——— ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИИ —

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БИОГАЗА КАК СПОСОБ РЕШЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ

© 2021 г. В. А. Кулагин^{а,*}, Н. В. Дунаева^{а,**}, Д. Д. Яковлева^{а,***}

а Институт энергетических исследований РАН, Москва, Россия

*E-mail: vakulagin@hse.ru

**E-mail: nataly_25_04_92@mail.ru

***E-mail: yakovlevadariad@yandex.ru

Поступила в редакцию 20.01.2020 г. После доработки 09.09.2020 г. Принята к публикации 15.10.2020 г.

В статье анализируются новые технологические способы использования биогаза — энергетического ресурса, распространённого во многих странах мира. Биогаз рассматривается авторами не только как вид энергии, но и как одно из средств решения экологических проблем, в частности, в российских мегаполисах, где наиболее остро стоят проблемы утилизации твёрдых коммунальных отходов и загрязнения окружающей среды. В работе представлены мировой опыт использования биогаза и перспективы его применения в России с учётом национальных особенностей, включая конкуренцию с другими видами топлива и государственное регулирование.

Ключевые слова: биогаз, экология, отходы, выбросы, затраты, себестоимость.

DOI: 10.31857/S0869587321010060

Во многих странах мира биогаз признан не только перспективным энергетическим ресурсом, он рассматривается как один из способов решения экологических проблем. Существуют крупные государственные программы по поддержке этого направления. Однако в России бизнес на биогазе пока не получил широкого распространения и ограничивается точечными проектами экспериментального характера. Между тем проблема утилизации и переработки отходов, решению которой могли бы способствовать биогазовые технологии, становится всё острее.

Растущие экологические угрозы для российских мегаполисов и окружающей среды. На примере Московского региона можно убедиться, что полигоны твёрдых коммунальных отходов (ТКО) и их рекультивация, а также заводы по термической обработке мусора существенно ухудшают экологическую ситуацию из-за выбросов загрязняющих веществ в атмосферу. Так, в 2017—2019 гг. жители Москвы и Подмосковья многократно жаловались на выбросы свалочного газа, концентрация которого превышала предельно допустимые нормы, что приводило даже к госпитализации граждан [1—4].







КУЛАГИН Вячеслав Александрович — заведующий отделом исследования энергетического комплекса мира и России ИНЭИ РАН. ДУНАЕВА Наталья Викторовна — инженер ИНЭИ РАН. ЯКОВЛЕВА Дарья Дмитриевна — инженер ИНЭИ РАН.

Не менее остро проблема утилизации отходов стоит в сельскохозяйственном производстве. Стремительное нарашивание промышленных мощностей свиноводческих комплексов приводит к значительному увеличению отходов от забоя животных и скоплению вокруг предприятий продуктов их жизнедеятельности, отличающихся высоким содержанием экологически опасных компонентов. В соответствии с Федеральным классификационным каталогом отходов они относятся к 3 классу опасности [5, 6]. Такая тенденция и частое нарушение существующих законных способов утилизации (производство удобрений, компостирование и внесение навоза на пахотные земли) сокращают плошади свободных сельскохозяйственных угодий, доступных для внесения органических удобрений, так как отходы, не прошедшие необходимые стадии очистки, отравляют землю.

Концепция комплексного управления отходами заключается в применении дифференцированных методов обращения с разными компонентами ТКО и использовании экономических, нормативно-правовых, организационно-управленческих, технологических и информационных регуляторов с учётом особенностей функционирования системы на той или иной территории. Система управления отходами представляет собой совокупность работ по организации, сбору, учёту, транспортировке и сортировке ТКО. Сюда же входят технические методы обращения с отходами — переработка, компостирование, захоронение и сжигание.

В России население практически не сортирует отходы, что объясняется достаточно низким уровнем информированности об основных принципах этого процесса и неготовностью инфраструктуры. Коммунальные службы начали сортировать мусор только в последние годы, когда удалось внедрить территориальные схемы обращения с отходами, поэтому процесс ещё не получил должного развития. Кроме того, мощности для сжигания отходов ограничены, остаётся открытым и вопрос экологической приемлемости такого решения.

Более 90% ТКО в нашей стране подлежат захоронению. Эта методика, несомненно, обладает рядом преимуществ, к которым относят довольно низкие затраты на содержание свалок и полигонов, возможность размещения там широкой номенклатуры отходов с последующей рекультивацией площадок под сельскохозяйственные и социальные нужды. Но есть и негативные последствия захоронения мусора, связанные с загрязнением грунтовых вод и земли токсичными веществами, а также неконтролируемыми выбросами в атмосферу свалочного газа [8, 9].

Усилия Европейского Союза, Японии и других развитых стран направлены на ликвидацию

свалок как понятия в системе управления отходами, переход к экономике замкнутого цикла (circular economy) и концепции так называемых нулевых отходов (zero waste). Однако в нашей стране, если учитывать состояние дел в области обращения с отходами, существующие объёмы свалок и скорость их рекультивации, нельзя прогнозировать минимизацию захоронения ТКО вплоть до нуля ранее 2050-х годов. Задача сегодняшнего дня — найти перспективные способы использования свалок. Мировой опыт показывает, что современные технологии позволяют извлекать выделяемый биогаз, который образуется на свалке, предотвращая его эмиссию в окружающую среду, и получать из него энергию с приемлемыми экономическими показателями. Даже при переходе к концепции нулевых отходов биогаз может оставаться одним из важных элементов в производственной цепочке обращения с отхолами.

Новые технологии использования биогаза и мировой опыт их применения. Биогаз производят путём анаэробного брожения биомассы. В зависимости от вида обрабатываемого сырья и типа переработки выделяют три обособленных направления его производства:

- свалочный газ (landfill gas), образующийся при разложении неопасных муниципальных бытовых отходов;
- газ сточных вод (sewage sludge gas), образующийся на очистных сооружениях;
- другие биогазы анаэробного брожения (biogases from anaerobic digestion), образующиеся при ферментации энергетических культур и органических отходов.

Таблица 1. Химический состав биогаза и природного газа, %

,		
Компоненты	Биогаз анаэробной ферментации	Природный газ
Метан	50-85	83–98
Углекислый газ	15-50	0-1.4
Азот	0-1	0.6-2.7
Кислород	0.01-1	_
Водород	Менее 1	_
Сероводород	Менее 1	_
Аммиак	Менее 1	_
Этан	_	До 11
Пропан	_	До 3
и [(1	•	•

Источник: [6].

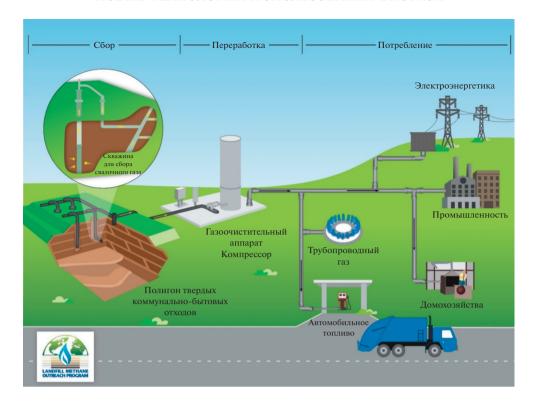


Рис. 1. Схема получения и использования свалочного газа *Источник*: [13].

Ценность биогаза как энергетического сырья определяется тем, что в его состав входит метан (50–85%), а также углекислый газ и незначительные примеси кислорода, сероводорода, азота, аммиака и водорода, что диктует необходимость его очистки (табл. 1).

Темпы роста промышленного производства биогаза в странах разные, причём толчком для развития таких технологий зачастую служит именно государственная политика. Страны осуществляют инвестиции в различные типы биогазовых систем в зависимости от принятых экологических и энергетических программ. Например, в Великобритании, США и Южной Корее большую часть биогаза получают из свалочного газа, тогда как в Болгарии и Швеции производственные мощности созданы на установках по очистке сточных вод. Дания больше использует навоз, борясь таким образом с его перепроизводством. В Германии основным исходным сырьём служат энергетические культуры и пищевые отходы.

Технология получения свалочного газа отличается от других типов его производства. Ключевым в получении любого биогаза служит анаэробное сбраживание биомассы — энергетических культур, твёрдых и жидких органических и бытовых отходов [7]. Но если наиболее распространённый метод производства биогаза предполагает наличие специальной ёмкости — биогазовой

установки (метантанкер, дигестор), то в случае со свалочным газом необходим обустроенный полигон для его сбора, отвечающий современным экологическим нормам. На полигоне роют котлован, дно которого застилают специальной мембраной и покрывают слоем глины для предотвращения проникновения продуктов гниения в почву и грунтовые воды. После загрузки отходов его оснащают сетью вертикальных скважин, горизонтальных трубопроводов и насосным оборудованием для отвода жидких продуктов разложения мусора и сбора свалочного газа. Газ, образующийся в процессе разложения мусора, поступает по трубам в газоочистительный аппарат, где освобождается от частиц пыли и ненужных примесей (например, серы) и поступает на компрессор, после чего он готов к употреблению [10, 8].

Вне зависимости от типа производства биогаз можно различными способами преобразовать в биометан — полный аналог природного газа — и использовать как ценный местный источник энергии и тепла. При этом существуют сопутствующие потенциальные выгоды в виде продажи излишков энергии в сеть. Тем самым решается проблема утилизации отходов и снижения расходов на эти цели. Кроме того, создаётся замкнутый цикл производства, что особенно актуально не только для сельскохозяйственных, но и мусороперерабатывающих предприятий. Очищенный до

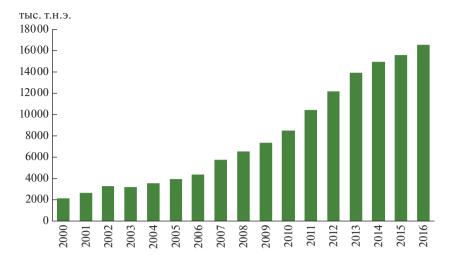


Рис. 2. Объём производства биогаза в странах ЕС *Источник*: [17].



Рис. 3. Количество биогазовых станций в странах ЕС в зависимости от вида обрабатываемого сырья *Источник*: [18].

биометана газ также можно передавать в трубопроводную сеть и далее потреблять наравне с природным газом (рис. 1).

Однако в России главное преимущество биогаза состоит не в возможности его использования в качестве дополнительного энергоресурса, а в том, что с его помощью вместе с этим можно решать экологические проблемы. Неконтролируемо выделяемый в атмосферу свалочный газ — серьёзная угроза для человека и окружающей среды. Кроме того, с ним связаны высокие риски возгорания. Поэтому сбор и утилизация свалочного газа относят к наиболее эффективным способам борьбы с выбросами загрязняющих веществ в атмосферу.

На протяжении последних пяти лет биогаз среди других энергоресурсов стабильно занимает третье место в мире по темпам роста производства. В 2017 г. они составили 11.9%, данные на 2018 г. свидетельствуют о сохранении динамики. Крупнейшими производителями биогаза остаются Китай, Германия, США, Италия и Великобритания, на которые приходятся почти 80% мировых объёмов ценного ресурса. Доля биогаза в генерации электроэнергии в 1990—2017 гг. выросла с 0.3 до 3.0%. Объёмы производства достигли 81.4 ТВт · ч, а установленная мощность — 14.7 ГВт. Лидирующие позиции занимают Германия (34.3 ТВт · ч), США (12.5), Италия (8.3) и Великобритания (7.7) [15].

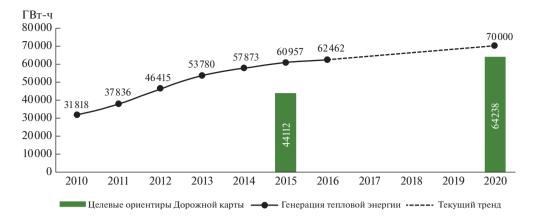


Рис. 4. Сравнение текущего тренда генерации электроэнергии из биогаза с целевыми ориентирами National Renewable Energy Action Plan *Источник*: 1191.



Рис. 5. Сравнение текущего тренда производства тепловой энергии из биогаза с целевыми ориентирами National Renewable Energy Action Plan *Источник*: [19].

Производство биогаза наиболее устойчиво растёт в Европе. Объясняется это тем, что именно развитые страны ЕС стали пионерами внедрения программ перехода на альтернативные виды топлива и поддерживают инициативы, направленные на разработку новых технологий в этой сфере.

В 2016 г. общий объём произведённого в ЕС биогаза составил 16.6 млн т нефтяного эквивалента (н.э.) (рис. 2). Из них 9.2% приходится на биогаз сточных вод, 16% — на свалочный газ, подавляющая часть топлива была получена из органических отходов и энергетических культур в специальных установках (рис. 3). Однако в связи с административными ограничениями, регламентирующими использование энергетических культур для производства биогаза, темпы роста производства этого типа биогаза существенно замедлились, что в соответствии с целевыми ориентирами ЕС потребует увеличения его добычи на свалках и очистных сооружениях (рис. 4, 5).

Большая часть биогаза (62%) используется для производства электроэнергии, оставшиеся объёмы идут на генерацию тепла (27%) и производство биометана (11%). В 2016 г. производство электроэнергии из биогаза достигло 62.6 ТВт \cdot ч, тепла — 694.8 тыс. т н.э. Количество биогазовых установок в Европе ежегодно растёт — в 2016 г. оно увеличилось до 17 662 единиц.

Как ни странно, биогаз способен поддерживать развитие рынка природного газа в Европе, несмотря на то, что считается его прямым конкурентом. Сегодня европейская энергополитика формирует у потребителей негативное отношение к ископаемым топливам, что позволяет в дальнейшем оправдывать крупные субсидии в возобновляемые источники энергии (ВИЭ). Но на фоне развития сегмента биогаза пользователь станет получать из трубы не просто природный газ, а его смесь с биогазом, что будет способствовать решению экологических проблем, демон-

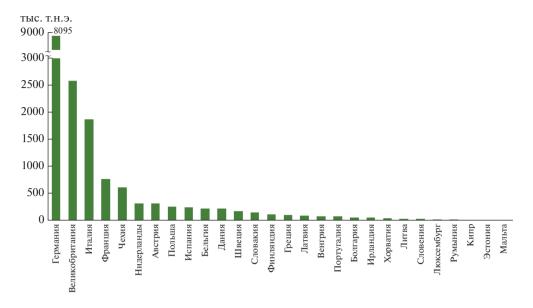


Рис. 6. Объёмы производства биогаза по странам ЕС *Источник*: [19].

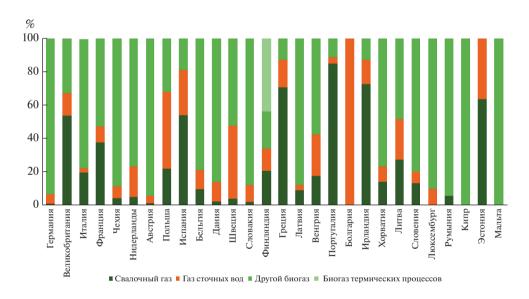


Рис. 7. Сырьё для производства биогаза в странах ЕС в процентном отношении *Источник*: [19].

стрируя один из вариантов зелёной энергетики. В результате общественное восприятие газового топлива улучшится.

Германия как крупнейший производитель биогаза в ЕС вырабатывает почти 50% всех объёмов в Европе (рис. 6), причём преимущественно из энергетических культур и органических отходов. Именно на Германию приходится значительный рост биогазовой генерации — с 1990 г. этот сектор увеличивается на 21.5% в год, что и позволило стране стать крупнейшим в Организации экономического сотрудничества и развития

(ОЭСР) производителем биогаза (40.5%). Кроме того, в тройку лидеров входят Великобритания и Италия. В Великобритании более 50% биогаза получают из свалочного газа, в Италии он занимает второе место среди других источников. В таких странах, как Ирландия, Швейцария, Испания, Португалия, Греция и Эстония, биогазовое топливо тоже в приоритете (рис. 7).

В Европе для производства биогаза, помимо твёрдых коммунально-бытовых отходов муниципальных свалок, используют отходы фермерских хозяйств. Анаэробное сбраживание органических

Таблица 2. Преимущества использования биогаза для разных категорий потребителей

Сельскохозяйственные	Доступность сырья и возможность организовать замкнутый цикл производства	
предприятия	для сокращения затрат на топливо и утилизацию отходов	
•	Возможность получения дополнительного дохода за счёт продажи излишков газа	
	в сеть при условии близости газотранспортной сети	
	Генерация электроэнергии и тепла для разных целей	
	Топливо для сельскохозяйственного транспорта и техники	
Промышленность	Сокращение затрат на топливо и утилизацию отходов Генерация электроэнергии для производственных процессов и собственных нужд Возможность получения дополнительного дохода за счёт продажи квот на выбросы в связи с сокращением эмиссии парниковых газов	
Коммунально-бытовые предприятия	Генерация экологически чистой электроэнергии и тепла Сокращение затрат в системе управления отходами Генерация электроэнергии, необходимой для энергоснабжения заводов по переработке отходов и сточных вод	
Домашние хозяйства	Автономный источник топлива в энергодефицитных регионах Прямое сжигание для приготовления пищи, освещения и обогрева помещений	

отходов животного и растительного происхождения с последующим получением биогаза имеет ряд экологических и экономических преимуществ. Этот процесс предотвращает неприятные запахи, которые зачастую сопровождают фермерское производство, загрязнение воды и почвы, выбросы парниковых газов, сокращает затраты на вывоз и утилизацию отходов, энергоснабжение, создаёт возможность для организации замкнутого цикла производства и получения дополнительного дохода в случае продажи излишков энергии в сеть (табл. 2).

Анализ экономической конкурентоспособности биогаза. Перспективы развития биогаза во многом связаны с его способностью конкурировать с другими видами энергоресурсов. Себестоимость этого топлива зависит от затрат на производство, в том числе транспортировку сырья, расходов на его очищение до биометана (upgrading cost) и распределение/подключение (например, подачу в сеть). При использовании биогаза как источника энергии в стоимость включаются затраты на его производство и передачу электроэнергии. В случае привлечения для производства топлива энергетических культур значительную роль играют волатильность цен на сырьё и дальность транспортировки до биогазовой станции, что может увеличивать себестоимость продукта на 25-30%. Если применяется собственное сырьё в виде отходов, затраты на сбор, хранение и первичную обработку исключаются, так как эти процессы идут вне зависимости от последующего использования топлива. Более того, поскольку при работе с отходами решается и экологическая задача, в затраты можно включать экологическую субсидию, которая потребовалась бы для дегазации на мусорных полигонах. Транспортировка органических отходов животного происхождения обычно нерентабельна вследствие высокой стоимости и низкой плотности энергии из-за большого процента содержания воды. Себестоимость биогаза, произведённого на твёрдых и жидких органических отходах, составляет от 0.22 до 0.39 долл./м³, тогда как при производстве на промышленных отходах она колеблется от 0.11 до 0.50 долл./м³ [23]. Значительную роль играет масштаб установки — чем она больше, тем меньше капитальные и эксплуатационные затраты.

Общие капитальные затраты¹ на установку анаэробного сбраживания варьируются от 3500 до 5000 долл. за м³/ч в зависимости от размера биореактора [25]. Инвестиционные затраты на трансформацию биогаза в биометан составляют от 1950 до 2600 долл. за м³/ч для установок мощностью более 800—1000 м³/ч необработанных газов. Для установок меньшего масштаба издержек значительно больше [23]. На рисунке 8 показан диапазон средних капитальных затрат для различных типов биогазовых установок в сравнении с двумя типами традиционных установок на природном газе и угольной станцией.

Расходы на очистку и модернизацию загрязнённого биогаза зависят от примесей, образующихся в результате использования исходного сырья и размеров блока для удаления загрязнений. Маломасштабные заводы по производству биогаза мощностью около 100 м³/ч тратят на очистку от 1 до 1.55 долл./м³. Если говорить о конкуренции биогаза с природным газом, то его главное преимущество — в цене [23]. Для сравнения: диапа-

¹ Капитальные затраты (capital expenditures – CAPEX) – затраты, связанные с приобретением или модернизацией основных средств – зданий, сооружений, оборудования.

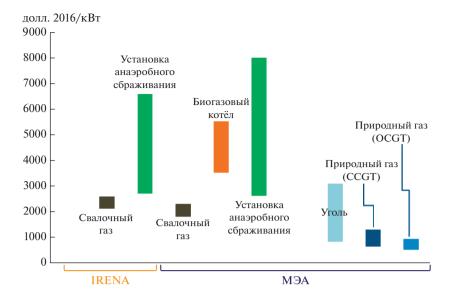


Рис. 8. Диапазон средних капитальных затрат для электрогенерирующих биогазовых установок и станций на ископаемых топливах

Источник: составлено авторами по данным Международного агентства по возобновляемым источникам энергии (IRENA) [26] и Международного энергетического агентства (МЭА) [25].

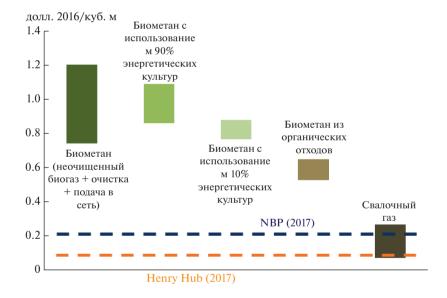


Рис. 9. Затраты на производство различных типов биогаза в сравнении с ценой природного газа на площадках Henry Hub (США) и NBP (Великобритания) в 2017 г. *Источник*: составлено авторами по данным Международного энергетического агентства (МЭА) [27].

зон биржевых цен на природный газ на основных торговых площадках США и Европы в 2017 г. составлял 0.10—0.21 долл./м³. На рисунке 9 показаны затраты на производство биогаза, очищенного до биометана, включая поставку в сеть, и на неочищенный био- и свалочный газ в сравнении с ценой природного газа на биржах США и Европы. Наиболее конкурентоспособным оказался газ, произведённый на свалках, поскольку в его

себестоимость не входят затраты на сырьё и транспортировку (как правило, он используется вблизи мест производства).

Во многих странах мира биогаз уже нашёл свою нишу и становится быстрорастущей отраслью, но в России другие условия конкуренции, поэтому важно понимать, насколько зарубежный опыт применим у нас.

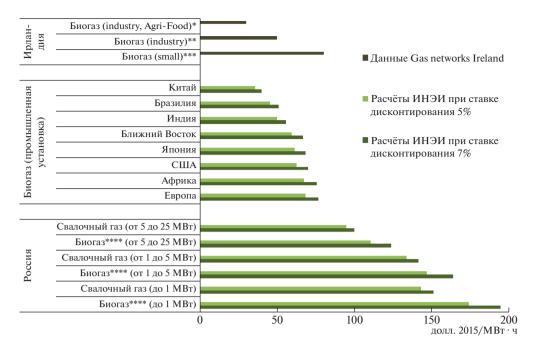


Рис. 10. Приведённая стоимость электроэнергии, выработанной на биомассе и биогазовых установках *Примечание*: для расчёта стоимости электроэнергии на станциях в России использованы предельные капитальные и операционные затраты по тарифам электроэнергии, установленным распоряжением Правительства РФ от 8 января 2009 г. № 1-р (последняя редакция № 568-р от 31 марта 2018 г.).

*Станция промышленного масштаба на сельскохозяйственной ферме (анаэробное сбраживание агропродовольственных отходов)

Источник: составлено и рассчитано авторами по данным Международного энергетического агентства (МЭА) [28], Информационного агентства Gas Networks Ireland [29], распоряжений Правительства РФ [30].

Возможности и ограничения производства биогаза в России. В нашей стране установлены предельные капитальные и операционные затраты² на производство биогаза. Как показывает анализ, цена производимой на их основе электроэнергии находится на уровне мировых реальных затрат. Из приведённых на рисунке 10 данных следует, что цена электроэнергии на биогазе в Европе ниже, чем установленная в России, за счёт существенных субсидий, предоставляемых государством. Так, в 2015 г. общая сумма выделенных для станций на биогазе и биомассе средств составила 2264 млн евро, что на 22.4% больше, чем в 2009 г. (рис. 11). Показатель среднего уровня поддержки в расчёте на МВт · ч увеличился с 74 до 90 евро/МВт · ч.

Сегодня в России действуют две станции на биогазе — "Лучки" и "Байцуры" (Белгородская

область) общей установленной мощностью 4.1 МВт [32], производящие электрическую и тепловую энергию, и одна станция активной дегазации мусорного полигона с энергетическим блоком мощностью 2.4 МВт [33]. "Лучки" и "Байцуры", будучи составной частью животноводческих комплексов, в качестве сырья используют органические отходы своих предприятий. При этом в стране планируется построить сеть биогазовых станций и увеличить их совокупную мошность до 10 МВт [34].

Напомним, что в Российской Федерации установлены максимально допустимые (предельные) объёмы капитальных, а также постоянных³ и переменных⁴ эксплуатационных затрат для каждого типа станций на возобновляемых источниках

^{**}Станция промышленного масштаба на сельскохозяйственной ферме (анаэробное сбраживание – трава)

^{***}Станция малого размера на сельскохозяйственной ферме (анаэробное сбраживание – сточные воды и трава)

^{****}К биогазу относится газ, произведённый на отходах животного происхождения

² Операционные затраты (operational expenditures — OPEX) — затраты, связанные с проведением за определённый период времени финансовых, производственных и хозяйственных операций. Они включают расходы на производство и реализацию продукции, административные и финансовые цели.

³ Постоянные затраты — затраты, величина которых не зависит от объёмов производства. Они связаны с использованием зданий и сооружений, машин и производственного оборудования, арендой, капитальным ремонтом, административными расходами.

⁴ Переменные затраты — это затраты, величина которых меняется в зависимости от объёма производства. К ним относятся затраты на сырьё, электроэнергию, вспомогательные материалы, оплату труда.

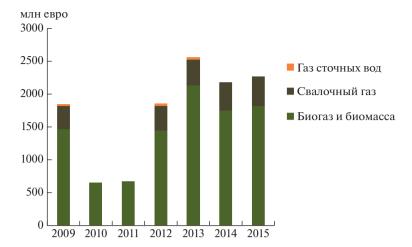


Рис. 11. Объём государственной поддержки для биоэнергетики в странах ЕС в 2009—2015 гг. *Источник:* составлено авторами по данным отчётов Совета европейских регуляторов энергетики (CEER) [31].

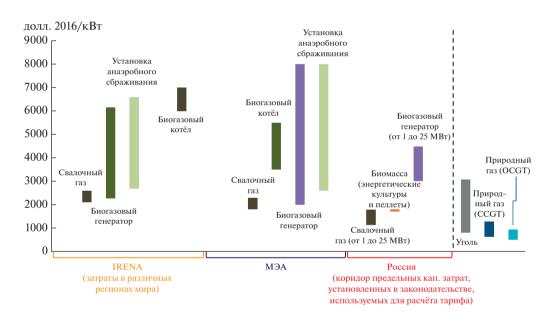


Рис. 12. Диапазон средних капитальных затрат для электрогенерирующих биогазовых установок и станций на ископаемых топливах

Источник: составлено авторами по данным Международного агентства по возобновляемым источникам энергии (IRENA) [26], Международного энергетического агентства (МЭА) [25] и распоряжений Правительства РФ [35].

энергии. Их учитывают при определении тарифов и предельных (минимальных и/или максимальных) уровней цен на электроэнергию, произведённую на станциях в 2014—2020 гг. [30]. В зависимости от мощности меняется и объём затрат на кВт, то есть чем больше станция, тем меньше затраты в расчёте на единицу. Для станций на биогазе мощностью от 5 до 25 МВт капитальные затраты в 2015 г. составляли 3008 долл./кВт, ожидалось, что к 2020 г. этот уровень снизится до 2897 долл./кВт. На станциях мощностью

 $5-25~{\rm MBT}$, производящих электроэнергию на свалочном газе, капитальные затраты не превышали $1139~{\rm долл./kBt^5}$, а для станций мощностью менее $1~{\rm MBT}-1790~{\rm долл./kBt}$ (рис. 12).

В странах, входящих в ОЭСР, коридор переменных операционных затрат биогазовых установок, кроме свалочного газа, составляет 4.2—5.2 долл./МВт · ч. В России приняты более высокие уровни предельных переменных опера-

 $^{^{5}}$ Здесь и далее денежные затраты приводятся в ценах 2016 г.

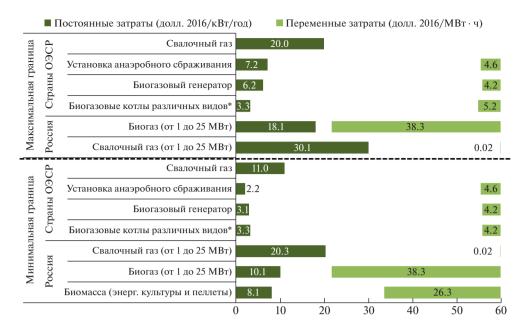


Рис. 13. Диапазон средних постоянных и переменных операционных затрат для электрогенерирующих биогазовых установок в 2015 г. Для станций в России указаны установленные Правительством РФ предельные операционные затраты

Источник: составлено авторами по данным Международного агентства по возобновляемым источникам энергии (IRENA) [26] и распоряжений Правительства РФ [35].

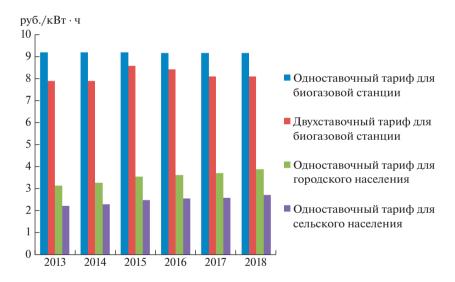


Рис. 14. Тарифы на электроэнергию в Белгородской области, установленные для станции на биогазе "Лучки" компании "АльтЭнерго", городского и сельского населения в 2013—2018 гг.

Источник: составлено по данным Комиссии по государственному регулированию цен и тарифов в Белгородской области [42].

ционных затрат: в 2015 г. они находились в интервале 26—38 долл./МВт \cdot ч, а к 2020 г. предполагалось увеличить расходы до 32—46 долл./МВт \cdot ч. Уровень постоянных эксплуатационных затрат для свалочного газа в странах ОЭСР составляет 11-20 долл./кВт в год, тогда как для российских станций — 20-30 долл./кВт. Для прочих станций,

в том числе на биомассе, уровень постоянных операционных затрат в странах ОЭСР составляет 2-7 долл./кВт в год, российский показатель выше в несколько раз -8-18 долл./кВт (рис. 13).

По данным ОАО "Корпорация Развитие" (Якутск), себестоимость произведённой электроэнергии на биогазовой станции составляет

7 руб./кВт · ч, между тем электроэнергия из традиционных источников энергии поступает по 4 руб./кВт ч [36]. В России в качестве поддержки возобновляемых источников энергии Федеральным законом "Об электроэнергетике" для сетевых организаций установлено обязательство осуществлять компенсации потерь в электросетях в первую очередь за счёт электроэнергии, приобретаемой у подключённых к сетям этих организаций станций на ВИЭ [37]. Законом предписано регулирование на розничном рынке цен (тарифов) или их предельных минимальных/максимальных уровней на электроэнергию, произведённую на ВИЭ и приобретённую для компенсации сетевых потерь. Реализовывать электроэнергию по повышенному тарифу на розничном рынке может станция мощностью не более 25 МВт, получившая квалификационное свидетельство Ассоциации "НП Совет рынка". После конкурсного отбора и включения в программу развития энергетики региона на основании выданного региональным органом свидетельства устанавливается специальный тариф и с сетевой организацией заключается договор о купле-продаже электроэнергии. На оптовых рынках к цене (тарифу) электроэнергии на ВИЭ прибавляется надбавка, которая рассчитывается, исходя из необходимости достижения целевых показателей по производству такой электроэнергии.

Для определения тарифа на электроэнергию, произведённую на возобновляемых источниках энергии, в том числе на установках по производству биогаза, применяется Методика Федеральной антимонопольной службы № 900 "Об установлении тарифа для генерирующих объектов ВИЭ, реализующих электроэнергию на розничных рынках, для компенсации потерь в сетях" [38]. В соответствии с этим документом долгосрочный тариф (цена) на электроэнергию до истечения срока возврата инвестиций станции на ВИЭ определяется методом долгосрочной индексации необходимой валовой выручки. Для станций, введённых в эксплуатацию до 1 января 2017 г., и объектов с истёкшим сроком возврата инвестиций используется метод экономически обоснованных расходов (затрат). При расчёте учитывается срок возврата инвестиций, равный 15 годам [38], объём эксплуатационных и капитальных издержек, которые не должны превышать предельные объёмы, установленные распоряжением Правительства РФ. При этом для изолированных энергосистем предельные уровни затрат не назначаются. Установленный тариф двухставочный, то есть включает ставку за 1 кВт · ч электроэнергии и 1 кВт мощности. Существенным препятствием для развития биогазовых станций в России стало ограничение, по которому максимальный объём поставленной электроэнергии на ВИЭ не может превышать 5% от ежегодного объёма потерь в сетях региона [39].

В декабре 2012 г. для станции "Байцуры" Комиссия по регулированию цен и тарифов предложила установить тариф 6.5 руб./кВт · ч [40], при этом цена электроэнергии в 2013—2014 гг. составляла по одноставочному тарифу от 2.2 до 3.14 руб./кВт · ч. Приказами той же комиссии в Белгородской области ежегодно устанавливаются тарифы на электроэнергию. Одноставочный тариф для биогазовой станции в 2016—2018 гг. оставался неизменным и составлял 9.5 руб./кВт · ч, что значительно выше самых высоких одноставочных тарифов на электроэнергию для городского и сельского населения (рис. 14) [41].

Сравнение стоимости реально произведённой электроэнергии, а также установленных тарифов для биогазовой станции, включающих специальные надбавки, с тарифами для населения показывает, что для биогаза создан благоприятный тарифный регуляторный режим, но полноценно конкурировать на рынке он пока не может. Сегодня в Москве так называемая приведённая стоимость⁶ электроэнергии, выработанной на биомассе и биогазовых установках, примерно в 2 раза превышает стоимость электроэнергии, выработанной на традиционных источниках. Поэтому, несмотря на прибыльность этого бизнеса, обеспеченную государственным регулированием, с точки зрения общей экономики электроэнергетического комплекса достаточно сложно обосновать целесообразность дальнейшего распространения биогазовых технологий. Но есть несколько экономических факторов, которые могли бы изменить ситуацию и существенно улучшить конкурентоспособность биогаза.

Первый фактор. Сравнение с аналогами в Европе и США показывает наличие потенциала для снижения затрат на 15—30%. Существенную роль тут могут сыграть инструменты государственной поддержки, в том числе меры налогового стимулирования, льготного кредитования, а также зарекомендовавшие себя за рубежом программы целевого субсидирования.

Второй фактор. Биогаз находится вблизи мест потребления, и его использование в периоды пиковых нагрузок позволило бы оптимизировать работу энергосистемы и сдавать электроэнергию по более высоким ценам. Причём это важно как для электроэнергетики, где введён дифференцированный многотарифный учёт, так и для газовой отрасли, где этого не сделано, но для обеспечения пиковых нагрузок ПАО "Газпром" приходится держать очень дорогой значительный запас мощ-

⁶ Приведённая стоимость – ожидаемая будущая стоимость с позиции более раннего момента времени и учёта временной ценности денег.

ностей с кратковременным годовым использованием.

Третий фактор. Основным топливом для получения электроэнергии в России служит природный газ. По мере перехода на более сложные запасы неизбежны рост производственных затрат и повышение цен уже в 2020-х годах. Затраты на разработку новых проектов примерно в 2—3 раза выше, чем производственные затраты в предыдущие годы. На этом фоне рентабельность проектов биогаза будет улучшаться.

Таким образом, в России уже в ближайшие годы биогаз может стать конкурентоспособным. При этом его привлекательность будет возрастать по мере удаления от мест добычи газа из-за роста цен на электроэнергию. Особенно эффективен биогаз для покрытия пиковых нагрузок.

Ещё один сегмент применения биогаза — объекты децентрализованного энергоснабжения, где он конкурентоспособнее сжиженного природного и углеводородного газа. Большой интерес представляет использование органического сырья (как правило, в сельском хозяйстве) для экономики предприятий замкнутого цикла, которые являются и производителями, и потребителями биогаза [36].

Если иметь в виду, что выход газа на тонну ТКО составляет $120-200 \text{ м}^3$ [43], то общий объём производимых в Москве отходов при выходе 160 м^3 /т позволяет получать в среднем до 1.2 млрд м^3 газа, а в целом по России — до 9.6 млрд м^3 . Известно, что теплота сгорания биогаза в зависимости от процентного содержания метана варьируется в интервале $18-24 \text{ МДж/м}^3$. Учитывая это, можно рассчитать, что использование биогаза в качестве энергоносителя, например в Московской области, позволит вырабатывать $3500-4400 \text{ MBT} \cdot \text{ч}$ электроэнергии в год [10].

Конечно, один из ключевых стимулов расширения перспектив применения биогаза связан с решением экологических проблем. Однако сегодня они имеют слабые экономические рычаги. В частности, расчёт платы за выбросы вредных веществ в атмосферу [43] в сравнении с утилизацией свалочного газа показывает, что за ущерб окружающей среде придётся заплатить сумму, эквивалентную 1% от стоимости производства электроэнергии на его основе. Скрытой субсидией, стимулирующей внедрение в работу с отходами современных технологий, может служить отсутствие штрафов за причинение ущерба окружающей среде. Например, в ситуации с мусорным полигоном "Кучино" в городском округе Балашиха (Московская область) с оператора взыскали штраф в размере 6.3 млрд руб. [45].

Таким образом, анализ показал, что развитию производства биогаза в России препятствуют:

- ограничение по возможностям поставок в сеть более 5% от потерь в электросистеме;
- отсутствие действенных федеральных и региональных программ поддержки и софинансирования, включая целевые экологические субсидии при решении проблем отходов;
- отсутствие комплексных целевых программ по сокращению выбросов и использованию отходов;
- ограниченный доступ к оборудованию в основном зарубежного производства;
- недостаточное информирование представителей бизнеса и населения о возможностях развития биогазовых производств и экологическом эффекте.

Тем не менее, несмотря на перечисленные трудности, можно сказать, что Россия обладает хорошим потенциалом для развития бизнеса на биогазе.

* * *

Актуальность проблемы утилизации мусора в России диктует необходимость разработки и принятия новых решений и схем в этой сфере. Если сейчас активно не заняться данными вопросами, то уже в среднесрочной перспективе страна столкнётся с мусорными кризисами. Выбросы на мусорных полигонах в Подмосковье в 2017—2018 гг. уже стали сигналом, свидетельствующим о пересечении красной линии, за которой прослеживается явное негативное влияние свалок на условия жизни и здоровье человека.

Полигоны захоронения отходов – один из наиболее распространённых и очевидных способов борьбы с мусором. Но схемы, по которым они функционируют в России, дают хорошую почву для критики. При создании полигонов часто не проводятся комплексные работы, позволяющие предотвратить заражение почвы, грунтовых вод, рассеивание отходов, сбор и отвод продуктов разложения. Процедуры дегазации осуществляются некачественно, побуждая жителей городов выходить на митинги и писать в различные инстанции многочисленные жалобы. Необходимо вводить новые требования к сбору, сортировке, переработке и утилизации отходов. При этом следует учитывать, что образование и выброс газа может превратиться в дополнительные возможности получения метана и электричества. Технологические решения, как и экономические регуляторные предпосылки в виде относительно благоприятных уровней предельных затрат, есть. Но мировой опыт показывает, что без целевой государственной заинтересованности и стимулирования у таких технологий мало шансов на успех.

Производство биогаза в развитых странах, в том числе в ЕС, осуществляется в промышленных масштабах благодаря значительной государственной поддержке и политике, направленной на декарбонизацию и решение вопросов утилизации отходов.

В нашей стране необходимо разработать стратегические государственные программы по борьбе с отходами и конкретные схемы утилизации мусора для типовых регионов.

Ещё одно перспективное направление в этой области — строительство биогазовых установок на территории агрокомплексов для решения проблем утилизации отходов свиноферм, снижения плодородности почв и загрязнения грунтовых вод. При этом для удалённых от централизованных систем энергоснабжения объектов биогазовая установка будет хорошим способом обеспечения источниками электричества и тепла.

Несмотря на использование очищенного биогаза (биометана) в транспортном секторе, ключевым моментом становится его применение в качестве источника электрогенерации. Сегодня в России подача биогаза в газотранспортную систему затруднена, поскольку необходимы специальные компрессоры, а также строительство дополнительных линий трубопроводов при удалённом производстве топлива, что не урегулировано на законодательном уровне.

Для успешной борьбы с мусором следует принять комплекс мер, продиктованных экологическими соображениями, но имеющих благодаря внедрению новых технологий экономическую обоснованность, в частности, необходимо:

- определить новые жёсткие целевые ориентиры по обязательной доле перерабатываемых отходов, снижению вредных выбросов и загрязнения территорий в процессе утилизации;
- ввести новые стандарты формирования полигонов захоронения отходов и использования свалочного газа;
- ввести требования по утилизации свалочного газа на уже заполненных полигонах, в том числе за счёт производства электроэнергии или метана, и рекультивации этих территорий;
- утвердить благоприятные нормативные параметры принятия в сеть электроэнергии и газа, произведённых в ходе утилизации отходов, включая экономические и объёмные критерии;
- разработать федеральные и региональные программы целевого стимулирования для современных решений по "умной" и экологически безопасной утилизации отходов, включая механизмы поддержки производства и использования биогаза.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. На востоке Москвы второй день подряд превышен допустимый уровень сероводорода в воздухе // Интерфакс. 2 сентября 2017 г. http://www.interfax.ru/moscow/577459 (дата обрашения 04.04.2020).
- 2. В результате проверок по жалобам на загрязнение атмосферы на юго-востоке г. Москвы возбуждены административные дела // Официальный сайт Министерства природных ресурсов и экологии РФ. http://www.mnr.gov.ru/press/news/v_rezultate_proverok_po_zhalobam_na_ zagryaznenie_atmosfery_na_yugo_vostoke_g_moskvy rosprirodnadzoro/ (дата обращения 04.04.2020).
- Экологическое состояние атмосферного воздуха в городе Москве и Московской области. Справка от 10.12.2017 // Официальный сайт МЧС России. http://www.mchs.gov.ru/operationalpage/digest/item/33443210/ (дата обращения 04.04.2020).
- Школьники пострадали в Волоколамске из-за выброса газа на свалке "Ядрово" // Ведомости.
 марта 2018 г. https://www.vedomosti.ru/politics/articles/ 2018/03/21/754434-shkolniki-postradali-yadrovo (дата обращения 04.04.2020)
- 5. Федеральный классификационный каталог отходов. http://www.fkko.ru/fkko?title=&code=&page=6 (дата обращения 26.10.2019).
- Мирошниченко И.В., Линднер Й.Ф. Утилизация отходов животноводства и птицеводства с получением биогаза в условиях Белгородской области России // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. 2016. № 2(10). С. 95–100.
- 7. An Overview of Biogas Production: Fundamentals, Applications and Future Research // International Journal of Energy Economics and Policy. 2019. № 9(2). P. 105–115.
- 8. Управление отходами. Сточные воды и биогаз полигонов захоронения твёрдых бытовых отходов / Под ред. Я.И. Вайсмана. Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2012.
- 9. Соколов Л.И., Кибардина С.М., Фламме С., Хазенкамп П. Сбор и переработка твёрдых коммунальных отходов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Инфра-Инженерия, 2019.
- 10. *Соловьянов А.А.* Биогаз полигонов твёрдых коммунальных отходов: негативное влияние на окружающую среду // Знание. 2018. № 10-1(62). С. 61—72.
- 11. Biomethane: Status and Factors Affecting Market Development and Trade // IEA Bioenergy. http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC91580 (дата обращения 26.10.2019).
- 12. Energy Access Outlook. 2017 // IEA https://www.iea.org/reports/energy-access-outlook-2017 (дата обращения 04.04.2020).

- 13. United States Environmental Protection Agency. https://www.epa.gov/lmop/basic-information-about-landfill-gas (дата обращения 26.10.2019).
- 14. Biogas from refuse to energy // IGU. https://www.igu.org/sites/default/files/node-page-field_file/IGU%20Biogas%20Report% 202015.pdf (дата обращения 26.10.2019).
- 15. Renewables Information 2019: Overview // IEA. https://www.iea.org/reports/renewables-information-overview (дата обращения 05.04.2020).
- 16. Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 // Official Journal of the European Union. 2009. № 5.6. P. 16–62. https://eurlex.europa.eu/eli/dir/2009/28/oj
- 17. The State of Renewable Energies in Europe // Eurobserv'er. https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/ccx/2018/EurObservER-Annual-Overview-2017-EN-1.pdf (дата обращения 26.10.2019).
- 18. Biogas and Biomethane // European Biogas Association. https://www.entsog.eu/public/uploads/files/publications/Events/2017/tyn-dp/EBA_Biogas%20and%20biomethane-final.pdf (дата обращения 26.10.2019).
- 19. Biogas Barometer // Eurobserv'er. https://www.eurobserv-er.org/biogas-barometer-2017/ (дата обращения 26.10.2019).
- 20. Towards a circular economy: A zero waste programme for Europe // European Commission. http://ec.europa.eu/environment/circular-economy/pdf/circular-economy-communication.pdf (дата обращения 26.10.2019).
- 21. Roadmap for a fossil fuel-free Stockholm 2050 // Planning & Environment Unit of the Environment and Health Administration in Stockholm. http://www.stockholm.se/ (дата обращения 26.10.2019).
- 22. Denmark without waste: Recycle more incinerate less // The Danish Government. https://mfvm.dk/file-admin/user_upload/MFVM/Miljoe/ Ressourcestrate-gi_UK_web.pdf (дата обращения 26.10.2019).
- 23. Biogas in Denmark // Danish Energy Agency. https://ens.dk/en/our-responsibilities/bioenergy/biogas-denmark (дата обращения 26.10.2019).
- 24. Biogas for road vehicles: Technology brief 2017 // IRE-NA. https://www.irena.org/publications/2017/Mar/Biogas-for-road-vehicles-Technology-brief (дата обращения 05.04.2020).
- 25. Projected Costs of Generating Electricity 2015 Edition // IEA-NEA https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_14756 (дата обращения 05.04.2020).
- 26. Renewable power generation cost in 2014 // IRENA. https://www.irena.org/documentdownloads/publications/irena_re_power_costs_2014_report.pdf (дата обращения 05.04.2020).

- 27. Biogas and Bio-syngas Production // IEA-ETSAP. https://iea-etsap.org/E-TechDS/PDF/P11_Biogas-Prod_ML_Dec2013_GSOK.pdf (дата обращения 26.10.2019).
- 28. World Energy Outlook 2016. Power Generation Assumptions // IEA. https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2016 (дата обращения 05.04.2020).
- 29. *Browne J.* Creating a biomethane market in Ireland. https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Veranstaltungen/EBC_ 2017/ Vortraege_EBC/panel1-3-browne.pdf (дата обращения 26.10.2019).
- 30. Распоряжение Правительства РФ от 8 января 2009 г. № 1-р "Об утверждении Основных направлений государственной политики в сфере повышения энергетической эффективности электроэнергетики на основе использования возобновляемых источников энергии на период до 2024 года". http://government.ru/docs/20503/
- 31. Status Review of Renewable Support Schemes in Europe 2008–2016 // CEER. https://www.ceer.eu/ (дата обращения 26.10.2019).
- 32. Официальный сайт компании "Альт Энерго". http://www.altenergo.su/biogas/ (дата обращения 26.10.2019).
- Реестр квалифицированных генерирующих объектов, функционирующих на основе использования возобновляемых источников энергии // Ассоциация "НП Совет рынка". https://www.npsr.ru/ru/market/vie/index.htm (дата обращения 26.10.2019).
- 34. Официальный сайт компании "Региональный центр биотехнологий". http://www.biogas-rcb.ru/projects/ (дата обращения 26.10.2019).
- 35. Распоряжение Правительства РФ от 28 июля 2015 г. № 1472-р. http://docs.cntd.ru/document/420291297 (дата обращения 26.10.2019).
- 36. Инвестиционный портал Белгородской области. http://belgorodinvest.ru/ru/presscenter/massme-dia/belgorod-biogaz-alternativnaya-energetika-budu-shego/ (дата обращения 26.10.2019).
- 37. Федеральный закон от 26 марта 2003 г. № 35-ФЗ (ред. от 29.12.2017) "Об электроэнергетике". Ст. 41. Функционирование технологической инфраструктуры розничных рынков. http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_41502/ (дата обращения 05.04.2020).
- 38. Методические указания по установлению цен (тарифов) и (или) предельных (минимальных и (или) максимальных) уровней цен (тарифов) на электрическую энергию (мощность), произведённую на функционирующих на основе использования ВИЭ энергии квалифицированных генерирующих объектах и приобретаемую в целях компенсации потерь в электрических сетях. http://ppt.ru/docs/prikaz/fas/n-900-15-28665 (дата обращения 26.10.2019).

- 39. Постановление Правительства РФ от 23 января 2015 г. № 47 "О внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации по вопросам стимулирования использования возобновляемых источников энергии на розничных рынках электрической энергии". http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_174584 (дата обращения 05.04.2020).
- 40. Экономным дадут миллиарды // Российская газета. 10 декабря 2012 г. https://rg.ru/2012/12/10/reg-cfo/energo.html (дата обращения 26.10.2019).
- 41. Протокол заседания коллегии Комиссии по государственному регулированию цен и тарифов в Белгородской области № 31 от 22 декабря 2016 г. https://kgrct.ru/activity/rabota-kollegii/protokoly-zasedaniy-kollegiy/2016/ (дата обращения 05.04.2020).
- 42. Комиссия по государственному регулированию цен и тарифов в Белгородской области. https://kgrct.ru/ (дата обращения 26.10.2019).

- 43. Климов Г.М. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии для получения теплоты в системах теплоснабжения (свалочный биогаз, экологические проблемы использования). Н. Новгород: Нижегородский государственный архитектурностроительный университет, 2012.
- 44. Постановление Правительства РФ от 13 сентября 2016 г. № 913 (ред. от 29.06.2019) "О ставках платы за негативное воздействие на окружающую среду и дополнительных коэффициентах". http://www.consultant.ru/ document/ cons_doc_LAW_204671/ (дата обращения 05.04.2020).
- 45. Воробьёв заявил о взыскании 6.3 млрд руб. ущерба с полигона "Кучино" // РБК. 6 мая 2018 г. https://www.rbc.ru/society/06/06/2018/5b1803a79a794700e2e1332f?from=m ain (дата обращения 09.07.2020).