

## ОБЗОР СИСТЕМ ГАЗОСБОРА И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БИОГАЗА НА ПОЛИГОНАХ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ

Трубаев П.А.

БГТУ им. В.Г. Шухова, г. Белгород

### Аннотация

Значительная часть твердых коммунальных отходов (ТКО), даже при развитой системе переработки вторично сырья, вынужденно направляется на полигоны ТКО. На полигонах при анаэробном разложении органики образуется свалочный (био)газ, содержащий 40-60 % метана. Учитывая, что парниковый потенциал метана в 28-86 раз (в зависимости от временного горизонта оценки) превышает потенциал CO<sub>2</sub>, выбросы биогаза кроме загрязнения воздушного бассейна вблизи полигонов, представляют серьезную угрозу для климата. В то же время биогаз обладает значительным энергетическим потенциалом и может быть использован как местное топливо или для генерации электроэнергии. В работе рассмотрены современные подходы к сбору и утилизации биогаза, включая пассивные и активные системы дегазации, и проведен сравнительный обзор пяти используемых технологий: советского регламента, разработанного АКХ им. К.Д. Памфилова, зарубежных «классических» решений, системы Multriwell (Нидерланды), требований ГОСТ Р 59415-2021 и отечественного патента RU 2740814. Показано, что эффективность сбора газа напрямую зависит от плотности размещения скважин и герметизации газосборного поля. На примере полигона «Стрелецкое» (г. Белгород) продемонстрировано успешное применение интегрированного подхода: собранный биогаз используется для генерации электроэнергии, теплоснабжения и технологических нужд промышленного кластера. В статье оцениваются направления утилизации биогаза – от сжигания на факелах до производства биометана и когенерации, и сделан вывод об экономической целесообразности локального энергопотребления. Таким образом, системы активной дегазации полигонов ТКО на основе современных эффективных решений являются комплексным инженерным решением, направленным на максимальное извлечение возобновляемого ресурса и его коммерциализацию при одновременном решении экологических проблем.

**Ключевые слова:** биогаз, свалочный газ, системы дегазации, использование биогаза.

## REVIEW OF GAS COLLECTION SYSTEMS AND BIOGAS USE AT MUNICIPAL SOLID WASTE LANDFILLS

Pavel Trubaev

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod

### Abstract

Even with a developed recycling system, a significant portion of solid municipal waste (SMW) is inevitably sent to SMW landfills. During anaerobic decomposition of organic matter at landfills, landfill gas (biogas) is formed, containing 40-60% methane. Given that the global warming potential of methane is 28-86 times (depending on the time horizon of the assessment) higher than that of CO<sub>2</sub>, biogas emissions, in addition to polluting the air basin around landfills, pose a serious threat to the climate. At the same time, biogas has significant energy potential and can be used as a local fuel or for electricity generation. The paper reviews modern approaches to biogas collection and utilization, including passive and active degassing systems, and provides a comparative overview of five technologies in use: Soviet regulations developed by the K.D. Pamfilov Agricultural Academy, foreign "classical" solutions, the Multriwell system (Netherlands), the requirements of GOST R 59415-2021, and the domestic patent RU 2740814. It is shown that the efficiency of gas collection directly



depends on the density of well placement and the sealing of the gas collection field. The example of the Streletske training ground (Belgorod) demonstrates the successful application of an integrated approach: the collected biogas is used to generate electricity, heat supply, and technological needs of the industrial cluster. The article evaluates the directions of biogas utilization – from flaring to biomethane production and cogeneration – and concludes that local energy consumption is economically feasible. Thus, active degassing systems for solid waste landfills based on modern effective solutions are a comprehensive engineering solution aimed at maximizing the extraction of renewable resources and their commercialization while simultaneously addressing environmental issues.

**Keywords:** biogas, landfill gas, degassing systems, biogas utilization.

## Содержание

Проблематика утилизации твердых коммунальных отходов.....	19
Свалочный (био)газ и воздействие метана на природу.....	21
Состав свалочного (био)газа .....	22
Энергетический потенциал биогаза полигонов ТКО.....	22
Активные и пассивные системы дегазации полигонов ТКО .....	23
Типовые газосборные системы .....	25
Технологический регламент АКХ им. К.Д. Памфилова .....	25
Традиционные системы дегазации (зарубежных стран).....	26
Система дегазации Multiwell (Голландия) .....	28
Система дегазации по ГОСТ Р 59415-2021 .....	30
Система дегазации по патенту RU 2740814 .....	31
Сравнение систем .....	33
Способы использования свалочного газа.....	34
Технопарки на базе полигонов ТКО.....	36
Основные выводы.....	37

## Проблематика утилизации твердых коммунальных отходов

В мире не существует универсальной одновременно и экономически и экологически эффективной технологии утилизации твердых коммунальных (бытовых, муниципальных) отходов (ТКО или ТБО). Раздельный сбор и/или сортировка полностью проблему накопления отходов не решает. После отбора всех полезных фракций остаются не менее 20-40% пищевых отходов, а так же загрязненная ими бумага и текстиль (рис. 1).

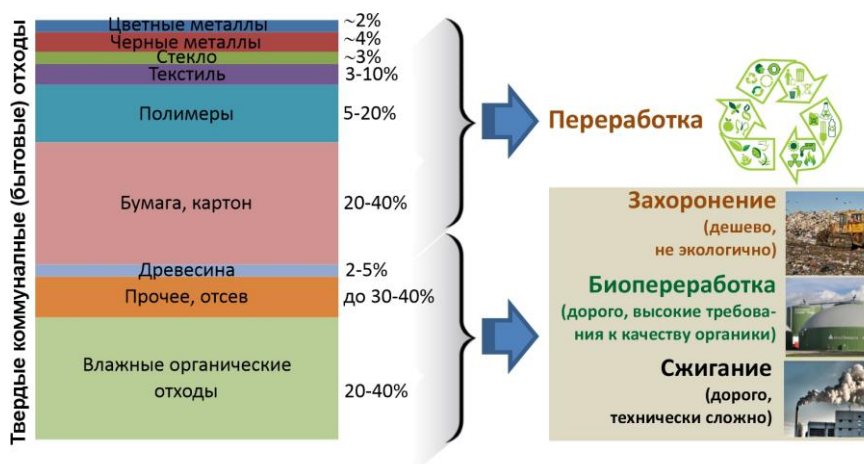


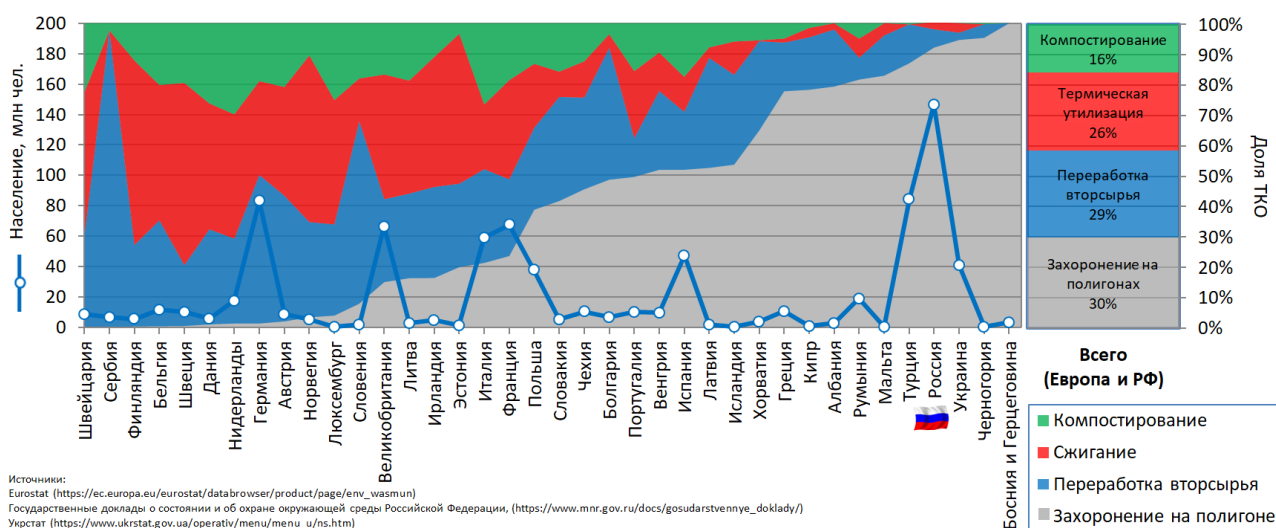
Рис. 1. Твердые коммунальные отходы



Утилизация органических отходов возможна тремя способами:

- складирование на полигонах ТКО для естественного разложения, что требует больших площадей и сопровождается загрязнением атмосферы и почвы;
- термическая утилизация (сжигание), что кроме возможных экологических рисков сопровождается большими затратами. По оценке НП «Совет рынка» величина удельных капитальных затрат на строительство объектов утилизации ТБО на 1 МВт мощности в 6 раз больше удельных капитальных затрат на строительство новых АЭС и в 13 раз дороже для газовой генерации, при этом более 92% от общей стоимости приходится на неэнергетическое оборудование<sup>1</sup>;
- биопереработка путем анаэробной ферментации в биогазовых установках или ферментерах, что так же характеризуется высокой стоимостью из-за необходимости создания необходимых температурно-влажностных условий, использования специальных термофильных или мезофильных бактерий, небольшой производительности установок. Загрязнение ТКО токсичными веществами приводит к возникновению аварийных ситуаций с возможностью полной остановки процесса и гибели бактерий.

Поэтому даже в развитых странах значительная часть бытовых отходов отвозится на полигоны, в Евросоюзе эта доля равна 29% (рис. 2).



**Рис. 2. Структура утилизации коммунальных отходов в Европе и России (данные 2021–2023 г.)**

В России, по данным Государственных докладов о состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации<sup>2</sup> на полигоны ТКО в 2021 г. поступило около 92% отходов, а в 2022 г. – 80%. Такое резкое снижение значение за один год связано не с реальным изменением ситуации, а с изменением отчётности, когда отходы, поступающие на мусоросортировочные комплексы, относят к категории «Обработанные», хотя потом, после отбора полезных фракций, они все равно в основной массе захораниваются на полигонах.

Таким образом полигоны ТКО являются и будут являться неизбежной структурой жилищно-коммунального комплекса страны.

<sup>1</sup> Заключение № 24 от 19 марта 2019 г. по итогам расширенного совместного заседания Секции по вопросам антимонопольного законодательства в части регулирования и контроля за деятельностью отраслей топливно-энергетического комплекса и обеспечения конкуренции в отраслях топливно-энергетического комплекса и Секции по законодательному регулированию деятельности естественных монополий топливно-энергетического комплекса Экспертного совета при Комитете Государственной Думы по энергетике

<sup>2</sup> [https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye\\_doklady/](https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady/)



## Свалочный (био)газ и воздействие метана на природу

Органические отходы на полигонах ТКО, кроме всех известных негативных факторов, оказывают еще один вид воздействия на окружающую среду – выделяющийся биогаз, который еще называют свалочным газом. В теле полигона ТКО в анаэробных условиях в результате жизнедеятельности метаногенных бактерий образуется биогаз, состоящий из метана, углекислого газа и азота и небольшого количества токсичных и органических газов. С 1 Га полигона ТКО в год выделяется около 300 м<sup>3</sup>/ч или 3 тыс. т/год биогаза, его выделение происходит непрерывно в течение от 17 до 25...30 лет. Выбросы метана с полигонов ТКО России составляют 20 млрд. м<sup>3</sup>/год (или 10 млн. м<sup>3</sup>/год на 100 тыс. чел.) [1].

Парниковый эффект от метана сильнее, чем от углекислого газа, на величину в 28 раз при оценке за 100-летний период [2] или в 86 раз, если оценивать 20-летний период [3].

Вклад полигонов ТКО в общую эмиссию метана составляет около 10% [4]. В структуре парниковых выбросов вклад, вносимый отходами, по оценке ООН составляет 3,3% (рис. 3), в России эта величина равна 4,5% [1].



Рис. 3. Вклад источников в образование парниковых газов

Источник: <https://climatetrace.org/sectors> (дата обращения 01.10.2025 г.)

Кроме того, скопление свалочного газа в теле полигона создает взрывоопасные условия, способствует неприятному запаху и может приводить к загрязнению грунтовых вод и атмосферы.

В связи с этим для предотвращения негативного воздействия биогаза на окружающую среду необходимо осуществлять его сбор и обезвреживание. Сжигание биогаза является самым простым и широко используемым методом утилизации, позволяющим преобразовать метан в углекислый газ с многократным снижением парникового эффекта и уничтожением вредных примесей.

Так как биогаз на 40-60% состоит из метана, он является альтернативным (местным) топливом и поэтому его термическая утилизация может происходить с выработкой электроэнергии или тепловой энергии. Энергетическая утилизация газа с площади полигона 1 Га позволяет в год вырабатывать:

- 5 млн. кВт·ч электроэнергии (0,6 МВт);
- 9 тыс. Гкал тепловой энергии (1 Гкал/ч) при использовании в качестве котлопечного топлива или 6 тыс. Гкал (0,7 Ккал/ч) при когенерации.

Как правило, система утилизации биогаза рассматривается как относительно самостоятельный проект, не связанный технологически и экономически с полигоном.



### Состав свалочного (био)газа

Состав биогаза зависит от следующих факторов:

- состава отходов, который заметно изменится в разных регионах;
- климатических условий, определяющих температуру и влажность в теле полигона;
- степени герметизации тела полигона, определяющей поступление атмосферного воздуха, содержащего кислород, и условия образования: анаэробное или аэробное.

Чистый биогаз, полученный в анаэробных условиях (без доступа кислорода), содержит 55% метана и 45% углекислого газа, состав биогаза при его образовании или смешении с кислородом представлены в работе [5]. В биогазе на полигонах ТКО также в незначительных количествах содержится ряд токсичных и неприятно пахнущих соединений: диоксид серы  $SO_2$ , сероводород  $H_2S$ , окись азота  $NO_x$ , фтористый водород  $HF$ , аммиак  $NH_3$ , бензол  $C_6H_6$ , трихлорметан  $CHCl_3$ , четыреххлористый углерод  $CCl_4$ , хлорбензол  $C_6H_5Cl$  и другие газы.

Стехиометрическое уравнение образования биогаза может быть представлено в следующем виде [5]:



В связи с тем, что углекислый газ  $CO_2$  частично растворяется в фильтрате (жидкости, образующейся на полигонах ТКО из влаги отходов и атмосферных осадков, попадающих в слой отходов) и осаждается в нем виде карбонатов, а метан  $CH_4$  в фильтрате малорастворим, в практических расчетах выход свалочного газа оценивается по эмпирическим уравнениям. В среднем объем образование метана и углекислого газа на 1 кг углерода С следующий:

$$V_{CH_4} = 1,03 \dots 1,12 \text{ м}^3/\text{кг С}; V_{CO_2} = 0,75 \dots 0,87 \text{ м}^3/\text{кг С}. \quad (2)$$

Обычно органический углерод в сухих органических ТКО составляет около 50%, или 200-250 кг/т влажных ТКО, но необходимо учитывать, что из него только 50% биоразлагаемы.

В работе [5] представлен средний состав отходов по данным разных российских источников и рассчитанный по ним теоретический выход биогаза. Выход биогаза из тонны отходов для разного состава, определен по стехиометрическому уравнению (2), изменяется от 312 до 433 м<sup>3</sup>, но состав биогаза изменяется мало и теоретическое содержание метана в нем составляет от 53% до 57%. В работе [6] приведен состав биогаза в соответствии с нормативными источниками и полученный в результате фактических замеров.

### Энергетический потенциал биогаза полигонов ТКО

Согласно расчетам выхода биогаза по разным моделям (уравнение Табасарана – Реттенбергера, модели LandGEM, IPCC, CLEEN) и методикам АКХ им. К.Д. Памфилова удельный выход биогаза значительно различается и составляет от 80 до 340 м<sup>3</sup>/т отходов. Отличие в значениях объясняется принятыми различными фракционным составом отходов и их степенью разложения.

При среднем содержании метана в биогазе 50% из тонны отходов может быть получено от 1,4 до 6,1 МДж энергии, среднее значение составляет 3,4 МДж.

При КПД преобразования в электроэнергию, равным 39%, это позволяет выработать

$$3 \cdot 400 \cdot 0,39 / 3,6 = 368 \text{ кВт} \cdot \text{ч электроэнергии}.$$



Общий объем твердых коммунальных отходов в России, захороненных на полигонах в 2019 г. составил по данным Росприроды около 60 млн т., что позволяет выработать 22,1 млрд кВт·ч электроэнергии. Это составляет около 2% от общего энергопотребления в стране (которое составляет около 1 трлн кВт·ч в год). Возможную доля замещения общего электропотребления для ряда стран (табл. 2) составляет от 0,05% (Китай) до 4,5% (Испания).

Таблица 1

**Энергетический потенциал биогаза полигонов ТКО (энергия биогаза)**

Страна	Население, млн чел.	Энергетический потенциал*		Доля в потреблении электроэнергии
		млн кВт·ч/год	$\frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{год} \cdot \text{чел.}}$	
Мексика, теоретический экономически оправданный	126	30 200	240	11%
		1 100	8,7	0,4%
Россия	146,1	22 100	151	2,0%
Белгородская область	1,48	216	146	1,4% (15% от потребления населением)
Уругвай	3,48	77...115**	22...33	0,7 ...1%
Бразилия	213,3	6 900...11 800	32...55	1,2...2%
Сербия	6,9	578,24	84	2,1%
Городские районы Африки	605	62 500 ... 122 200	103...202	–
Польша	37,9	115	3	0,1%
Турция	86	4 850	56	1,5%
Китай	1 443	3666,06	2,5	0,05%
Испания	47,4	10300**	217	4,5%

\* Для зарубежных стран – по данным работы Santos, I.F.S., Barros, R.M., & Filho, G.L.T. (2020). Biogas Production From Solid Waste Landfill. Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials, 2, 11–19.; Россия и Белгородская область – по данным работы [5].

\*\* Пересчитано из потенциала выработки электроэнергии с применением КПД 39%

Таким образом свалочный газ является существенным потенциальным источником электроэнергии в общем энергобалансе.

**Активные и пассивные системы дегазации полигонов ТКО**

Дегазация полигонов ТКО – это процесс извлечения и утилизации свалочного газа (биогаза), который образуется в результате анаэробного разложения органических отходов. Она осуществляется с помощью пассивных или активных систем дегазации.

Основное различие между пассивной и активной системами дегазации заключается в принципе, по которому газ извлекается из тела полигона.

Пассивные системы дегазации (рис. 4) предназначены для отвода биогаза из тела полигона в атмосферу. Для этого в теле полигона выполняются газодренажные скважины, по которым биогаз выходит из слоя отходов под действием избыточного давления, которое создается в результате его непрерывного образования.

Верхняя часть газового колодца (скважины) оборудуется оголовком, который может иметь простейшую конструкцию (например, «гусак» для защиты от осадков) или быть оснащен пламегасителем для предотвращения возгорания газа от внешних источников. Системы могут оборудоваться биофильтрами – слоем компост, древесной щепы, где метанотрофные бактерии частично окисляют метан до углекислого газа и воды. Но применение фильтров ограничено их сопротивлением. Так же выходе скважины могут оборудоваться факелами малой мощности.





**Рис. 4. Пассивная системы дегазации полигонов ТКО:**

а) устройство системы (<http://www.air-cleaning.ru/landfill.php>);

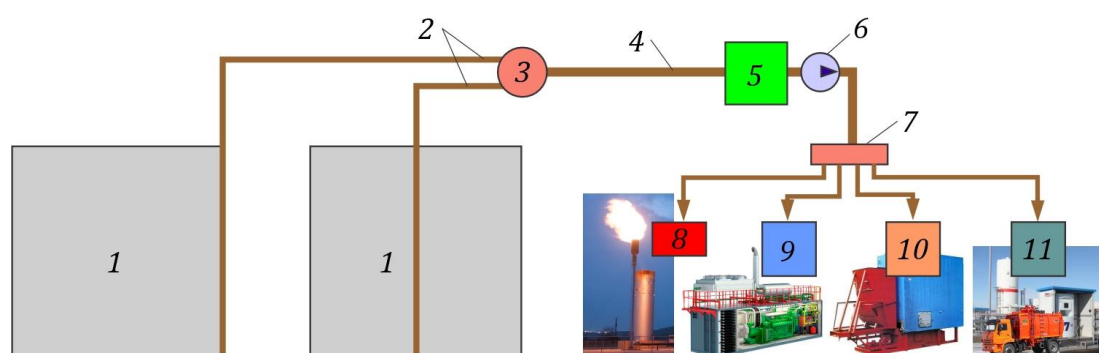
б) скважина с абсорционным фильтром

(<https://eniseyprom.ru/images/oborudovanie/vozduh/catalog-vozduh.pdf>)

На количество отводимого газа влияют перепады атмосферного давления, температура воздуха и скорость ветра.

Основная задача пассивных систем – предотвращение скопления биогаза для обеспечения безопасности эксплуатации полигона и предотвращения самовозгорания слоя отходов. Но так как биогаз отводится в атмосферу, экологических задач эти системы не решают. Их обычно применяют на небольших или старых полигонах, где генерация газа уже идет на спад, либо как временную меру на действующих объектах до ввода в эксплуатацию активной системы.

Активная система дегазации осуществляет принудительный сбор газа (рис. 5). Она позволяет контролировать и регулировать процесс сбора газа и обеспечить его стабильный поток, что позволяет использовать в энергетических целях для выработки электроэнергии или теплоты или производства топлива – биометана, и полностью предотвратить выход биогаза в атмосферу.



**Рис. 5. Схема системы активной дегазации:**

1 – система газосборных скважин или траншей, объединенных горизонтальными коллекторами в газосборные поля (см. рис. 6); 2 – сборные газопроводы; 3 – сборный коллектор;

4 – магистральный газопровод; 5 – конденсатосборник, осушка и очистка биогаза;

6 – газоперекачивающая станция (включающая компрессоры или газодувки); 7 – коллектор.

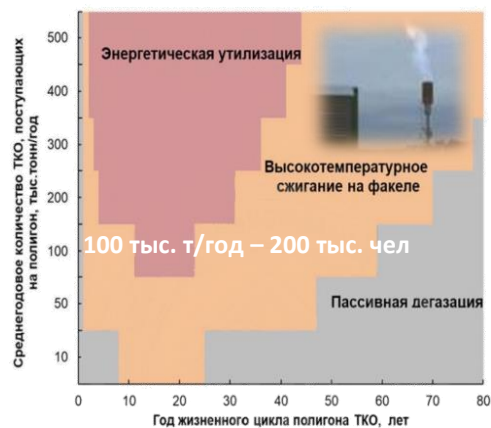
Оборудование для сжигания или утилизации биогаза: 8 – горелочное факельное устройство для сжигания всего биогаза или его излишков; 9 – оборудование для генерации электрической энергии (газопрошневые электростанции); 10 – котлы для генерации тепловой энергии или печи; 11 – линия подготовки и компримирования биометана

Собранный системой активной дегазации биогаз должен быть утилизирован, поэтому если он не используется для производства энергии или для переработки, он должен обезвреживаться (сжигаться) на факеле.

Выбор системы дегазации определяется экономическими показателями и зависит от объема полигона ТКО или участка, выделенного под дегазацию (рис. 7).



**Рис. 6. Пример реализации газосборных полей**



**Рис. 7. Выбор системы сбора и утилизации биогаза на полигоне ТКО**  
Источник: СП 320.1325800.2017 «Полигоны для твердых коммунальных отходов. Проектирование, эксплуатация и рекультивация» (с изм. № 1 от 16 марта 2022 г.)

Таким образом пассивная система дегазации – это система безопасности с минимальными затратами, а активная система – это комплексное инженерное решение, направленное на максимальное извлечение возобновляемого ресурса и его коммерциализацию с одновременным решением экологических проблем.

### Типовые газосборные системы

Существуют несколько типовых решений для сооружения систем дегазации:

- Технологический регламент получения биогаза с полигонов твердых бытовых отходов, разработанный в Академии коммунального хозяйства им К.Д. Памфилова [7].
- Системы дегазации, сооружавшиеся в 1998-2010 г. в США, Южной Америке, Европе, Китае, обобщение конструкции которых выполнено в документах Агентства по охране окружающей среды США (EPA) [8, 9].
- Технология дегазации Multriwell, патентообладателем являются компании Trisoplast International BV и Cofra BV, Голландия (<https://www.multriwell.com>);
- ГОСТ Р 59415-2021 Система сбора свалочного газа на полигонах твердых коммунальных отходов, состоящая из специальных вертикальных газовых скважин. Общие технические условия.

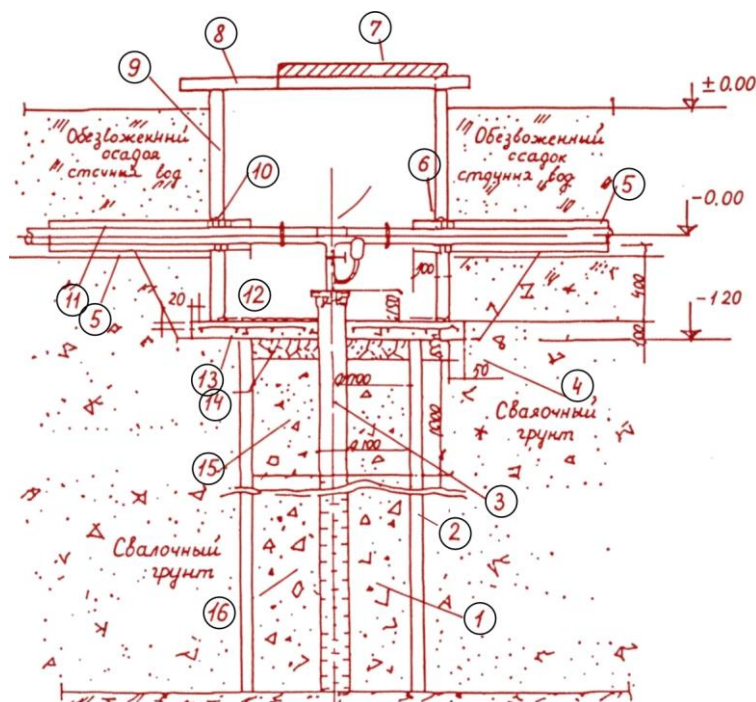
На полигоне ТКО «Стрелецкое» (г. Белгород) сооружена система дегазации на основе патента RU 2 740 814 C1 «Способ сбора и отвода биогаза с полигонов твердых коммунальных отходов для его дальнейшего использования».

### Технологический регламент АКХ им. К.Д. Памфилова (применяется в СССР и РФ)

Технологический регламент, разработанный Академией коммунального хозяйства им. К.Д. Памфилова [7], описывает стандартный подход к проектированию и эксплуатации активных систем дегазации в российских условиях. Основным элементом системы являются вертикальные газосборные скважины (рис. 8), выполняемые из же-



лезобетонных колец. Они сооружаются на глубину, составляющую 70-90% от высоты тела полигона. В скважину устанавливаются асбестоцементные газосборные трубы, которые обсыпаются щебнем для создания дренирующего слоя. Шаг расположения скважин составляет 30-40 метров с таким расчетом, чтобы их радиусы влияния перекрывались, обеспечивая сбор газа со всей площади.



**Рис. 8. Конструкция скважины [?]:**

- 1 – асбестоцементные трубы с перфорацией  $\varnothing$  100 мм; 2 – железобетонное кольцо с перфорацией ( $\varnothing$  700 мм); 3 – асбестоцементная труба без перфорации  $\varnothing$  100 мм; 4 – арматурная сетка; 5 – стальной футляр  $\varnothing$  200 мм, длина 1000 мм; 6 – уплотнитель; 7 – чугунный люк  $\varnothing$  700 мм; 8 – сборная железобетонная плита; 9 – железобетонное кольцо  $\varnothing$  1000 мм; 10, 13, 15 – бетон М200; 11 – газопровод  $\varnothing$  100 мм; 12 – цементная стяжка; 14 – глина; 16 – щебень крупной фракции

Система так же включает горизонтальные коллекторы, сборные газопроводы, дренажные сети, систему сбора и удаления конденсата (гидрозатворы и конденсаторы-сборники в нижних точках сети), систему очистки и осушки биогаза.

Расчетный выход биогаза согласно «Технологическому регламенту» [?] составляет 6-8 м<sup>3</sup>/ч, или 35-85 м<sup>3</sup>/Га (при расстоянии между скважинами 30-40 м).

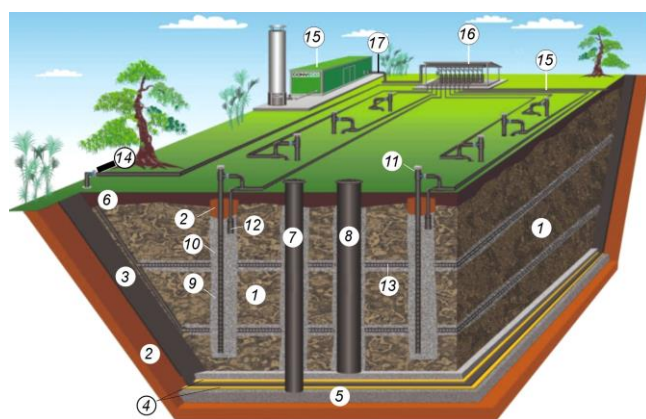
Недостатком системы является необходимость сооружения скважин в процессе наполнения полигона отходами, высокая стоимость и материалоемкость, и являющееся следствием этого небольшое количество скважин, которое из-за неравномерного распределения отходов на полигоне приводит к низкой эффективности сбора газа. Герметизация тела полигона выполняется только непосредственно вблизи скважин, что обуславливает утечку биогаза в атмосферу и большое количество присосов воздуха в собираемом газе, негативно влияющих на работу газоиспользующего оборудования.

#### *Традиционные системы дегазации (зарубежных стран)*

Сведения о традиционных системах дегазации, сооружаемых в мире, обобщены в нормативно-методических изданиях Агентства по охране окружающей среды США [8, 9].

Общая схема систем представлена на рис. 9.





- |  |  |
|--|--|
| 1 – тело полигона                        | 12 – сбор конденсата                       |
| 2 – грунт                                | 13 – горизонтальный трубопровод сбора газа |
| 3 – гидроизоляция                        | 14 – регулирующий клапан                   |
| 4 – песок                                | 15 – линия сбора газа                      |
| 5 – гравий                               | 16 – станция регулировки                   |
| 6 – почва                                | 17 – линия подачи газа                     |
| 7 – колодец контроля                     | 18 – установка сбора и сжигания газа       |
| 8 – колодец сбора фильтрата              |  |
| 9 – газовая скважина                     |  |
| 10 – вертикальный трубопровод сбора газа |  |
| 11 – заглушка                            |  |

**Рис. 9. Схема системы дегазации полигона ТКО с вертикальными скважинами:**

Источник: [https://conveco.ru/f/resheniya\\_dlya\\_aktivnoj\\_degazacii\\_poligonov\\_tbo.pdf](https://conveco.ru/f/resheniya_dlya_aktivnoj_degazacii_poligonov_tbo.pdf)

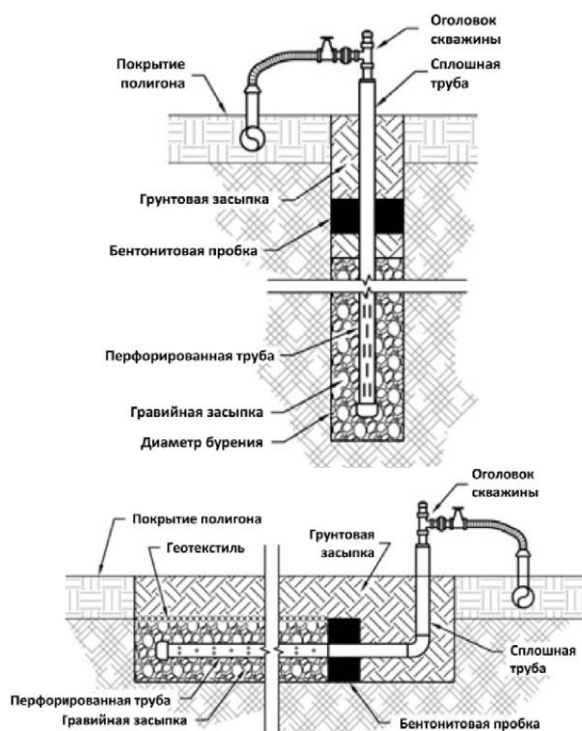
Система газосбора с вертикальными скважинами выполняется для закрытых к размещению отходов участков (карт) полигонов.

Вертикальные скважины (рис. 10) размещаются равномерно с промежутком 45-90 м. Скважины для труб выполняются путем бурения с диаметром 200...900 мм, их глубина составляет от 12 до 42 м и они заканчивается на расстоянии от 3 до 5 м до дна полигона. В них помещаются пластиковые трубы диаметром 50...150 мм с перфорацией в нижней части в виде круглых отверстий диаметром 12,5 мм на расстоянии 150...300 мм друг от друга (с поворотом на 90° относительно оси трубы) или прорезей шириной 9...27 мм. Обычно трубы выполняются из полиэтилена высокого давления (ПВХ), возможно выполнение из ПВХ, которые могут быть более хрупкими с течением времени.

В Руководстве ЕРА [8] рекомендуется минимальные значения диаметров скважин 300 мм и газосборных труб 100 мм, в Справочнике [9] – диаметр скважин 600...900 мм и труб 100...200 мм. В документах отмечается, что использование больших диаметров приводит к увеличению площади поверхности газотбора и к увеличению сбора биогаза.

Скважины с трубами заполняются гравийной засыпкой, на выходе выполняется бентонитовая пробка толщиной 0,9...1,2 м или другая изоляция и оголовок скважины.

Горизонтальные скважины (рис. 10) могут быть установлены в процессе захоронения отходов со сбором биогаза до закрытия участка полигона. Они имеют вид перфорированных труб Ø100...200 мм, которые помещают в траншеи глубиной 0,5...1,5 м. Траншеи засыпаются гравием. Расстояние между траншеями составляет 30...40 м. Для эффективности системы над



**Рис. 10. Схемы вертикальных и горизонтальных скважин [9]**



ней необходимо размещать достаточное количество отходов (высотой слоя до 9 метров).

Стоимость системы газосбора мощностью 340..1020 м<sup>3</sup>/ч в ценах 2012 г. составляет около 3 млн долл. США [8], мощностью 1700 м<sup>3</sup>/ч (без учета оборудования для использования газа) – около 2,6 млн долл. США, с учетом магистрального газопровода 8 км, оборудования для очистки и осушки и подготовки газа для использования – 6 млн долл. США [9].

Характеристики ряда систем газосбора представлены в табл. 3.

Согласно закупке 3500110667217000286 стоимость строительства временной системы сбора свалочного газа полигона ТБО «Кучино» расчетной мощности 2500 м<sup>3</sup>/ч, состоящей из 55 скважин по периметру полигона с перфорированными газосборными ПНД-трубами Ø110 мм, выполненное австрийской компании Экоком, составила (без высокотемпературного факела) 182,116 млн руб. или 3 млн. долл. США.

#### *Система дегазации Multriwell (Голландия)*

Технология характеризуется высокой эффективностью сбора газа, быстрым сооружением после закрытия участка, предназначенного для дегазации (система газосбора площадью 0,5 Га на полигоне ТКО «Преображенка» г. Самара была сооружена за одну неделю, рис. 11).



**Рис. 11. Сооружение систем дегазации по технологии Multriwell на полигоне ТКО «Преображенка» (г. Самара, 2012 г.)**

Система газосбора состоит из следующих компонент:

- гибкие газосборные трубы размером 100×5 мм, выполненные из нетканой геосинтетической ткани с помещенной внутрь распоркой;
- вертикальные скважины глубиной от 10 до 30 м, выполняемые продавливанием с использованием специального устройства, обеспечивающего вдавливание ститчера (полый плоской «иглы») в грунт со скоростью 2 м/с, при вдавливании внутри ститчера находится гибкая труба, которая остается в скважине при подъеме ститчера;
- горизонтальные гибкие газосборные трубы, объединяющие вертикальные трубы и присоединяемые к коллекторным трубам из ПНД;
- герметизирующий слой из газо- водо- непроницаемой минеральной смеси «Trisoplast», состоящей из 88% песка, 10% натриевого бентонита, 2% полимерной добавки, и полиэтиленовой пленки.



Таблица 2

## Характеристики традиционных систем газосбора

Наименование полигона, расположение	Год запуска системы	Количество скважин	Выход биогаза, м <sup>3</sup> /ч		Стоимость	Содержание метана	Использование биогаза
			всего	на одну скважину			
Loma Los Cologados, Сантьяго (Чили)	2009	280	8 000 (2010 г.)	28,5	\$40 million	48%	Генерация электроэнергии
Norte III-B, Буэнос-Айрес (Аргентина)	2010	270	9 200 (2010 г.)	34	\$10 million	58%	Сжигание на факеле
São João, Сан-Паулу (Бразилия)	2008	160	373 (2009 г.)	2,3	\$2,8 million	50%	Генерация электроэнергии
Brazil Marса, Кариасика (Бразилия)	2005	67	662 (2011 г.)	9,9	\$1,1 million	48%	Генерация электроэнергии
Curva de Rodas and la Pradera, Медельйн (Колумбия)	2008	84	634	7,5	-	37%	Сжигание на факеле
Nejara, Нехапа (Сальвадор)	2006	134	1 465	36,6	-	50%	Сжигание на факеле
El Verde, Леон (Мексика)	2009	48	3 100 (2010 г.)	23,1	\$58 million	48%	Генерация электроэнергии
Greenwood Farms, штат Техас (США)	2009	60	509	10,6	\$1,2 million	50%	Сжигание на факеле
Star Ridge, штат Алабама (США)	2007	33 вертикальные, 3 горизонтальные	1 274	35,4	\$4 million	53%	Поставка в систему газоснабжения
Yancey-Mitchell County, Северная Каролина (США)	1999	8 вертикальные, 2 горизонтальные	60	6	\$2 million	50%	Использование в печах и котлах
Вагусз, Краков (Польша)	1998	70	600	8,6	-	55%	Использование в печах и котлах
Мариуполь	2010	43	390 (2010 г.)	9,1	\$0,867 million	50%	Генерация электроэнергии
Gaoantun, Пекин (Китай)	2007	150	2 500 (2011 г.)	16,7	-	60%	Сжигание на факеле и генерация электроэнергии
Jiaozishan, Нанкин (Китай)	2006	-	1 130	-	-	53%	Генерация электроэнергии, использование в печах и котлах
Daegu-Bangcheon-Ri, Тэгу (Корея)	2006	-	5 400 (2009 г.)	-	\$20 000	48%	Использование в печах и котлах



Согласно отчету Multriwell (рис. 12) средний выход биогаза с 1 Га составляет до 200 м<sup>3</sup>/ч для европейских полигонов ТКО и 600 м<sup>3</sup>/ч для полигона «Преображенка». Повышенный выход на Самарском полигоне может быть объяснен более частым расположением вертикальных скважин – 1700 скважин на площади 0,5 Га, что соответствует расстоянию между скважинами 1,7 м, тогда как в ряде ТЭО компании указывается расстояние 3 м.

По данным компании система с средним в 6,7 раз эффективней при расчете на единицу площади или в 9,7 раз при расчете на единицу объема, чем «традиционные» системы со скважинами, расположенными на расстоянии от 50 до 100 метров друг от друга.

Недостатком системы является ее высокая стоимость. Согласно документации электронного аукциона от 05.11.2021 № 0148200005421000897 на работы по рекультивации полигона ТКО «Ядрово» предусматривалось сооружение системы дегазации по технологии Multriwell из 4271 вертикальных скважин, расположенных с шагом 3х3 м.

Таким образом площадь поля для дегазации составляет 3,84 Га. Расчетный выход биогаза составил 1433 м<sup>3</sup>/ч, мощность системы для проектирования принята 2500 м<sup>3</sup>/ч. Стоимость сооружения системы дегазации в ценах февраля 2021 г. согласно локальной смете составила 434,716 млн руб. (около 5,8 млн долл. США). Стоимость сооружения газосборного поля на полигоне «Преображенка» (г. Самара) согласно смете 2009 г. составила 28 млн руб. (0,9 млн долл. США) при площади 0,5 Га и расчетной мощности системы 320 м<sup>3</sup>/ч биогаза.

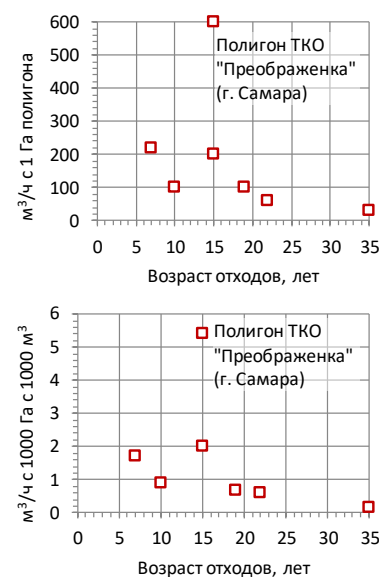
#### Система дегазации по ГОСТ Р 59415-2021

Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 59415-2021 «Биологическая безопасность. Система сбора свалочного газа на полигонах твердых коммунальных отходов, состоящая из специальных вертикальных газовых скважин. Общие технические условия» утвержден и введен в действие приказом Росстандарта № 186-ст от 7.04.2021 г. Согласно ст. 26 Федерального закона 162-ФЗ «О стандартизации в Российской Федерации» документы национальной системы стандартизации применяются на добровольной основе.

Система сбора свалочного газа включает в себя следующие элементы:

- вертикальные газовые скважины диаметром 600 мм глубиной 20...30 м, расстояние между которыми 20...30 м, с газосборными колоннами из перфорированных труб Ø110 мм и неперфорированных труб Ø140 мм;
- газотранспортные трубопроводы Ø110 мм, соединяющие скважины и газосборные станции;
- газосборные станции, в котором несколько газосборных трубопроводов подключены к общему газовому коллектору, оборудованные конденсатоотводчиками и сборником конденсата;
- газотранспортный трубопровод, соединяющий газовый коллектор газосборной станции с газокompрессорной станцией.

Газосборные перфорированные полиэтиленовые трубы, опускаемые в скважины, имеют наружный диаметр 110 мм и толщину стенки 10 мм (SDR 11), они перфорируют-



**Рис. 12. Фактический выход биогаза с полигонов ТКО с системой газосбора Multriwell [10]**



ся отверстиями диаметром 12 мм с суммарной площадью перфорации 12% (отверстия располагаются по длине трубы через 2,7 м), 0,3 м с каждого конца трубы не перфорируются.

Учитывая оседание грунта, перфорированные трубы выполняются с переходниками из сегментов полиэтиленовых трубы с наружным диаметром 140 мм и толщиной стенки 8,3 или 12,7 мм (SDR 11-17). Соединение фиксируется с помощью саморезов.

Пространство между трубами и стенками скважин заполняется щебнем или гравием с фракцией 40/70 мм. Верх скважин герметизируется, для этого обустроивается коническое углубление глубиной 2,5 м, заполняемое связующим материалом, или скважины на 2,5 м заполняются бетоном. Сверху уплотнителя укладывают полотно из синтетического материала. Газовые скважины могут быть оснащены металлическими (на действующих картах) или ПЭ (на закрытых картах) оголовками.

Средний выход биогаза с одной скважины согласно ГОСТ составляет 13,5 м<sup>3</sup>/ч (1...2 м<sup>3</sup>/ч с каждого метра скважины) или 150...340 м<sup>3</sup>/Га.

Газосборные горизонтальные трубопроводы, соединяющие скважины с газосборной станцией выполняются из труб ПЭВП (полиэтилен высокой плотности) внутренним диаметром не менее 90 мм, скорость газа в них должна быть не более 10 м/с. На действующих картах газосборные трубопроводы к скважинам присоединяются на глубине 3,5 м от уровня поверхности, на закрытых картах полигона они соединяют оголовки скважин. Для компенсации возникающих усилий соединение газовой скважины с газосборным трубопроводом должно быть гибким. От газосборных скважин к газосборной станции трубопровод укладываются в траншее на глубине 1,0...3,5 м с уклоном не менее 5%. Труба в траншее со всех сторон должна быть укрыта слоем земли или песка без камней шириной 20-40 см.

Скорость в газотранспортном трубопроводе, соединяющем газосборную и газокомпрессорную станции, не должна превышать 10 м/с. Используют трубы типа ПЭ-100 «Газ» 225×12,8 мм или 315×17,9 мм (SDR 17,6), которые укладываются в земле с достаточным уклоном и минимальным покрытием 1,0 м.

Максимальный вакуум в газовой скважине должен составлять не более 5 кПа (50 мбар), в газосборной станции и газотранспортном трубопроводе – не более 15 кПа (150 мбар).

#### *Система дегазации по патенту RU 2740814*

Технология предназначена для повышения надежности и эффективности работы системы сбора биогаза при упрощении конструкции, что позволяет эффективно отбирать свалочный газ в условиях его неравномерного выхода, снижать стоимость сооружения систем дегазации за счет использования элементов газосборных систем и изоляции, выполненных из вторичного сырья.

Для обезвреживания полигонов хранения твердых коммунальных отходов в теле полигона устанавливаются несущие нагрузку горизонтальные газотранспортирующие линии, состоящие из газосборных труб и соединительных тройников между ними, укрытые сверху полиэтиленовыми рукавами, с закрепленными в тройниках свободно подвешенными вертикальными перфорированными газосборными трубами, расположенными на расстоянии 3-6 м друг от друга. Горизонтальные газосборные трубы соединяются с газокolleкторной трубой, осуществляющей подачу газа в магистральную линию для транспортирования газа к месту использования. При этом все элементы газосборной системы выполняются из пластика, изготовленного, в том числе, из вторичного сырья. Снижение веса газосборной системы позволяет использовать свободно подвешенные перфорированные газосборные трубы, прикрепленные верхними концами с помощью полиэтиленовых тройников к несущим нагрузку горизонтальным



газотранспортирующим линиям. Опорой для газосборной системы являются горизонтальные сборные коллекторы. Таким образом способ не требует сооружения фундамента или бетонного основания для вертикальных газосборных труб, исключает давление вертикальных труб на основание полигона с разрушением противофильтрационного экрана.

По сравнению с известными способами, в которых расстояние между скважинами составляет от 30 метров, в предлагаемом способе скважины располагаются на расстоянии 3-6 м друг от друга, что повышает эффективность отбора биогаза в условиях неравномерности слоя захороненных отходов. В отличие от известных аналогов способ не требует выполнения фильтрующей обсыпки вертикальных газосборных труб, что позволяет уменьшать диаметр скважин.

Сверху газосборной системы для предотвращения попадания биогаза (свалочного газа) в атмосферу и подсосов атмосферного воздуха в газосборную систему выполняется многослойный герметизирующий слой, состоящий из выравнивающего слоя грунта толщиной 600-800 мм, газонепроницаемого слоя из сплошной полиэтиленовой пленки и верхнего покрывающего слоя грунта толщиной 300 мм.

Кроме обеспечения герметизации многослойное покрытие производит распределение вертикальных и горизонтальных нагрузок с поверхности покрытия на газосборную систему, что позволяет осуществлять движение людей и транспорта по поверхности полигона; осуществлять дальнейшее использование участка полигона ТКО с сооруженной газосборной системой для рекультивации полигона ТКО или дальнейшего складирования ТКО поверх системы газосбора, таким образом создавая многоуровневую систему захоронения.

В процессе отвода собранного биогаза осуществляется влагоудаление, после чего откачанный биогаз подают в распределительный коллектор, затем в устройства генерации электрической и тепловой энергии и устройство подготовки и компримирования метана, а излишки газа сжигают в горелочном устройстве.

По предлагаемой технологии системы газосбора сооружены на полигоне «Стрелецкое» г. Белгорода (рис. 13).



- 1 – участок «Север», окончание функционирования в 2006 г.;
- 2 – действующий участок полигона «Юг»;
- 3 – участок, выведенный из эксплуатации более 20 лет («Старая городская свалка»);
- 4 – мусоросортировочный комплекс и производственный участок по переработке вторичного сырья;
- 5-10 – действующие системы газосбора (2,03 Га);
- 11 – перспективный план сооружения систем газосбора (10,76 Га).

**Рис. 13. Схема полигона ТКО «Стрелецкое» г. Белгорода**

Собираемый биогаз используется для генерации электроэнергии для собственных нужд предприятия в двух газопоршневых установках мощностью 135 кВт каждая, для отопления цеха площадью 1493 м<sup>2</sup> и двух мусоросортировочных модулей, в технологическом котле мощностью 1 МВт для сушки древесины в линии производства древесных пеллет.



На основании эксплуатации газосборных полей установлено, что фактический выход газа с использованием предлагаемого способа с 1 Га составляет 500 м<sup>3</sup> в час. Содержание метана в биогазе составляет около 30% для участка «Север» и 60% для участка «Юг» [6].

*Сравнение систем*

Сравнительные характеристики описанных систем приведены в табл. 4.

Таблица 3

**Сравнительные характеристики систем дегазации**

Наименование	Технологический регламент АКХ им К.Д. Памфилова	«Традиционные системы»	Multriwell	ГОСТ Р 59415-2021	Патент RU 2740814	
Расстояние между скважинами	30...40 м	45...90 м	3 м	20...30 м	3...6 м	
Диаметр и способ выполнения скважин	700 мм, железобетонное обсадное кольцо с перфорацией	200...900 мм, бурение	~ 150×10 мм, прокол (продавливание)	600 мм	80...100 мм, прокол (продавливание)	
Диаметр и материал вертикальных перфорированных газосборных труб	100 мм, асбестоцемент	100..200 мм, полиэтилен или ПВХ	Прямоугольные 100×5 мм, гибкие трубы (дрены) из геотекстиля с распорками внутри	110 мм	50×5 мм, ПНД, в т.ч. из вторичного сырья	
Заполнение промежутка между газосборной трубой и стенкой скважины	Щебень	Щебень	Нет	Щебень	Нет	
Герметизация	Устье скважины	Устье скважины	Газо- водо- непроницаемая минеральная смесь «Trisoplast», всё поле, толщина 0,5 м	Устье скважины, 2,5 м	Всё поле, глина, грунт, ПЭ пленка, высота 0,9...1,2 м	
Средний выход биогаза, м <sup>3</sup> /Га	35...85 (проектный)	10...180 (эксплуатационные данные)	100..200, 600 в г. Самара (эксплуатационные данные)	150...340 (проектный)	500 (эксплуатационные данные)	
Стоимость системы	мощностью 1000 м <sup>3</sup> /ч биогаза	-	1,5...18 млн долл. США	170...300 млн руб (2,3...4 млн дол. США)	-	30...40 млн руб (0,4...0,6 млн дол. США)
	площадью 1 Га	-	-	113 млн руб (1,5 млн дол. США)	-	15...20 млн руб (0,2...0,3 млн дол. США)



## Способы использования свалочного газа

Существует несколько направлений утилизации или энергетического использования биогаза.

1. *Прямое сжигание на факеле.* Это самый простой способ утилизации, который не приносит дохода, но выполняет экологическую функцию. Метан ( $\text{CH}_4$ ) при сжигании превращаясь в углекислый газ ( $\text{CO}_2$ ) и воду ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Поскольку парниковый потенциал метана в 28/86 раз выше, чем у  $\text{CO}_2$ , такое сжигание значительно снижает негативное воздействие полигона на климат. Кроме того при сжигании в высокотемпературном факеле уничтожаются все вредные примеси, имеющиеся в биогазе.

2. *Производство тепловой энергии.* Свалочный газ может напрямую сжигаться в специальных котельных для получения горячей воды или пара. Эта тепловая энергия может использоваться для нужд самого полигона (например, обогрев административных и производственных зданий, линий сортировки) или поставляться внешним потребителям – теплицам, промышленным предприятиям или жилым массивам, расположенным вблизи полигона. КПД преобразования энергии биогаза в теплоту в котлах составляет 75-90%. Ограничением способа является наличие потребителей тепловой энергии.

3. *Производство электроэнергии.* Это наиболее распространенный способ коммерческого использования свалочного газа. Варианты генерации электроэнергии могут быть следующими:

а) наиболее распространено использование газопоршневых установок (ГПУ), которые могут иметь широкий диапазон мощности – от нескольких десятков кВт до десятков МВт;

б) в США и Европе имеется опыт использования турбин (ГТУ) и микротурбин (МГТУ), работающих на биогазе, но эта технология требует тщательной очистки биогаза и биогазовые турбины небольшой мощности имеют высокую удельную стоимость;

в) выработка пара энергетических параметров в паровом котле и генерация электроэнергии в паровой турбине (например компания Veolia Proprete, Франции, эксплуатирует ТЭС комбинированного типа с биогазовой турбиной мощностью по электроэнергии 11 МВт и паровой турбиной мощностью 6 МВт, но такие проекты являются единичными из-за высокой стоимости;

г) использование твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ), которые обладают большими техническими преимуществами (высокие КПД и надёжность, возможность работы при с топливом с низким и изменяющимся содержанием метана), но одновременно имеют очень высокую удельную стоимость (1 млн руб./кВт мощности) и так же, как и газовые турбины, требуют тщательной очистки биогаза.

Сравнение способов генерации приведено в табл. 5.

Таблица 4

### Сравнение способов генерации электроэнергии из биогаза [11]

Способ генерации	Диапазон мощности, кВт	Электрический КПД, %	Сравнительная стоимость электроэнергии, руб./кВт·ч (2019 г.)
ГПУ	5-50 000	40	0,71
ГТУ/МГТУ	30-200/500-1500	15-25	1,8
Паротурбинные установки	100-1000 (одного блока)	20-40	-
ТОТЭ	до 250 (одного блока), с возможностью масштабирования	50-60	4,64-11,81



Выработанная электроэнергия может покрывать собственные нужды полигона, а излишки – продаваться в общую электросеть по «зеленому» тарифу или оптовой цене. Способы реализации выработанной электроэнергии представлены в табл. 6.

Таблица 5

**Варианты реализации электроэнергии**

Варианты продажи	Особенности	Срок окупаемости
Продажа гарантирующему поставщику*	<p>1. Электроэнергия может быть выкуплена только по средневзвешенной нерегулируемой цене на электрическую энергию на оптовом рынке, в зависимости от ценовой категории. Согласно данным НП Совет рынка прогноз свободных (нерегулируемых) цен на 2026 г. по регионам составляет от 1,5 до 3,4 руб./кВт·ч.</p> <p>2. Гарантирующий поставщик не обязан покупать розничную генерацию (возможность покупки определяется соглашением сторон).</p>	Не окупается (себестоимость 4-5 руб./кВт·ч)**
Продажа независимой энергосбытовой компании (НЭСК)*	1. НЭСК (независимая электросетевая компания) покупает розничную электроэнергию в собственных экономических интересах, поэтому заинтересована в покупке только по стоимости, ниже оптовой.	более 3 лет**
Продажа по прямым договорам	<p>1. Стоимость электроэнергии устанавливается в договоре. Покупателю выгодно покупка по ценам ниже, чем у гарантирующего поставщика.</p> <p>2. Стоимость электроэнергии у гарантирующего поставщика зависит от региона, ценовой категории, уровня напряжения, мощности и составляет от 2,5...3 до 10 руб./кВт·ч. Как правило, чем предприятие мельче, тем стоимость электроэнергии для него выше.</p> <p>3. Покупатель должен так же заключить договор оказания услуг по передаче электроэнергии с гарантирующим поставщиком.</p>	Зависит от договорной цены на электроэнергию
Продажа электроэнергии в целях компенсации потерь	<p>Сетевая организация обязана покупать все производимую электроэнергию по «зеленому тарифу», компенсирующему все капитальные и текущие затраты, при выполнении следующих условий:</p> <p>1. Генерирующий объект функционирует на основе ВИЭ, в т.ч. и свалочного газа.</p> <p>2. Объект включен в схему и программу перспективного развития электроэнергетики субъекта РФ.</p> <p>3. Объект действующий, оснащен приборами учета, присоединен к электрическим сетям и квалифицирован.</p> <p>4. Общий объем приобретаемой электроэнергии не должен превышать 5% совокупного прогнозного объема потерь электрической энергии (мощности) территориальных сетевых организаций в регионе.</p>	Определяется методикой расчета тарифа

\* 1) мощность генерации должна быть менее 25 МВт; 2) поставщик должен иметь технические условия сетевой организации на выдачу э.э. в сеть.

\*\* Мощность 25 МВ, годовая выработка 220 млн кВт·ч, CAPEX 1 720 млн руб., OPEX 450 млн руб. (оценка ЦЭП Газпромбанка)



В настоящее время электроэнергию из биогаза можно отдавать сетевой компании по «зеленому тарифу», в рамках 5% от сетевых потерь в регионе. Для инвесторов это самый выгодный вариант, т.к. будут возмещены все затраты независимо от себестоимость электроэнергии. Но эти объемы незначительны, и в ряде регионов они уже вытеснены солнечными и ветряными электростанциями. В Белгородской области указанный лимит уже полностью используется биогазовой станцией «Лучки».

Поэтому остаются два способа продажи – выдача в сеть по оптовой стоимости или продажа потребителям через независимые сбытовые компании или по прямым договорам. В настоящее время средняя оптовая стоимость электроэнергии объединенных энергосистем (ОЭС) составляет около 2,3 руб./кВт·ч. Конечная средняя стоимость электроэнергии для юридических лиц в зависимости от мощности и ценовой категории составляет от 3-4 до 10-12 руб./кВт·ч. Поэтому прямая продажа, при наличии заинтересованных потребителей, выгодней поставки в сеть.

4. *Когенерация (комбинированное производство теплоты и электроэнергии)*. Это наиболее эффективный с точки зрения использования энергии способ. В процессе выработки электроэнергии после ГПУ и газовых турбин образуется большое количество выхлопных газов с температурой 400-500°C. Это тепло утилизируется в теплообменниках для производства горячей воды или пара, как и в случае прямого сжигания. Таким образом, общий КПД установки может достигать 80-90%.

5. *Производство биометана*. Это наиболее технологически сложный и капиталоемкий, но и наиболее ценный способ утилизации. Свалочный газ проходит глубокую очистку от диоксида углерода, сероводорода, силоксанов и других примесей. В результате получается биометан — продукт с содержанием метана свыше 95%, который по своим характеристикам является полным аналогом природного газа. Биометан можно закачивать поставлять в газотранспортную сеть, использовать в качестве моторного топлива для автомобилей (в сжатом или сжиженном виде) или как сырье в химической промышленности.

Следует остановиться на необходимости очистки биогаза. Основным компонентов примесей, влияющих на газоиспользующее оборудования, в биогазе является сероводород  $H_2S$ , который, преобразуясь в серную кислоту, вызывает коррозию оборудования. Обычно среднее содержание  $H_2S$  в биогазе по данным фактических замеров на полигонах ТКО в действующих системах газосбора не превышает 100 мг/кг. В дизельных топливах согласно ГОСТ 32511-2013 допускается содержание серы, не более: экологический класс К3 – 500 мг/кг; К4 – 50 мг/кг; К5/Евро5 – 10 мг/кг. Таким образом содержание сероводорода в свалочном газе сопоставимо с его содержанием в дизельных топливах экологического класса К4, поэтому специальной очистки биогаза для использования в газопоршневых установках и котлах не требуется. Это подтверждает опыт более чем десятилетней эксплуатации газопоршневой установки фирмы MAN на полигоне ТКО «Преображенка» (г. Самара), которая использует биогаз, подаваемый прямо с системы газосбора полигона без какой либо очистки.

### Технопарки на базе полигонов ТКО

Полигоны ТКО – место неблагоприятной экологической обстановки с утвержденной санитарно-защитной зоной. На их базе возможно создание технологии переработки отходов, используя свалочный газ в качестве дешевого источника энергии. ООО «ТК Экотранс» (г. Белгород) – пример такого индустриального кластера, расположенного на полигоне «Стрелецкое», включающего (рис. 14).

Именно за счет наличия потребителей тепловой энергии, вырабатываемого из биогаза, такие проекты являются экономически выгодными.



## Общий вид промышленного кластера на полигоне ТКО «Стрелецкое»

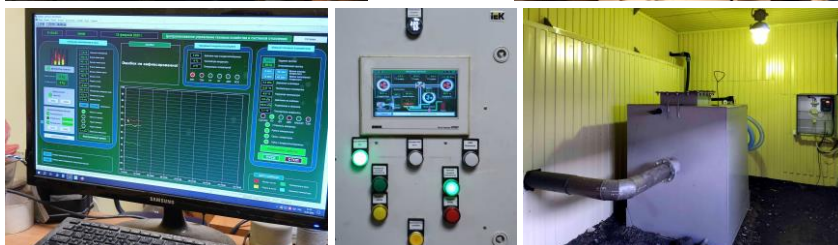
*Производственные линии:*

- сортировочные линии ТКО;
- переработка древесных отходов (измельчение, сушка, брикетирование) с использованием для сушки сырья свалочного газа;
- изготовление ПНД-труб и ПЭ-пленки из отходов;
- линия по производству жидкого топлива из резины и пластика;
- строящаяся линия переработки стеклобоя.

## Производственные участки



## Газоперекачивающая станция и КИПиА системы газосбора



## Газоиспользующее оборудование: отопительный котел, технологический котел, газопоршневая электростанция



Рис. 14. Производственный кластер, использующий энергию биогаза

**Основные выводы**

1. Свалочный газ является неизбежным и опасным продуктом полигонов ТКО. Он образуется из органических отходов и содержит 40–60 % метана, поэтому и обладает существенным энергетическим потенциалом. В России его использование может покрыть до 2% общего потребления электроэнергии.

2. Сбор и утилизация свалочного газа решают экологические и климатические проблемы, устраняет риски самовозгорания полигонов и значительное загрязнение атмосферы, происходящее при этом. Метан, выделяемый с полигонов, имеет парниковый эффект в 28–86 раз выше, чем CO<sub>2</sub>. Поэтому даже самый простой метод утилизации – сжигание на факеле с переходом CH<sub>4</sub> в CO<sub>2</sub>, многократно снижая парниковый эффект, с термическим уничтожением всех вредных органических примесей.

3. Эффективность сбора биогаза зависит от типа газосборной системы. Современные активные системы дегазации обеспечивают значительно более высокий отбор биогаза по сравнению с традиционными пассивными или устаревшими активными системами, благодаря плотному расположению скважин и надёжной герметизации всего газосборного поля. Например, система, реализованная на полигоне ТКО «Стрелецкое» (г. Белгород) по патенту RU 2740814, использует расстояние между скважинами 3–6 м и демонстрирует высокий эксплуатационный выход газа — 500 м<sup>3</sup>/ч с 1 Га.



4. Наиболее выгодное использование биогаза – это локальная энергетика и когенерация. Прямая продажа электроэнергии в сеть, вырабатываемой с использованием биогаза, часто экономически невыгодна из-за низких ценовых цен, по которым сетевые организации электроэнергию приобретают. Экономически целесообразно использование биогаза для обеспечения теплотой и электроэнергией собственных нужд полигона или расположенных поблизости промышленных кластеров.

### Информация о финансировании (Acknowledgments)

Работа выполнена в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет 2030» с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

### Библиографический список

1. Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов не регулируемых Монреальским протоколом за 1990 – 2020 гг. / **А.А. Романовская, А.И. Нахутин, В.А. Гинзбург** и др. – М.: Росгидромет; ФГБУ «ИГКЭ», 2022. – 468 с. URL: [http://downloads.igce.ru/kadastr/RUS\\_NIR-2022.zip](http://downloads.igce.ru/kadastr/RUS_NIR-2022.zip)
2. Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing / **P. Forster, V. Ramaswamy, P. Artaxo, T. Berntsen** et al. // *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the 4th Assessment Report of the IPCC* (Eds Editors: S. Solomon, D. Qin et al). – Cambridge, New York: Cambridge University Press, 2007. – P. 129-234. URL: <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4-wg1-chapter2-1.pdf>
3. Anthropogenic and Natural Radiative Forcing / **G. Myhre, D. Shindell, F.-M. Breon** et al. // *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the IPCC*; Eds. T.F. Stocker, D. Qin et al. – New York: Cambridge University Press, 2013. – P. 659-740. DOI: [10.1017/CBO9781107415324.018](https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.018)
4. **Бажин Н.М.** Метан в окружающей среде. – Новосибирск: ГПНТБ СО РАН, 2010. – 56 с. (Сер. Экология. Вып. 93). EDN: [KYIJDP](https://www.edn.ru/kyijdp)
5. **Трубаев П.А.** Оценка энергетического потенциала свалочного газа // *Энергетические системы*. – 2021. – № 1. – С. 91-105. EDN: [HCTPTI](https://www.edn.ru/hctpti). DOI: [10.34031/es.2021.1.009](https://doi.org/10.34031/es.2021.1.009)
6. **Трубаев П.А., Веревкин О.В.** Исследование состава биогаза на полигоне ТКО «Стрелецкое» // *Энергетические системы*. – 2023. – № 4. – С. 122-145. EDN: [ODOKUW](https://www.edn.ru/odokuw). DOI: [10.34031/ES.2023.4.009](https://doi.org/10.34031/ES.2023.4.009)
7. Технологический регламент получения биогаза с полигонов твердых бытовых отходов / разр. Н.Ф. Абрамов, Е.М. Букреев, А.Ф. Проскуряков. – М.: АКХ им. К.Д. Памфилова, 1990. – 22 с.
8. *International Best Practices Guide for Landfill Gas Energy Projects*. – Washington: U.S. EPA, 2012. – 139 p. URL: [https://www.ccacoalition.org/sites/default/files/resources/2012\\_best-practice-landfill-gas\\_US.pdf](https://www.ccacoalition.org/sites/default/files/resources/2012_best-practice-landfill-gas_US.pdf)
9. *Landfill Gas Energy Project Development Handbook*. – Washington: U.S. EPA, 2020. – 143 p. URL: [https://www.epa.gov/system/files/documents/2024-01/pdh\\_full.pdf](https://www.epa.gov/system/files/documents/2024-01/pdh_full.pdf)
10. de Jonge M. Multriwell(r). Status report GM-0173916 (2nd ed.). – Velddriel: Multriwell B.V.; Houten: Grontmij Nederland B.V., 2015. – 69 p.
11. **Леонов Е.С.** Сравнение способов генерации электроэнергии из биогаза // *Наукоемкие технологии и инновации (XXV научные чтения)*. – Белгород: БГТУ, 2023. – С. 908-912. EDN: [EDVMQU](https://www.edn.ru/edvmqu)

### References

1. Romanovskaia, A. A., Nakhutin, A. I., Ginzburg, V. A., Grbar, V. A., Imshennik, E. V., Karaban, R. T., Korotkov, V. N., Vertiankina, V. Iu., Grigurina, T. V., Govor, I. L., Litvinchuk, G. G., Lytov, V. M., Polumieva, P. D., Popov, N. V., Trunov, A. A., & Prokhorova, L. A. (2022). *Nacion-*



al'nyj doklad o kadastre antropogennyx vybrosov iz istochnikov i absorbcii poglotitelyami parnikovyx gazov ne reguliruemyx Monreal'skim protokolom za 1990 – 2020 gg. [National inventory report of anthropogenic emissions by sources and removals by sinks of greenhouse gases not controlled by the Montreal Protocol for 1990–2020]. Roshydromet; IGKE. [http://downloads.igce.ru/kadastr/RUS\\_NIR-2022.zip](http://downloads.igce.ru/kadastr/RUS_NIR-2022.zip) [In Russian]

2. Bodeker, G., Boucher, O., Collins, W., Conway, T. J., Dlugokencky, E., Elkins, J., Etheridge, D., Fraser, P., Keeling, D., Keeling, R., Kinne, S., Lassey, K., Lohmann, U., Manning, A., Montzka, S., Oram, D., O'Shaughnessy, K., Piper, S., ..., & Whorf, T. (2007). Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. In *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the 4th Assessment Report of the IPCC* (Eds Editors: S. Solomon, D. Qin et al) (pp. 129-234). Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4-wg1-chapter2-1.pdf>

3. Myhre, G., D. Shindell, F.-M. Breon, W. Collins, J. Fuglestedt, J. Huang, D. Koch, J.-F. Lamarque, D. Lee, B. Mendoza, T. Nakajima, A. Robock, G. Stephens, T. Takemura, & Zhang, H. (2013). Anthropogenic and natural radiative forcing. In *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the IPCC* (Eds. T.F. Stocker, D. Qin et al.) (pp. 659-740). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CB09781107415324.018>

4. Bazhin, N.M. (2010). *Metan v okruzhayushhej srede* [Methane in the environment]. GPNTB SO RAN [In Russian].

5. Trubaev, P. (2021). Evaluation of the energy potential of landfill gas. *Energy Systems*, 1, 91-105. <https://doi.org/10.34031/es.2021.1.009> [In Russian]

6. Trubaev, P. & Verevkin, O. (2023). Evaluation of the energy potential of landfill gas. *Energy Systems*, 4, 122-145. <https://doi.org/10.34031/ES.2023.4.009> [In Russian]

7. Abramov, N. F., Bukreev, E. M. & Proskuriakov A. F. (1990). *Texnologicheskij reglament polucheniya biogaza s poligonov tverdyx by'tovyx otkodov* [Technological regulations for the production of biogas from solid waste landfills]. AKKh im. K.D. Pamfilova. [In Russian]

8. U.S. EPA. (2012). *International Best Practices Guide for Landfill Gas Energy Projects*. U.S. EPA. [https://www.ccacoalition.org/sites/default/files/resources/2012\\_best-practice-landfill-gas\\_US.pdf](https://www.ccacoalition.org/sites/default/files/resources/2012_best-practice-landfill-gas_US.pdf)

9. U.S. EPA. (2020). *Landfill Gas Energy Project Development Handbook*. U.S. EPA. [https://www.epa.gov/system/files/documents/2024-01/pdh\\_full.pdf](https://www.epa.gov/system/files/documents/2024-01/pdh_full.pdf)

10. de Jonge, M. (2015). *Multriwell(r). Status report GM-0173916* (2nd ed.). Multriwell B.V.; Grontmij Nederland B.V.

11. Leonov, E.S. (2023). Sravnenie sposobov generacii e`ktroe`nergii iz biogaza [Comparison of methods for generating electricity from biogas]. In *Proc. Naukoemkie tehnologii i innovacii (XXV nauchny'e chteniya)* (pp. 908-912). BGTU. [In Russian]

#### Сведения об авторах

**Трубаев Павел Алексеевич**, д-р техн. наук, профессор кафедры Энергетики теплотехнологии БГТУ им. В.Г. Шухова. SPIN-код: [5743-7260](https://orcid.org/0000-0003-1710-1599). E-mail: [trubaev@gmail.com](mailto:trubaev@gmail.com).

#### Authors about

**Pavel Trubaev**, Dr. of Tech. Sciences, Professor of Department of Energy Engineering of Heat Technologie, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia. ORCID: [0000-0003-1710-1599](https://orcid.org/0000-0003-1710-1599). E-mail: [trubaev@gmail.com](mailto:trubaev@gmail.com).

#### Ссылки для цитирования

Трубаев П.А. Обзор систем газосбора и использования биогаза на полигонах твердых коммунальных отходов // Энергетические системы. – 2025. – № 4. – С. 18-39.

Trubaev, P. (2025). Review of gas collection systems and biogas use at municipal solid waste landfills. *Energy Systems*, 4, 18-39. <https://doi.org/10.34031/es.2025.4.02>

