

## Биотехнология очистки щебеночного балласта и получения биодизеля

Т. Н. Щемелинина, Е. М. Анчугова

Институт биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН,  
г. Сыктывкар  
tatyanakomi@mail.ru

### Аннотация

Разработана биотехнология очистки щебеночного балласта и получения прекурсора биодизеля с применением альгобактериально-дрожжевого консорциума и биогеосорбента на его основе.

Эффективность очистки щебеночного балласта с помощью биологических добавок при интенсивном перемешивании от 15 мин до 72 ч составила 97–98 %. Эффективная очистка щебня от нефтепродуктов в роторе в многократном использовании суспензии происходила на протяжении пяти циклов. Биодеструкция осажденных нефтепродуктов до уровня допустимого остаточного содержания нефти в почве осуществлялась в течение 90 сут после внесения осадка в почву.

Жирные кислоты суспензии альгобактериально-дрожжевого консорциума характеризуются низким значением степени ненасыщенности, что свидетельствует о высокой устойчивости получаемого биодизеля к окислению. Цетановое и йодное числа, а также физико-химические характеристики полученных прекурсоров независимо от времени экспозиции соответствуют требованиям европейского стандарта EN 14214 и межгосударственным стандартам ГОСТ 33131–2014.

### Ключевые слова:

щебеночный балласт, нефтепродукты, загрязнение, консорциум, биогеосорбент, суспензия, очистка, биодизель

### Введение

Щебеночный балласт, получаемый из прочных магматических пород, является лучшим из современных балластных материалов, применяемых для железнодорожных (далее – ж/д) путей благодаря долговечности, высокой сопротивляемости осадкам шпал и их смещениям в горизонтальной плоскости, хорошим дренирующим, упругим и электроизоляционным свойствам щебеночной призмы [1]. При эксплуатации железной дороги происходит органическое загрязнение щебеночного балласта [2]. Наиболее распространенными загрязнителями балластного слоя являются органические, в том числе нефть, нефтепро-

## The biotechnology of railroad crashed stone ballast remediation with simultaneous producing of fatty acids suitable as biodiesel precursors

T. N. Shchemelinina, E. M. Anchugova

Institute of Biology, Federal Research Center Komi Science Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Syktyvkar  
tatyanakomi@mail.ru

### Abstract

The authors have developed the biotechnology of railroad crashed stone ballast remediation with simultaneous producing of fatty acids suitable as biodiesel precursors using the algal-bacterial-yeast consortium and the biogeosorbent on its basis.

The efficiency of petroleum hydrocarbons removal during exposition to biological aditives under vigorous stirring was 97–98 %. Even on the repeated use of the same suspension, the optimal number of cycles to tumble ballast efficiently was determined to be 5. A decline of the petroleum hydrocarbon content to acceptable norms for the allowable residual content of oil in the soil was achieved in 90 days after plowed-down application of tank bottoms.

Fatty acids of the suspension of the algal-bacterial-yeast consortium have a low value of the unsaturation degree suggesting the high biofuel oxidation stability. The cetane number, iodine value, and physicochemical properties of renewable fuels produced comply with the requirements of the European Standard EN 14 214 and the Russian National Standard 33131–2014, regardless of the exposure time.

### Keywords:

railroad crashed stone ballast, petroleum hydrocarbons, pollution, consortium, biogeosorbent, suspension, petroleum hydrocarbons removal, biodiesel

дукты, мазут, топливо, смазочные материалы. Количество органических загрязнений колеблется от 5 до 20 г на 1 кг грунта [3].

Существует два подхода в очистке щебеночного балласта, в зависимости от уровня загрязненности и места очистки: «на перегоне», т.е. непосредственно на ж/д путях во время технологических «окон» в расписании движения ж/д транспорта; и «вне перегона» – на стационарных полигонах, куда вывозится загрязненный щебеночный балласт, замененный новым в процессе ремонтных работ [4]. Для очистки на полигонах может применяться высо-

копроизводительная щебнеочистительная машина (ЩОМ-1400), и очистка происходит механическим способом [5]. В этом случае органические загрязнители не полностью удаляются со щебня. Альтернативой механической очистке щебеночного балласта может послужить биологическая обработка с помощью микроорганизмов-деструкторов.

Специально подобранных консорциумов на основе микроорганизмов-деструкторов органоминеральных загрязнителей для очистки загрязненного грунта ж/д полотна как в России, так и за рубежом не обнаружено. В основном, очистка загрязненных грунтов происходит с применением поверхностно-активных веществ, либо существующие биопрепараты не имеют целевого назначения для очистки загрязнений на железной дороге.

Была проведена серия экспериментов с целью подбора оптимальных биодобавок (альгобактериально-дрожжевой консорциум, биогеосорбент) для очистки щебеночного балласта, времени экспозиции в роторе с перемешиванием, циклов загрузки в один объем суспензии, биоконверсии нефтепродуктов в прекурсор биодизеля.

## Материалы и методы

### Очистка щебеночного балласта от нефтепродуктов

В качестве биодобавок применяли альгобактериально-дрожжевой консорциум (штаммы бактерий – *Pseudomonas yamanorum* VKM В-3033D, дрожжей – *Rhodotula glutinis* VKM Y-2998D и микроводорослей – *Chlorella vulgaris* Beijer. f. *globosa* IPPAS С-2024) в свободной и иммобилизованной формах на глауконитовом ионсорбе (биогеосорбент).

В ротор загружали 17 кг загрязненного щебня, отобранного с ж/д путей депо. Далее в ротор вводили 18 дм<sup>3</sup> суспензии консорциума с титром 10<sup>12</sup> кл./см<sup>3</sup> и периодически перемешивали для обеспечения максимально равномерного нанесения биопрепарата на щебень и смывания загрязнителей. Время экспозиции составило 72 ч. Частота перемешивания – четыре раза по 1 ч в течение суток.

Далее проводили экспериментальную оценку эффективности очистки щебеночного балласта предварительно активированным биогеосорбентом, для чего 0.3 кг биогеосорбента замачивали в 10 дм<sup>3</sup> воды на 12 ч. Отбор образцов суспензий и щебня для определения нефтепродуктов (далее – НП) осуществляли спустя 15 и 60 мин. В качестве контроля использовали метод сухого грохочения в роторе.

### Определение количества циклов загрузки щебневого балласта

Для определения количества циклов, в течение которых достигалась эффективная очистка щебня (повышалось содержание НП в суспензии) при многократной загрузке в установку, в ротор вносили 5 кг щебеночного балласта и 5 дм<sup>3</sup> суспензии активированного биогеосорбента. Исследования включали восемь циклов очистки в роторе в течение 15 мин, отбор образцов суспензии для определения НП осуществляли трехкратно после каждого цикла. Данный эксперимент воспроизводили трижды для отработки режимов экспозиции.

Содержание НП во всех образцах определяли флуориметрически [6].

### Биохимическая конверсия нефтяных отходов щебеночного балласта

В процессе очистки щебеночного балласта в роторе с помощью биогеосорбента проводили отбор проб суспензии через 5, 60 мин, 9, 24, 36 ч для определения в ней жирных кислот (далее – ЖК) и расчета ключевых параметров прекурсоров биодизеля.

Экстракцию общих липидов осуществляли по модифицированной методике Синяка и Рудниченко [7], используя флаконы объемом 10 см<sup>3</sup>. Добавляли в трех повторностях по 1–10 мг проб суспензии вместе с 4 см<sup>3</sup> 5 %-ного метанольного раствора соляной кислоты; затем флаконы запаивали и выдерживали в сушильной камере при  $t = 105\text{ }^{\circ}\text{C}$  в течение 1 ч. Полученную реакционную смесь сливали в пробирки с притертыми крышками, заливали 8 см<sup>3</sup> воды и трижды экстрагировали гексаном. Объединенные гексановые экстракты сушили фильтрованием безводным сульфатом натрия и упаривали на роторном испарителе до полного удаления растворителя. Массовую долю липидов определяли гравиметрически.

Инструментальные анализы биомаркеров липидов выполняли с помощью газовой хроматографии в сочетании с масс-спектрометрией (система Thermo Trace-DSQ) на колонке типа TR-1 (Thermo) (5 % метилфенилсилоксан, длина 30 м × 0.32 мм; внутренний диаметр × толщина пленки полидиметилсилоксана 0.25 мкм) с гелием в качестве газа-носителя (постоянный поток 0.6 см<sup>3</sup>/мин) в режимах электронной ионизации (70 эВ) и полного сканирования ( $m/z$  50–550). Температуру термостата колонок повышали со 110 до 350 °C со скоростью 6 °C/мин. Интерпретацию масс-спектров проводили с помощью программного обеспечения Xcalibur Data System ver. 1.4 (Thermo Fisher Scientific Inc., США) и библиотеки масс-спектров NIST 05 ver. 2.0. Качественное содержание кислот определяли методом внутреннего стандарта с *n*-гексадеканом, 0.05 мг см<sup>3</sup> с использованием стандартных образцов метиловых эфиров карбоновых кислот (Supelco, США).

Цетановое число (далее – ЦЧ), йодное число (далее – ЙЧ) и физико-химические свойства полученного биотоплива оценивали на основе состава и содержания индивидуальных ЖК по эмпирическим формулам Talebi et al. [8].

## Результаты и их обсуждение

### Очистка щебеночного балласта от нефтепродуктов

Консорциум активно удалял нефтяное загрязнение с поверхности щебня. Спустя 1 ч экспозиции в суспензии содержание НП в ней составило 0.8 г/дм<sup>3</sup>, а через 72 ч выросло в 2.25 раза до 1.8 г/дм<sup>3</sup>.

При внесении активированного биогеосорбента в ротор со щебеночным балластом спустя 15 мин содержание НП в суспензии составило 0.19 г/дм<sup>3</sup>, а спустя 1 ч увеличилось до 2.2 г/дм<sup>3</sup>.

Отличие загрязненного органикой щебеночного балласта от почвенного грунта, песчаной, глинистой или тор-

фяной почвы состоит в крупных размерах твердой породы и сложности доведения его до однородного состава методом перемешивания и, как следствие, невозможность отбора средних проб. Погрешность анализа НП образцов, отобранных методом соскоба с поверхности щебня, значительно возрастает. Содержание НП в загрязненном щебеночном балласте было оценено как высокое. Использование альгобактериально-дрожжевого консорциума и биогеосорбента в очистке щебеночного балласта приводило к выраженному снижению остаточных НП на его поверхности (табл. 1). Эффективность очистки щебеночного балласта с помощью биологических добавок составила 97–98 %.

Для определения экологической нагрузки на окружающую среду проверяли влияние как очищенного щебеночного балласта, так и отходов его переработки (отработанной суспензии) на почву.

Таблица 1  
Содержание нефтепродуктов на щебне, г/кг

Table 1  
The total petroleum hydrocarbon content on railroad ballast, g/kg

Вариант	Время экспозиции в роторе, ч	Содержание нефтепродуктов, г/кг
Загрязненный щебень	-	24±6.5
Щебень, обработанный консорциумом	1	0.6±0.19
	72	0.7±0.19
Щебень, обработанный биогеосорбентом	0.25	0.6±0.19
	1	0.5±0.18

Отработанную после экспозиции загрязненного щебня суспензию помещали в резервуар-отстойник на 90 сут при комнатной температуре, без аэрации и освещения. Далее суспензию отфильтровывали и определяли содержание ЖК. Осадок высушивали до воздушно-сухого состояния. Содержание НП определяли как в фильтрате, так и в сухом осадке. В фильтрате остаточное содержание НП составило 0.05 г/дм<sup>3</sup>, в осадке – 24 г/кг.

На участок песчаной почвы (НП=0.011 г/кг) сухой осадок, обработанный биогеосорбентом, вносили под вспашку на глубину 50 см. Спустя 30 сут содержание НП в почве участка составило 1.4 г/кг, что не превышало допустимого остаточного содержания нефти (далее – ДОСНП). Параллельно очищенный щебень складировали на поверхности грунта (НП=0.019 г/кг). Спустя 12 месяцев провели анализ почвы на содержание НП под щебнем (рис. 1).

#### Обработка количества циклов загрузки щебеночного балласта в ротор

При проведении исследований эффективности очистки щебеночного балласта при многократном использовании суспензии биогеосорбента было отмечено, что эффект накопления НП наблюдался в течение шести циклов (рис. 2). Накопление отмытых загрязнений в суспензии свыше 200 г/дм<sup>3</sup> резко ухудшало ее действие: при визуальном контроле щебня после шестого и седьмого циклов изменений не фиксировали. Зависимость содержания НП в суспензии от количества циклов загрузки (в диапазоне

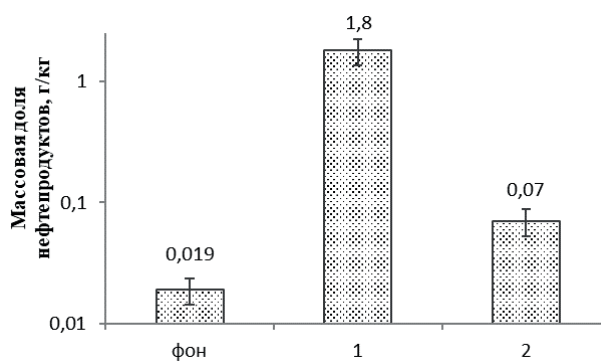


Рисунок 1. Содержание нефтепродуктов спустя 12 месяцев после складирования очищенного щебня на поверхности: 1 – почвы под щебнем, очищенным суспензией биопрепарата; 2 – почвы под щебнем, очищенным суспензией биогеосорбента.

Figure 1. The total petroleum hydrocarbon content in 12 months after spreading ballast decontaminated with 1 – the biopreparation; 2 – the biogeosorbent onto the soil surface.

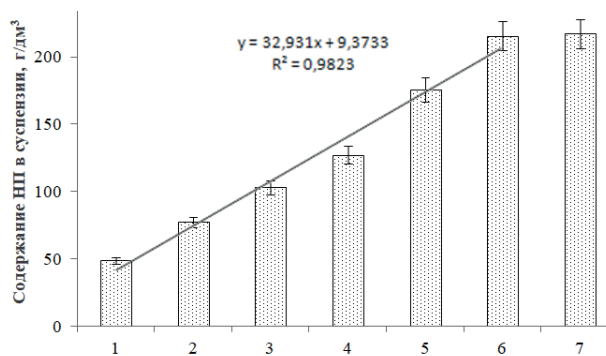


Рисунок 2. Зависимость содержания нефтепродуктов в отработанной суспензии от количества циклов загрузки щебня.

Figure 2. The dependence of the total petroleum hydrocarbon content in the suspension on the number of load cycles.

до шести циклов) наилучшим образом описывает линейная функция (уравнение 1):

$$y=32.931x+9.3733, \quad (1)$$

где  $y$  – массовая доля НП,  $x$  – количество циклов.

Таким образом, повышение содержания НП в суспензии за один цикл при многократном использовании в установке составило 25±3 %. Оптимальное количество циклов многократного использования – пять, так как на шестом цикле, несмотря на повышение содержания НП, невозможен визуальный контроль качества щебня.

#### Биоконверсия отработанной суспензии в биодизель

Актуальным в настоящее время является вовлечение промышленных отходов в хозяйственный оборот в качестве вторичных сырьевых ресурсов [9–11]. Развитие получают многочисленные небиологические технологии переработки нефтесодержащих отходов, направленные на использование их ресурсного потенциала с получением различной товарной продукции, такой как дорожно-строительные материалы, вторичное углеводородное сырье и т.д. Биологические методы же в основном направлены на усиление процессов деградации остаточных НП с утратой энергетического ресурса. Однако биомасса микробиологического происхождения в настоящее время также признана перспективным сырьем в производстве биодизеля

[12–14]. Рациональным решением проблемы утилизации жидких нефтесодержащих отходов может стать технология получения биодизеля из липидных метаболитов как накопленных микроорганизмами в процессе наработки биомассы на этих отходах [15], так и липиды, экстрагированные непосредственно из вторичного сырья в результате ферментативного гидролиза загрязнения. Технологии, в том числе инновационные, а также оборудование и мини-заводы для получения биодизеля подробно описаны de Jesus [16] и Gaul [17], просты и могут использоваться вблизи шламонакопителей для получения топлива с целью обеспечения стационарных промышленных объектов.

Определение экстрагированных ЖК в суспензии проводилось спустя 5, 60 мин, 9, 24 и 36 ч периодического перемешивания в роторе щебеночного балласта в биомассе альгобактериально-дрожжевого консорциума, иммобилизованного на глауконите, который выступал в качестве катализатора для лучшего выхода масел в процессе биоконверсии углеводов [18, 19].

Важной характеристикой получаемого энергетического продукта является его выход от начальной биомассы суспензии (табл. 2).

В ходе экспозиции в роторе было отмечено снижение биомассы суспензии. Максимальный выход биодизеля, определяемый как отношение массы метиловых эфиров ЖК к массе нейтральных липидов, выделенных из образца, составил 58 % в суспензии после 9 ч экспозиции, что свидетельствует о высокой степени пригодности липидов. При этом содержание липидов в биомассе не претерпело достоверных изменений в ходе эксперимента и варьировало в диапазоне 10.6–12.2 %. Падение биомассы и столь низкое содержание липидов может объясняться значительным влиянием неблагоприятных факторов среды, препятствующим липогенезу в клетках.

Оценка изменений жирнокислотного состава имеет значение для прогнозирования качества и стабильности к хранению конечного продукта. Жиры, входящие в состав продукта, в наибольшей степени подвержены окислению по двойным связям, в результате которого меняется ненасыщенность жирных кислот. Показано, что суспензия содержит насыщенные и ненасыщенные жирные кислоты с четным числом атомов углерода от  $C_{12}$  до  $C_{20}$ . Во всех экстрактах преобладала олеиновая кислота ( $C_{18:0}$  46.65–69.7 % от суммарного содержания ЖК) (табл. 3), содержание которой к 24–36 ч экспозиции щебеночного балласта в роторе умень-

шалось. Напротив, наблюдалось увеличение содержания пальмитиновой ( $C_{16:0}$ ) с 17.03 до 26.86 % и пальмитолеиновой ( $C_{16:1}$ ) с 2.77 до 7.5 % ЖК.

Согласно литературным данным, содержание полиненасыщенных жирных кислот с четырьмя и более двойными связями не должно превышать 1.0 % от суммы ЖК [20, 21], а количество линоленовой кислоты ( $C_{18:3}$ ) не должно превышать 12 % [21]. Степень ненасыщенности экстрактов варьировала в диапазоне от 74 до 89, достигая пика к 9 ч экспозиции (табл. 3), что свидетельствует о достаточно высокой устойчивости биотоплив к окислению.

В табл. 4 приведен ряд параметров прекурсоров биодизеля образцов, экстрагированных за 5, 60 мин, 9, 24 и 36 ч, рассчитанный на основе данных по жирнокислотному составу [8].

Общую ненасыщенность жира принято характеризовать величиной ЙЧ, которая выражается в массе йода (г), присоединяющейся к 100 г жира (органического вещества). Чем выше концентрация ненасыщенных жирных кислот, тем выше значение ЙЧ. Йодное число определяют по ГОСТ Р ЕН 14111-2010, как меру брутто-содержания ненасыщенных соединений. Верхний предел ЙЧ г  $I_2$  на 100 г составляет 120 [22, 23]. Биодизель, ЙЧ которого превышает 120, более восприимчив к окислению. Полученные резуль-

Таблица 2

**Эффективность липогенеза в суспензии**

Table 2

**The lipogenesis efficiency in the suspension**

Показатель	Время экспозиции				
	5 мин	60 мин	9 ч	24 ч	36 ч
Биомасса суспензии, г/дм <sup>3</sup>	0.24	0.132±0.013	0.12±0.03	0.11±0.04	0.079±0.006
Содержание липидов, %	12.2	10.8±3.6	12±3	11.8±0.4	10.6±0.4
Выход биодизеля, %	36.3	54±14	58±9	31.0±0.6	39±4

Таблица 3

**Жирнокислотный состав и степень ненасыщенности прекурсоров в образцах суспензии**

Table 3

**The relative fatty acid composition and the unsaturation degree of precursors in the suspension samples**

Компонент, %	Время экспозиции				
	5 мин	60 мин	9 ч	24 ч	36 ч
$C_{12:0}$	0.31	0.61	0.19	0.38	0.40
$C_{14:0}$	2.06	2.98	2.17	2.25	3.46
$C_{15:0}$	0.63	1.12	0.67	0.87	1.28
$C_{16:0}$	17.03	19.36	17.90	19.01	26.86
$C_{16:1}$	2.77	5.07	6.23	8.06	7.54
$C_{17:0}$	0.22	0.29	0.22	0.31	0.40
$C_{18:0}$	1.48	1.81	1.58	1.61	3.17
$C_{18:1}$	69.7	57.90	59.13	56.00	46.65
$C_{18:2}$ (cis-cis)	4.29	8.92	9.91	9.71	9.26
$C_{18:3}$	1.52	1.74	1.91	1.70	0.75
$C_{20:0}$	0.00	0.17	0.10	0.10	0.22
Насыщенные ЖК	21.45	26.34	22.83	24.53	35.80
Мононенасыщенные ЖК	72.46	62.97	65.36	64.06	54.19
Полиненасыщенные ЖК	5.81	10.66	11.82	11.41	10.01
Степень ненасыщенности	84.08	84.29	89.00	86.88	74.21

таты показали, что величина ИЧ прекурсоров биодизеля, накопленных за 5, 60 ч, 9, 24 и 36 сут не превышала верхний предел (табл. 4).

Прекурсоры биодизеля должны соответствовать стандартам по ЦЧ. Цетановое число является фактором, который играет жизненно важную роль в процессе, и обратно пропорционален задержке воспламенения [24]. Применение топлив с ЦЧ ниже 40 приводит к жесткой работе двигателя. При увеличении ЦЧ период задержки воспламенения становится короче, более плавно нарастает давление и снижается его максимальное значение, увеличивается доля топлива, сгораемого во второй фазе. Снижается удельный расход топлива и уменьшается содержание продуктов сгорания из обработавших газов вследствие увеличения скорости сгорания во всех фазах [25]. Однако повышение ЦЧ до 65 и выше ухудшает экономичность двигателя на 0.2–0.3 %, увеличивает дымность. Исследования последних лет показали, что наилучшим является топливо с ЦЧ 50–65 [26]. Стандарту топлива по ЦЧ (ГОСТ 32508–2013) [27] соответствовали все прекурсоры биодизеля независимо от времени накопления (см. табл. 4).

Теплота сгорания является одной из важнейших характеристик топлива, служащих для оценки его энергетических возможностей и экономической эффективности. Удельная теплота сгорания – физическая величина, показывающая количество выделяемой теплоты при полном сгорании 1 кг топлива в кислороде. Она определяет энергию, которую сообщает топливо двигателю, и выражается в джоулях. Количество теплоты, выделяемое при сгорании топлива, зависит от химического состава, а следовательно, от содержания в нем углерода и водорода [28]. В требованиях европейских стандартов установлена минимальная граница теплоты сгорания – 35 МДж/кг. Теплота сгорания прекурсоров биодизеля всех образцов за 5, 60 мин, 9, 24 и 36 ч полностью удовлетворяет требованиям стандарта EN 14214 (см. табл. 4).

Кинематическая вязкость влияет на качество распыления топлива и размер капли. Стандарты биодизеля по кинематической вязкости, согласно ГОСТ 33131–2014, составляют 1.9–4.1 мм<sup>2</sup>/с [26]. При превышении стандартов топливо образует более крупные капли при впрыскивании, что приводит к неэффективному распылению, увеличению количества отложений в двигателе, повышению уровня энергии, необходимой для перекачки топлива, росту количества выхлопных газов и выбросов [21]. Прекурсоры биодизеля соответствуют стандартам кинематической вязкости (см. табл. 4).

#### Ключевые параметры биодизеля, полученного из различных экстрактов суспензии

#### Key parameters of biodiesel obtained from different suspension extracts

Показатель	Время экспозиции				
	5 мин	60 мин	9 ч	24 ч	36 ч
Цетановое число	55.7	55.3	54.4	54.7	57.2
Йодное число, г/100 г	77.4	78.1	82.6	80.1	68.3
Теплота сгорания, МДж/кг	39.48	39.41	39.44	39.42	39.37
$\nu$ , мм <sup>2</sup> /с	3.92	3.83	3.84	3.81	3.81
$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	0.87	0.87	0.88	0.88	0.87

Плотность влияет на массу топлива, впрыскиваемого в камеру сгорания, и на соотношение в ней воздух : топливо. В требованиях стандарта DIN EN 14213–2003 установлена граница плотности биодизеля –  $\rho=0.85–0.9$  г/см<sup>3</sup>. Поскольку подача топлива насосом определяется его объемом, а не массой, то впрыск топлива с большей плотностью обеспечивает доставку в двигатель большей массы топлива [21]. Как следует из результатов расчета (см. табл. 4), плотность биодизеля, полученного на основе образцов суспензии, соответствует стандартам.

## Выводы

В результате проведенных экспериментов по разработке биотехнологии очистки щебеночного балласта выявлено:

- микроорганизмы в иммобилизованной форме (биогеосорбент) эффективнее трансформировали НП, чем в свободной форме (альгобактериально-дрожжевой консорциум);
- при интенсивном перемешивании время очистки в биореакторе можно сократить до 15 мин;
- содержание НП на поверхности щебеночного балласта после его очистки было минимально и не несло экологическую нагрузку на почву;
- в суспензии происходила биодеградация НП с щебня до уровня ДОСНП;
- оптимальным являлось использование суспензии в течение пяти циклов. При накоплении отмытых загрязнений в суспензии свыше 200 г/дм<sup>3</sup> резко снижалась эффективность очистки щебеночного балласта;
- цетановое и йодное числа, теплота сгорания, вязкость и плотность полученных прекурсоров биодизеля независимо от времени экспозиции соответствовали требованиям европейского стандарта EN 14214 и межгосударственным стандартам ГОСТ 33131 – 2014.

Разработанная биотехнология очистки щебеночного балласта и получения прекурсора биодизеля – новое направление экологически безопасных технологий применения микроорганизмов в контексте не только разложения, но и валоризации опасных нефтесодержащих отходов.

## Источники и литература

1. Jing, G. Numerical investigation of the behavior of stone ballast mixed by steel slag in ballasted railway track / G. Jing, J. Wang, H. Wang, M. Siahkouhi // Construction and Building Materials. – 2020. – Vol. 262. – 120015. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120015.
2. Колос, А. Ф. Засорение и загрязнение щебеночного балласта при эксплуатации железнодорожного пути / А. Ф. Колос // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2022. – Т. 19, вып. 3. – С. 558–575. – DOI : 10.20295/1815-588X-2022-3-558-575.

3. Способ очистки щебня при ликвидации разливов нефтепродуктов на предприятиях железнодорожной отрасли, а также аварий и разливов нефтепродуктов на тракционных путях общего пользования : пат. 2700529 Российская Федерация, МКП Е01В 27/06 (2006.01), В08В 3/08 (2006.01) / Д. А. Бородкин, Н. А. Хоменко, А. Н. Страхов; заявители и патентообладатели: Д. А. Бородкин, Н. А. Хоменко, А. Н. Страхов. – № 2019102247; заявл. 28.01.2019; опубл. 17.09.2019.
4. Анчугова, Е. М. Биотехнология глубокой очистки щебеночного балласта железной дороги от нефтезагрязнений / Е. М. Анчугова, В. Н. Некрасова, Т. Н. Шемелинина // Утилизация отходов производства и потребления: инновационные подходы и технологии: I Всероссийский форум «Утилизация и рециклинг отходов производства и потребления»: материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием: 4 декабря 2019 г. [Киров]: Книга 1. – Киров: ВятГУ, 2019. – С. 84–87.
5. Федасов, Д. С. Повышение надежности гидропривода вырезающего устройства щебнеочистительных машин: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Д. С. Федасов. – Москва, 2021. – 170 с.
6. Методика выполнения измерений массовой доли нефтепродуктов в пробах почв и грунтов флуориметрическим методом на анализаторе жидкости «Флюорат-02». – Санкт-Петербург: Люмэкс-Маркетинг, 2012. – 22 с.
7. Синяк, К. М. Стандартизация и воспроизводимость газохроматографических исследований жирных кислот в клетках микроорганизмов / К. М. Синяк, В. Ф. Рудиченко // Известия Академии наук СССР. Серия биологическая. – 1987. – № 1. – С. 55–61.
8. Talebi, A. F. BiodieselAnalyzer<sup>®</sup>: a user-friendly software for predicting the properties of prospective biodiesel / A. F. Talebi, M. Tabatabaei, Y. Chisti // *Biofuel Research Journal*. – 2014. – № 2. – P. 55–57. – DOI : 10.18331/BRJ2015.1.2.4.
9. Owolabi, R. U. Biodiesel: fuel for the future (a brief review) / R. U. Owolabi, A. L. Adejumo, A. F. Aderibigbe // *International Journal of Energy Engineering*. – 2012. – Vol. 2, № 5. – P. 223–231. – DOI : 10.5923/j.ijee.20120205.06.
10. Ho, D. P. A mini review on renewable sources for biofuel / D. P. Ho, H. H. Ngo, W. Guo // *Bioresour. Technol.* – 2014. – Vol. 169, № 10. – P. 742–749. – DOI : 10.1016/j.biortech.2014.07.022.
11. Ghosh, A. Systems and synthetic biology for the microbial production of biofuels / A. Ghosh // *Current Metabolomics*. – 2016. – Vol. 4, № 1. – P. 5–13. – DOI : 10.2174/2213235X03666151012192823.
12. Ma, Y. Biodiesels from microbial oils: Opportunity and challenges / Y. Ma, Z. Gao, Q. Wang, Y. Liu // *Bioresour. Technol.* – 2018. – Vol. 263. – P. 631–641. – DOI : 10.1016/j.biortech.2018.05.028.
13. Sitepu, E. K. Critical evaluation of process parameters for direct biodiesel production from diverse feedstock / E. K. Sitepu, K. Heimann, C. L. Raston, W. Zhang // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2020. – Vol. 123. – P. 109762. – DOI : 10.1016/j.rser.2020.109762.
14. Shchemelinina, T. N. Microfungal strains – potential lipid producers for biodiesel / T. N. Shchemelinina, N. V. Matistov, V. A. Kovaleva, M. Yu. Markarova, I. V. Gruzdev [et al.] // *Applied Biochemistry and Microbiology*. – 2017. – Vol. 53, № 4. – P. 441–447. – DOI : 10.1134/S0003683817040135.
15. Shchemelinina, T. N. Petroleum sludge as a feedstock for the microbial biodiesel production: emerging prospects / T. N. Shchemelinina, E. M. Anchugova, M. Yu. Markarova, K. G. Ufimtsev, I. V. Beshley // *Waste Biomass Valorization*. – 2022. – DOI : 10.1007/s12649-022-01894-8.
16. de Jesus, D. S. S. Design automation of the manufacturing process of a mini-biodiesel plant / D. S. S. de Jesus // *IFAC Proceedings Volumes*. – 2013. – Vol. 46, № 24. – P. 32–39. – DOI : 10.3182/20130911-3-BR-3021.00006.
17. Gaul, M. A comparative study of small-scale rural energy service pathways for lighting, cooking and mechanical power / M. Gaul // *Applied Energy*. – 2013. – Vol. 101. – P. 376–392. – DOI : 10.1016/j.apenergy.2012.03.050.
18. Kusuma, R. I. Natural zeolite from Pacitan Indonesia, as catalyst support for transesterification of palm oil / R. I. Kusuma, J. P. Hadinoto, A. Ayucitra, F. E. Soetaredjo, S. Ismadji // *Applied Clay Science*. – 2013. – Vol. 74. – P. 121–126. – DOI : 10.1016/j.clay.2012.04.021.
19. Gaide, I. Natural rocks – heterogeneous catalysts for oil transesterification in biodiesel synthesis / I. Gaide, V. Makareviciene, E. Sendzikiene, K. Kazancev // *Catalysts*. – 2021. – Vol. 11. – P. 384. – DOI : 10.3390/catal11030384.
20. Получение биодизельного топлива на основе липидов мицелиальных грибов / В. В. Лунин, Я. Э. Сергеева, Л. А. Галанина, И. С. Мысякина, А. А. Ивашчин [и др.] // *Прикладная биохимия и микробиология*. – 2013. – Т. 49, № 1. – С. 53–60.
21. Расчет характеристик биодизельного топлива на основе жирнокислотного состава липидов некоторых биотехнологически значимых микроорганизмов / Я. Э. Сергеева, Е. Б. Мостова, К. В. Горин, А. В. Комова, И. А. Конова [и др.] // *Прикладная биохимия и микробиология*. – 2017. – Т. 33, № 1. – С. 53–61.
22. Lapuerta, M. Properties of fatty acid glycerol formal ester (FAGE) for use as a component in blends for diesel engines / M. Lapuerta, J. Rodríguez-Fernández, C. Estevez, N. Bayarri // *Biomass & Bioenergy*. – 2015. – Vol. 76. – P. 130–140. – DOI : 10.1016/j.biombioe.2015.03.008.
23. Mohd Noor, C. W. Biodiesel as alternative fuel for marine diesel engine applications: a review / C. W. Mohd Noor, M. M. Noor, R. Mamat // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2018. – Vol. 94. – P. 127–142. – DOI : 10.1016/j.rser.2018.05.031.
24. Dhamodaran, G. A comparative study of combustion, emission, and performance characteristics of ricebran-, neem-, and cottonseed-oil biodiesels with varying degree of unsaturation / G. Dhamodaran, R. Krishnan, Y. K. Pochareddy, H. M. Pyarelal, H. Sivasubramanian [et al.] // *Fuel*. – 2017. – Vol. 187. – P. 296–305. – DOI : 10.1016/j.fuel.2016.09.062.
25. Морозов, В. И. Современный способ повышения эффективности камер сгорания тепловых двигателей /

- В. И. Морозов, Ю. М. Терещенко, И. В. Морозова // Евразийский Союз Ученых (ЕСУ). – 2016. – Т. 7, № 28. – С. 29–31.
26. Chong, H. S. Real-world fuel consumption, gaseous pollutants, and CO<sub>2</sub> emission of light-duty diesel vehicles / H. S. Chong, S. Kwon, Y. Lim, J. Lee // *Sustainable Cities and Society*. – 2020. – Vol. 53. – 101925. – DOI : 10.1016/j.scs.2019.101925.
  27. Межгосударственный стандарт. Смеси биодизельного топлива (B6–B12). Технические требования : ГОСТ 33131–2014. – Москва : Стандартинформ, 2015. – 16 с.
  28. Ивашечкин, А. А. Липиды мицелиальных грибов как основа для создания биодизельного топлива : автореф. дис. ... канд. биол. наук / А. А. Ивашечкин. – Москва, 2015. – 142 с.
- ## References
1. Jing, G. Numerical investigation of the behavior of stone ballast mixed by steel slag in ballasted railway track / G. Jing, J. Wang, H. Wang, M. Siahkouhi // *Constr. Build. Mater.* – 2020. – Vol. 262. – 120015. – DOI : 10.1016/j.conbuildmat.2020.120015.
  2. Kolos, A. F. Zасorenie i zagryaznenie shchebenochnogo ballasta pri ekspluatatsii zheleznodorozhnogo puti [Clogging and pollution of broken stone ballast during railway track exploitation] / A. F. Kolos // *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya* [Proceedings of the Petersburg Transport University]. – Vol. 19, № 3. – P. 558–575. – DOI : 10.20295/1815-588X-2022-3-558-575.
  3. Sposob ochistki shchebnaya pri likvidatsii razlivov nefteproduktov na predpriyatiyah zheleznodorozhnoj otrasli, a takzhe avarij i razlivov nefteproduktov na trakcionnyh putyah obshchego pol'zovaniya [Method of crushed stone cleaning during liquidation of oil spills on railway, as well as accidents and spills of petroleum products on traction roads of general use]: pat. 2019102247: application 28.01.2019 Russian Federation, MCP E01B 27/06 (2006.01), B08B 3/08 (2006.01) / D. A. Borodkin, N. A. Khomenko, A. N. Strakhov, proprietors D. A. Borodkin, N. A. Khomenko, A. N. Strakhov. – № 2019102247; dec. 28.01. 2019; publ. 17.09. 2019.
  4. Anchugova, E. M. Biotekhnologiya glubokoj ochistki shchebenochnogo ballasta zheleznoj dorogi ot neftezagryaznenij [The biotechnology of oil polluted railroad ballast fine cleaning] / E. M. Anchugova, V. N. Nekrasova, T. N. Shchemelinina // *Utilizatsiya othodov proizvodstva i potrebleniya: innovatsionnye podhody i tekhnologii. Materialy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Utilization of production and consumption waste. Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation]: December 4, 2019 [Kirov] : Book 1. – Kirov : VyatGU, 2019. – P. 84–87.
  5. Fedasov, D. S. Povyshenie nadezhnosti gidroprivoda rezayushchego ustrojstva shchebneochistitel'nyh mashin [The reliability improvement of a cutting tool hydraulic drive of crushed stone cleaning machines] : Candidate's thesis (Engineering) / D. S. Fedasov. – Moscow, 2021. – 170 p.
  6. Metodika vypolneniya izmerenij massovoj doli nefteproduktov v probah pochv i gruntov fluorimetricheskim metodom na analizatore zhidkosti «Flyuorat-02» [The procedure of measurements of total petroleum hydrocarbon content in soil and ground by the fluorimetric method using the Flyuorat-02 fluid analyzer] // Saint-Petersburg : Lumex-Marketing Ltd, 2012. – 22 p.
  7. Sinyak, K. M. Standartizatsiya i vosproizvodimost' gazohromatograficheskikh issledovanij zhirnykh kislot v kletkah mikroorganizmov [Standardization and reproducibility of gas chromatography studies of fatty acids in cells of microorganisms] / K. M. Sinyak, V. F. Rudichenko. – Proceedings of the Academy of Sciences of the USSR. Biological series. – 1987. – № 1. – P. 55–61.
  8. Talebi, A. F. BiodieselAnalyzer®: a user-friendly software for predicting the properties of prospective biodiesel / A. F. Talebi, M. Tabatabaei, Y. Chisti // *Biofuel Research Journal*. – 2014. – № 2. – P. 55–57. – DOI : 10.18331/BRJ2015.1.2.4.
  9. Owolabi, R. U. Biodiesel: fuel for the future (a brief review) / R. U. Owolabi, A. L. Adejumo, A. F. Aderibigbe // *International Journal of Energy Engineering*. – 2012. – Vol. 2, № 5. – P. 223–231. – DOI : 10.5923/j.ijee.20120205.06.
  10. Ho, D. P. A mini review on renewable sources for biofuel / D. P. Ho, H. H. Ngo, W. Guo // *Bioresource Technology*. – 2014. – Vol. 169, № 10. – P. 742–749. – DOI : 10.1016/j.biortech.2014.07.022.
  11. Ghosh, A. Systems and synthetic biology for the microbial production of biofuels / A. Ghosh // *Current Metabolomics*. – 2016. – Vol. 4, № 1. – P. 5–13. – DOI : 10.2174/2213235X03666151012192823.
  12. Ma, Y. Biodiesels from microbial oils: Opportunity and challenges / Y. Ma, Z. Gao, Q. Wang, Y. Liu // *Bioresource Technology*. – 2018. – Vol. 263. – P. 631–641. – DOI : 10.1016/j.biortech.2018.05.028.
  13. Sitepu, E. K. Critical evaluation of process parameters for direct biodiesel production from diverse feedstock / E. K. Sitepu, K. Heimann, C. L. Raston, W. Zhang // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2020. – Vol. 123. – 109762. – DOI : 10.1016/j.rser.2020.109762.
  14. Shchemelinina, T. N. Microfungal strains – potential lipid producers for biodiesel / T. N. Shchemelinina, N. V. Matistov, V. A. Kovaleva, M. Yu. Markarova, I. V. Gruzdev [et al.] // *Applied Biochemistry and Microbiology*. – 2017. – Vol. 53, № 4. – P. 441–447. – DOI : 10.1134/S0003683817040135.
  15. Shchemelinina, T.N. Petroleum sludge as a feedstock for the microbial biodiesel production: emerging prospects / T. N. Shchemelinina, E. M. Anchugova, M. Yu. Markarova, K. G. Ufimtsev, I. V. Beshley // *Waste Biomass Valorization*. – 2022. – DOI : 10.1007/s12649-022-01894-8.
  16. de Jesus, D. S. S. Design automation of the manufacturing process of a mini-biodiesel plant / D. S. S. de Jesus // *IFAC Proceedings Volumes*. – 2013. – Vol. 46, № 24. – P. 32–39. – DOI : 10.3182/20130911-3-BR-3021.00006.
  17. Gaul, M. A comparative study of small-scale rural energy service pathways for lighting, cooking and mechanical power / M. Gaul // *Applied Energy*. – 2013. – Vol. 101. – P. 376–392. – DOI : 10.1016/j.apenergy.2012.03.050.

18. Kusuma, R. I. Natural zeolite from Pacitan Indonesia, as catalyst support for transesterification of palm oil / R. I. Kusuma, J. P. Hadinoto, A. Ayucitra, F. E. Soetaredjo, S. Ismadji // *Applied Clay Science*. – 2013. – Vol. 74. – P. 121–126. – DOI : 10.1016/j.clay.2012.04.021.
19. Gaide, I. Natural rocks – heterogeneous catalysts for oil transesterification in biodiesel synthesis / I. Gaide, V. Makareviciene, E. Sendzikiene, K. Kazancev // *Catalysts*. – 2021. – Vol. 11. – 384. – DOI: 10.3390/catal11030384.
20. Lunin, V. V. Poluchenie biodizelnogo topliva na osnove lipidov mitselialnykh gribov [Biodiesel fuel production from lipids of filamentous fungi] / V. V. Lunin, Ya. E. Sergeeva, L. A. Galanina, I. S. Mysyakina, A. A. Ivashechkin [et al.] // *Applied Biochemistry and Microbiology*. – 2013. – Vol. 49. – P. 46–52. – DOI : 10.1134/S0003683813010122.
21. Sergeeva, Ya. E. Raschet kharakteristik biodizelnogo topliva na osnove zhirnokislотного состава lipidov nekotorykh biotekhnologicheskikh znachimykh mikroorganizmov [Calculation of biodiesel fuel characteristics based on the fatty acid composition of the lipids of some biotechnologically important microorganisms] / Ya. E. Sergeeva, E. B. Mostova, K. V. Gorin, A. V. Komova, I. A. Konova [et al.] // *Applied Biochemistry and Microbiology*. – 2017. – Vol. 53. – P. 807–813. – DOI : 10.1134/S0003683817080063.
22. Lapuerta, M. Properties of fatty acid glycerol formal ester (FAGE) for use as a component in blends for diesel engines / M. Lapuerta, J. Rodríguez-Fernández, C. Estevez, N. Bayarri // *Biomass & Bioenergy*. – 2015. – Vol. 76. – P. 130–140. – DOI : 10.1016/j.biombioe.2015.03.008.
23. Mohd Noor, C. W. Biodiesel as alternative fuel for marine diesel engine applications: a review / C. W. Mohd Noor, M. M. Noor, R. Mamat // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2018. – Vol. 94. – P. 127–142. – DOI : 10.1016/j.rser.2018.05.031.
24. Dhamodaran, G. A comparative study of combustion, emission, and performance characteristics of rice-bran-, neem-, and cottonseed-oil biodiesels with varying degree of unsaturation / G. Dhamodaran, R. Krishnan, Y. K. Pochareddy, H. M. Pyarelal, H. Sivasubramanian [et al.] // *Fuel*. – 2017. – Vol. 187. – P. 296–305. – DOI : 10.1016/j.fuel.2016.09.062.
25. Morozov, V. I. Sovremennyy sposob povysheniya effektivnosti kamer sgoraniya teplovykh dvigatelej [A modern way to improve the efficiency of the heat engine combustion chamber] / V. I. Morozov, Yu. M. Tereshchenko, I. V. Morozova // *Evrazijskiy Soyuz Uchenykh [Eurasian Union of Scientists (EUS)]*. – 2016. – Vol. 7, № 28. – P. 29–31.
26. Chong, H. S. Real-world fuel consumption, gaseous pollutants, and CO<sub>2</sub> emission of light-duty diesel vehicles / H. S. Chong, S. Kwon, Y. Lim, J. Lee // *Sustainable Cities and Society*. – 2020. – Vol. 53. – 101925. – DOI : 10.1016/j.scs.2019.101925.
27. Mezghosudarstvennyy standart. Smesi biodizel'nogo topliva (B6–B12). Tekhnicheskie trebovaniya: GOST 33131–2014. [The interstate standard. Biodiesel fuel blends (B6–B12). Technical requirements. Russian National Standard 33131–2014]. – Moscow : Standartinform, 2015. – 16 p.
28. Ivashechkin, A. A. Lipidy micelialnykh gribov kak osnova dlya sozdaniya biodizel'nogo topliva [Lipids of filamentous fungi as an opportunity to generate biodiesel fuels]: Candidate's thesis (Biology) / A. A. Ivashechkin. – Moscow, 2015. – 142 p.

### Благодарности (госзадание)

Работа выполнена при финансировании государственного задания № 1021051101411–4–1.6.23 «Научно-обоснованные биотехнологии для улучшения экологической обстановки и здоровья человека на Севере».

Авторы выражают благодарность экоаналитической лаборатории Института биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН за проведение количественного химического анализа.

### Информация об авторах:

**Щемелинина Татьяна Николаевна** – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории биохимии и биотехнологии Института биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук; Scopus Author ID – 56711948200, <https://orcid.org/0000-0002-4052-6424> (167982, Российская Федерация, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28; e-mail: tatyana\_komi@mail.ru).

**Анчугова Елена Михайловна** – младший научный сотрудник лаборатории биохимии и биотехнологии Института биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук; Scopus Author ID – 56711975900, <https://orcid.org/0000-0002-7912-3518> (167982, Российская Федерация, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28; e-mail: anchugova@ib.komisc.ru).

### About the authors:

**Tatiana N. Shchemelinina** – Candidate of Sciences (Biology), Senior Researcher at the Laboratory of Biochemistry and Biotechnology, Institute of Biology FRC Komi SC UB RAS; Scopus Author ID 56711948200, <https://orcid.org/0000-0002-4052-6424> (Institute of Biology, Federal Research Centre Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; 28 Kommunisticheskaya st., 167982 Syktyvkar, Komi Republic, Russian Federation; e-mail: tatyana\_komi@mail.ru).



**Elena M. Anchugova** – Junior Researcher at the Laboratory of Biochemistry and Biotechnology, Institute of Biology FRC Komi SC UB RAS; Scopus Author ID 56711975900, <https://orcid.org/0000-0002-7912-3518> (Institute of Biology, Federal Research Centre Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; 28 Kommunisticheskaya st., 167982 Syktyvkar, Komi Republic, Russian Federation; e-mail: anchugova@ib.komisc.ru).

**Для цитирования:**

Щемелинина, Т. Н. Биотехнология очистки щебеночного балласта и получения биодизеля / Т. Н. Щемелинина, Е. М. Анчугова // Известия Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук. Серия «Экспериментальная биология и экология». – 2023. – № 6 (64). – С. 5–13.

**For citation:**

Shchemelinina, T. N. Biotekhnologiya ochistki shchebenochnogo ballasta i polucheniya biodizelya [The biotechnology of railroad crashed stone ballast remediation with simultaneous producing of fatty acids suitable as biodiesel precursors] / T. N. Shchemelinina, E. M. Anchugova // Proceedings of the Komi Science Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Series “Experimental Biology and Ecology”. – 2023. – № 6 (64). – P. 5–13.

Дата поступления статьи: 30.01.2023

Прошла рецензирование: 06.02.2023

Принято решение о публикации: 07.07.2023

Received: 30.01.2023

Reviewed: 06.02.2023

Accepted: 07.07.2023