтью почв определяется её свойствами:

1. Физико-химическими: низкая плотность  $144 \text{ кг/м}^3$  приводит к увеличению порового пространства, следовательно увеличивается доступность кислорода для аэробных микроорганизмов во всем объеме компостной массы; сорбционная емкость по нефтепродуктам  $1,8 \text{ г/г}$  позволяет снизить токсикологическую нагрузку на микроорганизмы, а также связывать жидкую фракцию нефти на местах разлива, что упрощает погрузо-разгрузочные работы; сорбционная емкость по воде  $0,8 \text{ г/г}$  позволяет обеспечить отвод влаги, благодаря чему оптимальные значения влажности процесса достигаются в более короткие сроки вследствие усиления диффузии воздушных масс и интенсификации испарения;
2. Биологическими: на лузге подсолнечника интенсивно развиваются плесени рода *Penicillium* от 6,7 до 10,2 тыс. шт/ 1 г а.с.п. за 90 суток, штаммы которой используются в практике очистки нефтезагрязненных почв для биодеструкции углеводов. Также на внутренней стороне лузги находятся легкие углеводороды, наиболее доступные для питания микроорганизмов.
3. Экологическими: повышается степень биодеструкции при снижении количества навоза крупного рогатого скота; возможно увеличение количества очищаемой почвы в 1,8-2,2 раза, уменьшается нагрузка на полигоны твердых бытовых отходов; снижается пожароопасность лузги. Лузга подсолнечника утилизируется в процессе очистки.

Результаты анализа агрономических показателей показали, что плотность очищенной почвы восстанавливается в случае применения обеих технологий до фонового значения (таблица 6).

Таблица 6 - Агрономические показатели почвы

| Агрономические показатели | Единица измерения | Варианты опытов      |                           |                                       |  |
|---------------------------|-------------------|----------------------|---------------------------|---------------------------------------|--|
|                           |                   | Незагрязнённая почва | Загрязнённая нефтью почва | Очищенная по базовой технологии почва | Очищенная почва с использованием лузги подсолнечника |
| Плотность                 | $\text{т/м}^3$    | 1,12                 | 1,24                      | 1,16                                  | 1,14   |
| Пористость                | %                 | 56,4                 | 36,7                      | 51,6                                  | 68,5   |
| Гумус                     | %                 | 6,2                  | не опред.                 | не опред.                             | не опред.  |

## Продолжение таблицы 6

|                          |         |      |      |        |        |
|--------------------------|---------|------|------|--------|--------|
| Азот                     | мг/кг   | 15,8 | 18,1 | 2218,8 | 1615,7 |
| Фосфор                   | мг/100г | 7,8  | 7,9  | 18,4   | 14,7   |
| Калий                    | мг/100г | 34,6 | 38,7 | 51,7   | 43,2   |
| Сумма обменных оснований | мг/100г | 10,3 | 10,5 | 15,8   | 14,4   |

Пористость в результате применения базовой технологии была ниже на 4,8% и выше на 11,9% в случае использования лузги подсолнечника. Очевидно, что чем выше пористость загрязненной почвы, тем интенсивнее протекает воздухообмен и тем больше степень деструкции нефтепродуктов.

Содержание основных питательных элементов почвы в виде азота, фосфора и калия увеличивалось пропорционально содержанию навоза КРС в смеси.

Энергия прорастания семян озимой пшеницы на очищенной почве по базовой технологии больше на 10,7% и 18,5% в случае использования лузги подсолнечника, что, вероятно, связано с меньшим содержанием токсичных низкокипящих компонентов нефти. Всхожесть семян озимой пшеницы увеличилась на 11,1% и 12,6% в случае базовой технологии и использовании лузги подсолнечника соответственно (таблица 7).

Таблица 7 - Результаты определения энергии прорастания и всхожести озимой пшеницы

| Варианты опытов  | Энергия прорастания, % | Всхожесть, % |
|--|------------------------|--------------|
| 3.1 Незагрязненная почва                                 | <b>27</b>              | <b>63</b>    |
| 3.2 Загрязненная нефтью почва                            | 3                      | 6            |
| 3.3 Очищенная по базовой технологии почва                | <b>29</b>              | 70           |
| 3.4 Очищенная почва с использованием лузги подсолнечника | <b>32</b>              | <b>71</b>    |
| НСР <sub>0,5</sub> <sup>3-4</sup>                        | 1,87                   | 1,94         |
| НСР <sub>0,5</sub> <sup>1-4</sup>                        | 1,84                   | 2,01         |

Различия энергии прорастания в очищенных почвах являются существенными и значимыми.

Таким образом, полученная очищенная почва может быть использована при выполнении рекультивационных работ на нарушенных и деградированных почвах.

**В пятой главе «Эколого-экономическая и энергетическая эффективность применения лузги подсолнечника в процессе очистки почвы углеводородов нефти»** дана оценка эколого-экономической эффективности и установлено, что технология с использованием лузги подсолнечника обладает меньшими эксплуатационными затратами на 38,7 %. При этом экономический эффект от перехода к усовершенствованной технологии составил 12764 руб. на каждые 10 м<sup>3</sup> очищаемой почвы при 10% содержании углеводородов нефти. Энергетический эффект от использования лузги подсолнечника для очистки почвы заключается в увеличении коэффициента биоэнергетической эффективности на 20,0% и сокращении периода окупаемости технологии очистки на 14,8% по сравнению с базовым вариантом.

### **Заключение**

1. Анализ проведенных исследований показал, что благодаря низкой плотности 144 кг/м<sup>3</sup>, высокой пористости 68,5%, а также высокой сорбционной способности по нефти 1,8 г/г происходит сокращение периода активации процесса в 2,1 - 4,2 раз, уменьшение продолжительности активного периода на 13,5%-63,4% и увеличение максимальных температур процесса на 21,6% по сравнению с базовой технологией.
2. Проведенные исследование процесса очистки нефтезагрязненных почв позволили определить оптимальные соотношения компонентов смеси, а именно содержание лузги подсолнечника 21,2%-32,7%, навоза крупного рогатого скота 17,3%-28,8%, при этом эффективность биодеструкции углеводородов нефти составила более 90% за годы исследований.
3. Установлено, что на снижение относительного содержания низко- и среднекипящих компонентов нефти на 82,4% и 68,8% соответственно, оказывают физико-химические и микробиологические свойства лузги

подсолнечника. Анализ температурно-временных характеристик показал, что максимальная активность процесса приходится на 16-34 сутки в случае использования лузги по предлагаемой технологии и на 44-46 сутки при применении базовой технологии, что позволяет сократить продолжительность биодеструкции на 30,6%. В первый год исследований при использовании лузги подсолнечника степень биодеструкции составила в среднем 58,7%, что ниже соответствующего значения на 8,4 % в случае применения базовой технологии. На второй год динамика сохранилась, но разница уже составляла 10,2%. Снижение содержания углеводородов нефти ниже предельно допустимых концентраций в почве показали варианты опытов с содержанием лузги подсолнечника в смеси не более 25 % от общего объема.

4. Целесообразность применения лузги подсолнечника в процессе очистки загрязнённых нефтепродуктами почв подтверждена эколого-экономической эффективностью, при этом сокращаются эксплуатационные затраты на 38,7%, что составляет 12764 руб. на каждые 10 м<sup>3</sup> очищаемой почвы при содержании углеводородов нефти 10%. Значение коэффициента биоэнергетической эффективности при этом выше на 20%, а период окупаемости технологии очистки с использованием лузги подсолнечника сокращается на 14,8% по сравнению с базовым вариантом.

### **Рекомендации производству**

1. Для повышения эффективности использования лузги подсолнечника в процессе очистки нефтезагрязненных почв необходимо использовать её в дозах 21,2%-32,7% или 35,5-54,4 кг лузги подсолнечника и 546-776 кг навоза КРС на 1000 кг нефтезагрязненной почвы.
2. Использование лузги подсолнечника оправдано при очистке почв, загрязненных преимущественно низко- и среднекипящими углеводородами нефти, объемная доля которых начинается от 80%.

3. В качестве объекта очистки, рекомендуется выбирать почву по своим показателям близкую к чернозему обыкновенному.

### **Перспективы дальнейшей разработки темы**

Технология очистки нефтезагрязненных почв с использованием навоза крупного рогатого скота и лузги подсолнечника имеет широкие перспективы дальнейшей разработки в плане исследований, направленных на её термическую, химическую и физико-механическую модификацию, увеличение степени биодеструкции углеводородов на почвах различных природно-климатических зон, а также вовлечение в процесс других отходов агропромышленного комплекса с целью увеличения эффективности и снижения себестоимости процесса.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах

#### *В рецензируемых научных изданиях*

1. Ищенко, Е.П. Обоснование показателя эффективности применения биотехнологий по очистке нефтесодержащих отходов [Статья] / Бурлака В.А., Бурлака Н.В., Ищенко Е.П., Денисов Е.П. // Аграрный научный журнал. -2015. - №11. - С. 30-31.
2. Ищенко, Е.П. Экономическая оценка различных технологий очистки замазученных грунтов [Статья] / Бурлака В.А., Ищенко Е.П., Бурлака Н.В. // Научное обозрение. -2015. -№19. -С. 136-139.
3. Ищенко, Е.П. Полнофакторное исследование применения лузги подсолнечника в процессах очистки загрязнённых углеводородами земель [Статья] / Бурлака В.А., Бурлака Н.В., Ищенко Е.П.// Инновации и инвестиции. -2015. -№11. -С. 198-200.
4. Ищенко, Е.П. Экономическая оценка различных технологий очистки замазученных грунтов / Бурлака В.А., Ищенко Е.П., Бурлака Н.В. // Научное обозрение. -2015. -№21. -С. 114-117.

*Патенты*

5. Заявка 2015134632 Российская Федерация МПК В09С1/10 Способ переработки нефтешламов и очистки замазученных грунтов / Бурлака В.А., Бурлака Н.В., Ищенко Е.П.; №2015134632/13 (053143); заявл.17.08.2015; опубл. 17.08.2015; приоритет 24.11.2015.

*В материалах конференций и семинаров*

6. Ищенко, Е.П. Обезвреживание замазученных грунтов и нефтешламов [Статья] / Бурлака Н.В., Бурлака В.А., Ищенко Е.П., Кацюбинская Г.С. // Научно-практическая конференция Инновационные решения проблем вторичных ресурсов. -2012. –С. 8-10.
7. Ищенко, Е.П. Аборигенная микрофлора в очистке территорий от нефтяных загрязнений [Статья] / Бурлака Н.В., Кацюбинская Г.С., Бурлака Н.В., Ищенко Е.П., Бурлака И.В. // Труды VIII научно практической конференции Ашировские чтения. -2012. - Том 1. –С. 124-128.
8. Ищенко, Е.П. Лузга подсолнечника в качестве разрыхлителя компостной массы при обезвреживании нефтесодержащих отходов [Статья] / Бурлака Н.В., Ищенко Е.П., Бурлака В.А., Быков Д.Е., Пименов А.А. // Экологические основы прогрессивных технологий: сборник статей Всероссийской научно-практической конференции. –Пенза:РИО ПГСХА. -2015. –С. 21-24.
9. Ищенко, Е.П. Динамика изменения эффективности биотехнологий по очистке нефтесодержащих отходов в Поволжском регионе [Статья] / Ищенко Е.П., Бурлака Н.В., Бурлака В.А. // Экологические основы прогрессивных технологий: сборник статей Всероссийской научно-практической конференции. –Пенза:РИО ПГСХА. -2015. –С. 56-59.
10. Ищенко, Е.П. Отходы агропромышленного комплекса как мелиоранты в процессах биодеструкции углеводов нефти [Статья] / Ищенко Е.П., Бурлака В.А., Бурлака Н.В. // Международная научно-практическая конференция, посвященная 15-летию создания кафедры "Землеустройство и кадастры" и 70-летию со дня рождения ее основателя д.с.-х.н., проф. Туктарова Б.И. - 2015. –С. 155-158.



11. Ищенко, Е.П. Экономическая эффективность применения лузги подсолнечника в процессе биодеструкции углеводородов нефти [Статья] / Бурлака В.А., Ищенко Е.П., Бурлака Н.В., Гревцева Е.С. // Сборник статей международной научно-практической конференции «Вавиловские чтения». -2015. - С. 179-182.