

С. М. Найман, Ю. А. Тунакова

ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ БИОГАЗОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ ОРГАНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ В ТАТАРСТАНЕ. ПРОИЗВОДСТВО БИОГАЗА И ЭНЕРГИИ

Ключевые слова: биоэнергетика, метаногенез, биогаз, отходы, сельское хозяйство, органические удобрения, энергетический потенциал.

В работе приведен краткий обзор существующего положения в производстве метана из биомассы. Оценен потенциал переработки сельскохозяйственных отходов в биогаз, удобрения и электрическую и тепловую энергию. Показаны перспективы использования биогазовых технологий в России и Татарстане

Keywords: Bioenergetics, methanogenesis, biogas, waste, agriculture, organic fertilizers, energy potential.

The article adduces a short observation of the existing situation in the production of methane from biomass, estimates industrial potential of processing of organic part of agricultural waste into biogas, fertilizers, electrical and thermal energy. In the article are shown perspectives of using biogas technologies in Russia and especially in Tatarstan.

Научные исследования биогаза как продукта естественного разложения органических веществ и, в частности, биополимеров, направлены на тщательный анализ различных субстратов и определение содержания органического сухого вещества в них, поскольку колебания в составе субстрата имеют сезонный и природно-климатический характер и оказывают существенное влияние на метаногенерацию [1, 2]. Кроме того, решаются следующие проблемы [3]:

1. Поиск путей интенсификации газообразования.
2. Подбор эффективных стимуляторов и ингибиторов процесса газообразования.
3. Наиболее эффективное использование сброженных субстратов.

Производство биогаза

На гидролиз и ферментативное расщепление отходов влияют влажность, рН и температура субстрата. Большинство действующих биогазовых установок работают не на монображивании, а на смеси субстратов, состоящей из множества компонентов. Содержание метана в получаемом биогазе, в первую очередь, зависит от следующих параметров:

- ведения технологического процесса:
 - соблюдения условий метаногенеза;
 - компенсации потерь активной биомассы путем увеличения времени обработки;
 - поддержания для хорошего массообмена требуемой концентрации субстрата – 5-12 % и своевременного выведения продуктов жизнедеятельности микроорганизмов;
 - размеров частиц – чем меньше частицы, тем больше общая поверхность твердой массы. Это повышает скорость биохимических реакций метаногенерации, так как увеличивается доступность бактериям субстрата благодаря облегчению диффузионных процессов;
- отсутствия в субстрате вредных соединений, подавляющих жизнедеятельность метанообразующих микроорганизмов (различные формы азота и большинство тяжелых, щелочных, щелочнозе-

мельных металлов, сульфидов, кислорода, антибиотиков, детергентов, дезинфицирующих средств и других веществ);

- состава питательных веществ субстрата и их количества – должно обеспечиваться оптимальное содержание биогенных веществ – углерода, кислорода, водорода, азота, серы и фосфора для функционирования существующих и появления новых бактерий. Кроме того, при длительном культивировании в метантенках происходит наращивание биомассы микрофлоры и ее специализация по данному субстрату и конкретным физико-химическим условиям среды [4]. Поэтому метаногенное сообщество очень чувствительно к колебаниям состава субстрата;

- продолжительности сбраживания, которое должно быть больше времени удвоения микробной ассоциации. Выход биогаза напрямую зависит от численности и сбалансированности метаногенного биоценоза. Недостаточно долгое пребывание субстрата в анаэробных условиях приводит к его неполной переработке, излишне долгая переработка уменьшает массу утилизированного за год сырья и ведет к экономическим потерям;

- температурного режима – психрофильного (до 25 °С), мезофильного (с оптимумом температуры 33-40 °С), термофильного (50-55 °С) и его постоянства. В каждом интервале работает своя группа метаногенов. Для эффективного теплообмена требуется равномерный прогрев субстрата по всему объему реактора.

Вместе с тем существующие технологии и оборудование еще не обеспечивают получение биогаза из выбранного сырья с максимально возможным выходом. Превращению в биогаз подвергаются только 30-60 % органических соединений при уменьшении содержания общего углерода на 15-30 % [5], а количество метана в биогазе достигает лишь 60-70 %. Для улучшения этих показателей чаще всего процесс анаэробного сбраживания нуждается в термофильных условиях его проведения (45-55 °С), что требует затрат значительной части получаемой энергии [6]. Кроме того, при более высокой температуре выход метана меньше из-за различий в

растворимости и образовании газообразной двуокиси углерода: чем большее количество CO_2 перейдет в газообразную форму, тем меньшей будет процентная доля CH_4 в биогазе [7]. Повышению выхода биогаза способствует также применение энзимов, ускоряющих разложение органических веществ.

В метантенке должно обеспечиваться оптимальное содержание летучих жирных кислот (50–500 мг/л), необходимое для активной сбалансированной жизнедеятельности микробного сообщества в реакторе [4]. Кроме того, необходимо периодическое перемешивание сбраживаемой массы [8], во-первых, для удаления образующегося биогаза, во-вторых, для предотвращения образования корки и осадка, препятствующих свободному выходу биогаза. Перемешивание будет также способствовать равномерному распределению свежего субстрата, популяции бактерий, температуры внутри метантенка, предотвращению формирования пустот и скоплений, уменьшающих эффективную площадь реактора. Но перемешивание должно быть щадящим, так как при разрушении микробной ассоциации процесс сбраживания будет непродуктивным до образования нового сообщества бактерий.

В настоящее время разработано и применяется достаточно большое количество технологий получения биогаза, основанных на использовании различных вариаций температурного режима, влажности, концентраций бактериальной массы, длительности протекания биореакций и т.д. [9]. При этом содержание метана в биогазе варьирует в зависимости от химического состава сырья и может составлять от 50 до 90 %. Интенсивность сбраживания можно повысить механическим расщеплением и разрушением структуры твердых органических компонентов или механической деструкцией, приводящей к увеличению активной поверхности, обрабатываемой метанообразующими микроорганизмами, к разрушению клеток и высвобождению способной к сбраживанию внутриклеточной жидкости, содержащей легко растворимые органические вещества [10]. При использовании измельченного сырья уменьшается время сбраживания.

Для практической работы важно и математическое моделирование режимов метаногенерации и работы биогазовых установок, которое успешно проводится зарубежными и отечественными исследователями [11–22].

Согласно Амон Т. [23] принципиальные различия в методах работы разных установок состоят в консистенции субстрата (твердое сырье или жидкое), в способе подачи сырья (порционно или проточным методом), в типах смешивания субстратов (полное смешивание или пробочное проталкивание), в количестве реакторов (один или несколько).

Производство энергии

К централизованной системе энергоснабжения в нашей стране относятся сетевая электроэнергия, магистральный газ, жидкое и твердое топливо централизованной поставки – уголь, торф и т.п. Производство биогаза из отходов – местных видов топлива – позволяет решить проблему энергоснаб-

жения удаленных от энергоисточников районов. Отличительными особенностями России являются значительная протяженность территории, неравномерность ее заселения, низкая плотность населения в отдаленных регионах и, соответственно, с одной стороны, малое энергопотребление по отношению к протяженности проводящей сети, а с другой стороны, недостаточное покрытие территории газовыми и энергетическими коммуникациями. Поэтому к трудностям энергоснабжения изолированных от энергосистемы потребителей относятся дальний транспорт топлива и зависимость от его поставок. Сложные схемы доставки топлива приводят к значительному увеличению цен и, как следствие, к высокой себестоимости производства энергии. К этой проблеме добавляется достаточно высокий износ оборудования дизельных электростанций, внутрипоселковых сетей и трансформаторных подстанций.

При сжигании биогаза выделяется тепла больше, чем при непосредственном сжигании отходов (древесных или навоза). В сельских районах, на территории предприятий АПК для когенерационных целей могут успешно применяться микрогазовые турбины мощностью от 25 до 100 кВт [24].

При анаэробном разложении в биогаз переходит, как отмечалось выше, лишь 40–50 % органического вещества, а объем биомассы снижается, как правило, на 4–5 % [5]. Из 1 кг сухого органического вещества получается до $1,25 \text{ м}^3$ биогаза плотностью от 0,8 до $1,2 \text{ кг/м}^3$, содержащего до 65–80 % метана. В зависимости от содержания метана теплотворная способность биогаза составляет $4700\text{--}6000 \text{ ккал/м}^3$ ($20\text{--}25 \text{ МДж/м}^3$), что эквивалентно 0,68–0,85 кг условного топлива, и из него можно получить 1,5–2,2 кВтч электроэнергии и 2,8–4,1 кВтч тепла [25]. Для выработки 1 МВт энергии необходима подача биогаза в количестве $525 \text{ м}^3/\text{ч}$ [26].

Конечно, часть энергии будет расходоваться на собственные производственные нужды установок – на перемешивание и поддержание температуры. На отопление метантенка и подогрев поступающей массы до мезофильной температуры зимой в условиях средней полосы России затрачивается 70 % получаемого биогаза [27]; для сравнения: в Дании, где среднемесячная температура воздуха более высокая, этот показатель составляет 15 (для мезофильного) – 25 % (для термофильного сбраживания) [28].

Чтобы оценить ресурс биогазовых технологий для производства энергии и биоудобрений из отходов животноводства, мы провели анализ потенциала сырьевой базы на примере страны в целом и отдельного ее региона – Татарстана. Для этого мы использовали официальную (Росстата, Татарстатата, Министерства природных ресурсов и экологии РФ и Министерства экологии и природных ресурсов РТ) и справочную информацию по производству и потреблению топлива, электроэнергии и удобрений и образованию органических отходов, а при недостаточности информации – расчетные данные.

Выход экскрементов зависит от вида животных и их половозрастной структуры, соотношения твердых и жидких выделений, технологии со-

держания животных (подстилочное, бесподстилочное) и навозоудаления (гидросмывом или другим способом). Годовое накопление навоза Q (суммарный сырьевой потенциал региона) мы определяли по следующей формуле:

$$Q = \sum Q_i = [\sum (N_i \cdot q_{mi} \cdot D_i)] / 1000, \text{ млн т,}$$

где Q_i – выход навоза за год от i -го вида животных;
 N_i – поголовье животных каждого вида, млн голов;
 q_{mi} – суточная норма выхода навоза (помета) от одного животного, кг/гол.*сут. Устанавливается по зоотехническим данным и нормам образования органических отходов;

D_i – продолжительность накопления навоза, сут.. Для птиц и свиней $D = 365$ дней, для КРС D зависит от времени стойлового содержания, так как при выпасе навоз безвозвратно теряется. В Татарстане для КРС в основном применяется стойлово-пастбищная система, и пастбищный сезон в условиях РТ длится от третьей декады мая до конца сентября – октября [29], то есть продолжительность стойлового периода свыше 220 дней. Поэтому общий объем накопления навоза за год можно рассчитать либо по табличным значениям выхода навоза для разной продолжительности стойлового периода [30], либо рассчитывать количество отдельно для стойлового и отдельно для пастбищного периода, когда суммируют только 1/3 выхода экскрементов животных [31], либо просто вычесть 30 % из-за потерь на пастбищах [там же]. Мы для укрупненной оценки выхода навоза КРС применили последний способ, т.е. для КРС $D = 365 \cdot 0,7$; 1000 – коэффициент перевода килограмма в тонну.

Исходная информация для расчета представлена в табл. 1. Из всех сельскохозяйственных животных мы учитывали только крупный рогатый скот (КРС), свиней, птицу и не брали в расчет хозяйства населения, так как по литературным данным биогазовые установки становятся рентабельными при размере стада не менее 20 условных голов [32-34]. Для перевода физического поголовья животных в условные головы крупного скота применяют сле-

дующие коэффициенты: коровы, быки, лошади – 1,0, прочий КРС – 0,6, свиньи – 0,3, овцы и козы – 0,1, птица – 0,02 [35]. Также учитывалось только поголовье взрослой птицы – кур. Другая птица и молодняк (а он составляет 2/3 от общего поголовья птицы) из расчетов исключались. Так, общее поголовье всей птицы в России в 2012 г. в хозяйствах всех категорий было 495 млн голов, мы взяли только взрослых кур и петухов и только в сельскохозяйственных организациях – 113 млн голов [36].

В табл. 1 мы приводим сведения за 2011 и 2012 годы, чтобы проиллюстрировать колебания в численности животных. При дальнейших расчетах мы брали данные за 2011 г. для корректного сравнения с потреблением топлива и электроэнергии, потому что последняя официальная статистическая информация представлена за этот год.

Потенциал выхода биогаза P_b рассчитывали по формуле:

$$P_b = [\sum (Q_i \cdot q_{bi} \cdot \mathcal{E}_k)] / 1000, \text{ млн т у.т.,}$$

где \mathcal{E}_k – calorific эквивалент для перевода отдельных видов топлива и энергии в тонны условного топлива. Обычно он приводится в нормативных документах [39-41] или справочной литературе. Для биогаза он рассчитан нами и равен 0,672 (табл. 2).

Таблица 1 – Исходные данные для расчета отходов животноводства [36]

Животные	Поголовье (N_i), млн. голов				Выход	
	Регион, год				навоза (q_{mi}), кг/гол.·сут. [27]	биогаза (q_{bi}), м ³ /т свежего субстрата
	Россия		Татарстан			
	2011	2012	2011	2012		
КРС	10,80	10,99	0,80	0,78	55	60
Свиньи	12,10	14,24	0,53	0,57	4,5	65
Птица	113 [37]	114,8	3,04 [38]	2,81	0,25	130

Таблица 2 – Коэффициенты перевода единиц энергии и топлива

Единица	Эквивалент								
	Дж	ГДж	ккал	Гкал	кВт·ч	Кг у.т.	м ³ метана	м ³ природного газа	м ³ биогаза (55 % метана)
1 Дж	1	10 ⁻⁹	0,239·10 ⁻³	0,239·10 ⁻⁹	0,278·10 ⁻⁶	34,144·10 ⁻⁹	27,926·10 ⁻⁹	29,568·10 ⁻⁹	50,775·10 ⁻⁹
1 ГДж = 10 ⁹ Дж	10 ⁹	1	0,239·10 ⁶	0,239	0,278·10 ³	34,144	27,926	29,568	50,775
1 ккал = 10 ³ кал	4,187·10 ³	4,187·10 ⁻⁶	1	10 ⁻⁶	1,163·10 ⁻³	0,149·10 ⁻³	0,117·10 ⁻³	0,124·10 ⁻³	0,322·10 ⁻³
1 Гкал = 10 ⁹ кал	4,187·10 ⁹	4,187	10 ⁶	1	1,163·10 ³	0,149·10 ³	0,117·10 ³	0,124·10 ³	0,322·10 ³
1 кВт·ч	3,6·10 ⁶	3,6·10 ⁻³	0,860·10 ³	0,860·10 ⁻³	1	0,123	0,1005	0,1064	0,1827
Кг у.т. = 7000 ккал	29,308·10 ⁶	29,308·10 ⁻³	7·10 ³	7·10 ⁻³	8,136	1	0,818	0,867	1,487
1 м ³ метана	35,808·10 ⁹	35,808·10 ⁻³	8,553·10 ³	8,553·10 ⁻³	9,947	1,222	1	1,05	1,818
1 м ³ природного газа	33,82·10 ⁶	33,82·10 ⁻³	8,078·10 ³	8,078·10 ⁻³	9,395	1,154	0,95	1	1,727
1 м ³ биогаза (55 % метана)	19,694·10 ⁶	19,694·10 ⁻³	4,703·10 ³	4,704·10 ⁻³	5,471	0,672	0,55	0,578	1

Таблица 2 составлена для облегчения взаимного перевода единиц измерения энергии и приведения в соответствие единиц энергии и газообразного и условного топлива. Условное топливо – понятие, служащее для сопоставления тепловой ценности различных видов натурального топлива В России за единицу условного топлива (у.т.) принята теплотворная способность (низшая теплота сгорания) 1 кг каменного угля – 7000 ккал [40]. Эквивалентом 1 м³ метана является 35,808 МДж [42], а 1 м³ природного газа соответствует в среднем 1,154 кг у.т. [40]. Все дальнейшие вычисления проводили из расчета содержания метана: в природном газе – 95 % (в российском газе его количество составляет 92-98 %), в биогазе – 55 % (наименьший выход метана в составе биогаза при переработке навоза). Так как в различных литературных источниках приводятся сведения о топливе и его теплотворной способности, включая биогаз, в разных единицах и кратных им величинах – Дж, МДж, ГДж, ккал, Гкал, кВт•ч, МВт•час, т у.т., м³, то мы, для облегчения сравнения, приводим в табл. 2 все эти значения.

Потенциал производства электроэнергии P_e при использовании биогазовых технологий рассчитывали по формуле:

$$P_e = P_b \cdot \mathcal{E}_e \cdot 1000, \text{ млн кВт}\cdot\text{ч},$$

где \mathcal{E}_e – коэффициент перевода условного топлива в единицы электроэнергии – кВтч; $\mathcal{E}_e = 8,136$ (табл. 2).

Потенциал производства тепла P_T при использовании биогазовых технологий рассчитывали по формуле:

$$P_T = P_b \cdot \mathcal{E}_T \cdot 1000, \text{ млн ГДж (Гкал)},$$

где \mathcal{E}_T – коэффициент перевода условного топлива в единицы тепловой энергии – ГДж (Гкал); $\mathcal{E}_T = 29,288 \cdot 10^{-3}$ ГДж ($7 \cdot 10^{-3}$ Гкал) (табл. 2).

Потенциал производства органических удобрений P_y при использовании биогазовых технологий рассчитывали по формуле:

$$P_y = Q \cdot 0,9, \text{ млн т},$$

где 0,9 – средняя доля выхода эффлюента из общего количества отходов, обычно лежащая в диапазоне 0,79 [43] – 0,95 [44, 45].

Результаты расчетов представлены в табл. 3.

Таким образом, по самым приблизительным и сознательно заниженным оценкам (учитывались не все виды разводимых в России домашних животных, не все поголовье скота и птицы, не все хозяйства, имеющие скот, и не учитывался расход подстилки на содержание скота, увеличивающий на 10-15 % количество образуемого навоза [31]) ресурс только животноводческих отходов может на 70 % покрыть потребность сельского хозяйства в газоснабжении (а в Татарстане полностью), а в электро-снабжении даже перекрыть в несколько раз (табл. 3). Технический потенциал энергии, заключенный в биомассе животноводческих отходов, соответствует валовому, так как все эти отходы при современных технических возможностях можно переработать в энергию [48]. Рассчитанный нами энергопотенциал соответствует экономическому потенциалу – производимые отходы экономически оправдано перерабатывать в энергию (при существующих ценах на энергоносители, их транспортировку и потребление) централизованно, на животноводческих предприятиях и птицефабриках, где, во-первых, образуется колоссальное количество не востребуемых отходов, и, во-вторых, которые являются основными энергопотребляющими отраслями сельскохозяйственного производства (на них приходится до 68 % от общего потребления энергоносителей стационарными объектами в сельском хозяйстве России [49]). Также потенциал производства биогаза достаточно хорошо согласуется с данными, приводимыми в качестве экономического ресурса [48] – 8,75 (отходы животноводства и птицеводства) для России и 0,5 млн т у.т. для Татарстана.

Таблица 3 – Животноводческие отходы как сырье для биогазовых технологий

Показатель	Россия	Татарстан
Потребление природного топлива, млн т у.т.	1043,1 [46]	14,08 [47]
Потребление природного газа, млн т у.т.	543,7 [46]	13,68 [47]
Потребление природного газа в сельском хозяйстве, млн т у.т.	11,16 [46]	0,26 [47]
Количество животноводческих отходов, млн т	182,8*	12,39*
Количество растительных отходов, млн т	126,527 [48]	5,075 [48]
Потенциал производства биогаза из животноводческих отходов, млн т у.т.	7,922*	0,516*
Потреблено электроэнергии в сельском хозяйстве в 2011 г., млн кВт•ч	15500 [46]	607 [38]
Потенциал производства электроэнергии, млн кВт•ч	64451*	4194*
Потенциал производства тепла, млн ГДж / Гкал	<u>232,18*</u> 55,45	<u>15,11*</u> 3,61
Потребление органических удобрений, млн т	52,6 [37]	3,9433 [38]
Потенциал производства удобрений, млн т	164,52*	11,151*

*Расчетные данные (исключая хозяйства населения)

Следовательно, крупные сельхозпредприятия могут ориентироваться на собственную генерацию электрической и тепловой энергии. Согласно REN21 [50] в 2013 г. капитальные затраты на выработку энергии в биогазовых энергетических установках (производительностью 1-10 МВт) в среднем в мире составляют 500-6500 \$/кВт (при эффективности анаэробного сбраживания 25-40 % и коэффициенте использования 50-90 %), а эксплуатационные затраты – 6-19 центов/кВт•час.

Потенциал других крупнотоннажных органических отходов – осадков сточных вод, ТБО, отходов пищевой промышленности, мы рассмотрим в дальнейшем. Кроме того, представляет несомненный интерес и переработка отходов малых хозяйств, несмотря на их более низкую рентабельность. Здесь главный принцип – их неубыточность и непревышение трудозатрат над обычными способами обращения с образующимися отходами.

Производство удобрений

Развитие биогазовых технологий в России должно стимулироваться, помимо экологических преимуществ и доступности и дешевизны качественного энергоносителя, также постоянной потребностью в органических удобрениях, так как большая часть почв страны – малоурожайные подзолистые почвы [51].

Использование в качестве органического удобрения нативного навоза способствует загрязнению окружающей среды: районы расположения промышленных животноводческих и птицеводческих объектов, как правило, являются экологически неблагоприятными. Площадь полей, загрязненных органическими отходами, в том числе животноводства, птицеводства, в РФ превышает 2,4 млн га, из которых 20 % являются сильно загрязненными, 54 – загрязненными, 26 – слабо загрязненными [52].

После получения биогаза перебродившую массу, представляющую собой смесь жидких и твердых продуктов переработки биоотходов в метантенке – эффлюент [53, 54], можно в дальнейшем использовать в качестве экологически чистых органических удобрений. Это в первую очередь относится к растительным и животноводческим отходам. Из них на выходе из биогазовой установки получается масса без запаха, биобезопасная; считается, что внесение сырого предварительно необработанного навоза на поля должно быть вообще запрещено, а вноситься масса должна только после биогазовой установки [28]. Причем в таких перебродивших отходах повышается содержание биоэффективного азота, который не выделяется в атмосферу, как из чистого навоза, а остается в усваиваемой растительной форме. Высокая эффективность эффлюента объясняется [5, 28, 44]:

- однородностью механического состава (отсутствие комочков, невысокая вязкость);
- сохранением в полном объеме основных биогенных элементов питания – азота, фосфора и калия (NPK);

- большей доступностью в нем элементов питания;

- наличием разнообразных физиологически активных соединений класса ауксинов, гиббереллинов, цитокининов, ускоряющих синтез хлорофилла и ферментов, ответственных за наращивание зеленой массы растения;

- накоплением аминокислот и витаминов, стимулирующих микрофлору почвы и рост и развитие растений;

- отсутствием патогенной микрофлоры;

- присутствием в самих биоудобрениях собственных микроорганизмов, которые при попадании в почву перерабатывают корневые и пожнивные остатки, способствуя образованию гумуса и повышению плодородия;

- отсутствием адаптационного периода для эффективного воздействия: биоудобрение начинает действовать на растение сразу после внесения в почву.

При использовании эффлюента будет выполняться положение ГОСТ 53117 [55], что при производстве удобрений не должно образовываться технологических отходов, ведущих к загрязнению объектов окружающей среды.

Двадцатилетние исследования ведущих эколого-почвенных Центров России показали, что практическое применение органических удобрений на базе биогазовых технологий в ряде регионов страны значительно увеличивает урожайность разнообразных сельскохозяйственных культур (табл. 4), повышает устойчивость растений к неблагоприятным воздействиям окружающей среды [56]. Особенно биоудобрений, получаемых анаэробным сбраживанием, в силу их высокой активности является относительно невысокая норма внесения (до 1 т/га) [44] против 20-40 т/га чистого навоза [31], а в Татарстане даже 60-80 т/га [57]. Но применение в сельском хозяйстве даже этих переработанных, экологически более ценных, чем нативный навоз, отходов, также должно сопровождаться комплексной оценкой их эффективности и безопасности [58].

Таблица 4 - Эффективность применения различных удобрений [59]

Вариант опыта	Урожайность, % от контроля (без удобрений)		
	картофеля	капусты	кукурузы
Навоз штабельного хранения	111,1	145,0	115,8
Минеральные удобрения (NPK)	108,6	141,0	117,5
Перебродивший навоз	119,3	157,6	125,4

Как видно из табл. 2, потенциал производства удобрений при анаэробном сбраживании животноводческих отходов в три раза превышает количество внесенных на поля органических удобрений, как в России, так и в Татарстане. Использование растительных отходов еще больше увеличит это значение. Конечно, для производства удобрений подходят в основном только сельскохозяйственные отходы, не загрязненные посторонними примесями, потому что в противном случае при анаэробном

сбраживании других органических отходов, в частности ТБО, происходит выделение либо образование токсичных веществ, как и при разложении отходов на полигонах [60]. При этом будут загрязнены и биогаз, и перебродившая масса. Образующийся свалочный газ может содержать от 50 [61] до 500 [62] компонентов – простые и циклические алканы, алкены, ароматические и галогенсодержащие углеводы, спирты, простые и сложные эфиры и другие сложные органические вещества. В среднем в состав полигонного биогаза, кроме метана и углекислого газа входят: диоксид азота – 0,6-0,71 %; аммиак – 33-35 %; серный ангидрид – 0,04-0,06 %; дихлорфторметан – 0,02-0,03 %; декан – 0,02-0,03 %; дихлорэтан – 0,04-0,06 %; изопропилбензол – 0,01 %; толуол – 0,08-0,1 %; пропан – 0,06-0,08 %; углеводы – 0,09-1,2 %; хлор свободный – 0,01-0,06 %; хлорэтан – 0,04-0,06 % и др. [61].

Сама перебродившая масса, полученная из несельскохозяйственных отходов, ввиду разнообразия их компонентного состава будет содержать как все элементы, которые требуются для питания растений, так и быть потенциально опасной из-за возможного загрязнения почв и получаемой продукции тяжелыми металлами (группа металлов с атомной массой более 50 (Pb, Cd, Ni, Cr, Zn, Cu, Hg), которые при определенных концентрациях могут оказывать токсичное действие [63]). Некоторые микроэлементы, относящиеся к тяжелым металлам, такие как медь, хром, кобальт, цинк и никель, хоть и необходимы для нормального роста и развития растений, но в избыточном количестве в почве оказывают негативное воздействие [31]. Другие тяжелые металлы – ртуть, свинец, кадмий, также присутствующие, например, в бытовых отходах и осадках сточных вод, опасны даже при невысоких концентрациях в почве, так как, передаваясь по пищевым цепям, способны накапливаться в организме человека и животных. Причем их действие зависит от типа почвы – на песчаных и легкосуглинистых почвах они легко поглощаются растениями, а на тяжелосуглинистых, богатых гумусом, они менее доступны для растений, так как связываются органическим веществом с образованием различных продуктов – от нестойких соединений до нерастворимых в воде прочных комплексов. В кислые почвы такие удобрения без известкования вообще вносить не допускается [63, 64]: уменьшение pH увеличивает растворимость → доступность → токсичность каждой формы металла. Отсюда следует, что органическое вещество, независимо от своего местонахождения – в почве или эффлюенте, может оказывать положительное влияние на почвенные экосистемы, снижая количество мобильного металла: если почва загрязнена катионами, то внесение «чистого» органического вещества (например, анаэробно перебродившей массы навоза) очистит почву от тяжелых металлов, а если в богатую гумусом почву внести эффлюент от сельскохозяйственных отходов, то уже органика почвы свяжет экзогенные металлы. Согласно исследованиям Л.Д. Варламовой [58] систематическое внесение органических удобрений не приводило к загрязнению пахотного слоя почв тяжелыми металлами, но уве-

личивало их подвижность, хотя в работе Еськова говорится, наоборот, о снижении содержания подвижных форм тяжелых металлов: никеля, меди – на 60 %, цинка – на 90 % [5].

Следовательно, при внесении перебродившей массы отходов в качестве удобрения, нужно исходить не только из удобрительной ценности полезных компонентов. Для соблюдения обязательных требований к безопасности удобрений для жизни, здоровья населения, имущества, состояния окружающей среды [55] требуется учитывать в эффлюенте содержание опасных веществ, чтобы не было их сверхнормативного накопления в почве и они не попадали в культуры, идущие на корм животным и в пищу. Количество в удобрениях токсичных элементов (подвижных и валовых форм тяжелых металлов, мышьяка, бенз-а-пирена, полициклических углеводородов, полихлорированных бифенилов [54]), пестицидов, радионуклидов не должно превышать норм, установленных нормативными правовыми актами Российской Федерации и нормативными документами федеральных органов исполнительной власти [55, 64-66] и контролироваться аналитически, в том числе и экспресс-методами [67, 68].

Эту перебродившую массу, если она не отвечает всем требованиям, предъявляемым к "чистой почве" сельскохозяйственных угодий, селитебных и рекреационных территорий, можно применять для рекультивации деградированных, урбанизированных земель несельскохозяйственного назначения, свалок твердых бытовых отходов, под посадки древесно-кустарниковой растительности вдоль дорог, в питомниках лесных и декоративных культур, в парках, цветоводстве [63, 64]. Но даже и при использовании в несельскохозяйственных целях необходимы разрешение и контроль санитарной и агрохимической служб. Кроме того, не допускается применять такие удобрения в водоохраных зонах, на затопляемых и переувлажненных почвах и поверхностно в лесах, лесопарках, на сенокосах и пастбищах [63].

Литература

1. Найман С.М., Найман М.О., Тунакова Ю.А. Возможность применения биогазовых технологий для переработки органических отходов в Татарстане. Биоэнергетика // Вестник Казанского технологического университета, 2013, т. 16, № 14.
2. Найман С.М., Тунакова Ю.А., Найман М.О. Возможность применения биогазовых технологий для переработки органических отходов в Татарстане. Биоконверсионные процессы // Вестник Казанского технологического университета, 2013, т. 16, № 15.
3. Khanal S. K., Shrestha P., Rasmussen M., Lamsal B.P., Visvanathan C., Liu H., and Van Leeuwen J. Bioenergy and biofuel production from wastes/residues of emerging biofuel industries. // Water Environment Research, 2008, N 80 (10), p.1625–1647.
4. Майстренко А.Ю., Курис Ю.В., Ярмош В.В., Литвицков И.В., Ольшанский С.Н. Общая характеристика метаногенеза и обоснование технологических схем получения биогаза // Энергетика та електрифікація, 2009, №3, с. 52- 59.
5. Еськов А. И., Тарасов С.И. Биоэнергетика: сравнительная оценка свойств, эффективности применения навозного и сброженного навоза (помета) // Сотрудниче-

- ство для решения проблемы отходов. Матер. 5-й Междунар. конф. 2-3 апреля 2008 г., Харьков, Украина. – Харьков, 2008 г., с. 153-156.
6. Ковалев В.В., Унгурияну Д.В., Ковалева О.В. Теоретические и практические аспекты совершенствования процессов биогазовой технологии // Проблемы региональной энергетики, 2012, № 1, с. 102-114.
 7. Лосюк Ю.А., Орендаренко Г. В. Очистка биогаза до товарного продукта // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ - Энергетика: международный научно-технический журнал, 2012, №4. с. 70-74.
 8. ГОСТ Р 53790-2010 Нетрадиционные технологии. Энергетика биоотходов. Общие технические требования к биогазовым установкам. – М.: Стандартинформ, 2011. – 10 с.
 9. Шеина О. А., Сысоев В. А. Биохимия процесса производства биогаза как альтернативного источника энергии // Вестник ТГУ, 2009, т.14, вып.1, с. 73-76.
 10. Марченко Д.Б. Обоснование технологических и конструктивных параметров оборудования для получения органического удобрения и биогаза из птичьего помета: автореф. дис. канд. техн. наук. – Новосибирск: НГАУ, 2009. – 25 с.
 11. Martin D.J. A novel mathematical model of solid-state digestion // *Biotechnol. Lett.*, 2000, v. 22, No 1, p. 91-94.
 12. Holubar P., Zani L., Hager M., Froschl W., Radak Z, Braun R. Advanced controlling of anaerobic digestion by means of hierarchical neural networks // *Water Res.*, 2002, v. 36, No 10, p. 2582-2588.
 13. Von Sachs J., Meyer U., Rys P., Feitkenhauer H. New approach to control the methanogenic reactor of a two-phase anaerobic digestion system // *Water Res.*, 2003, v. 37, No 5, p. 973-982.
 14. Krastanov M.I., Dimitrova N.S. Stabilizing feedback of a nonlinear process involving uncertain data // *Bioprocess Biosyst. Eng.*, 2003, v. 25, No 4, p. 217-220.
 15. Budhijanto W., Purnomo C.W., Siregar N.C. Simplified Mathematical Model for Quantitative Analysis of Biogas Production Rate in a Continuous Digester // *Engineering Journal (EJ)*, 2012, Vol 16, No 5, p. 167-176.
 16. Subramani T., Nallathambi M. Mathematical Model for Commercial Production of Bio-Gas from Sewage Water And Kitchen Waste // *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*, July-Aug 2012, Vol.2, Issue.4, p. 1588-1595.
 17. Muha I., Zielonka S., Lemmer A., Schönberg M., Linke B., Grillo A., Wittum G. Do two-phase biogas plants separate anaerobic digestion phases? – A mathematical model for the distribution of anaerobic digestion phases among reactor stages // *Bioresource Technology*, March 2013, Vol. 132, p. 414–418.
 18. Лосюк Ю.А., Плескач А.В. Математическое моделирование при анализе очистки биогаза от диоксида углерода // Вестник БНТУ, 2009, №1, с. 66-70.
 19. Боровская Т.М., Северилов П.В. Моделирование и оптимизация систем производства биогаза // Наукові праці ВНТУ (Электронное научно-специализированное издание), 2009, № 2. - http://archive.nbuv.gov.ua/e-journals/vntu/2009-2/2009-2_ru.htm.
 20. Сидыганов Ю.Н., Онучин Е.М., Костромин Д.В., Медяков А.А. Результаты математического моделирования процессов теплового перемешивания при анаэробном сбраживании органических отходов // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета, 2011, № 24, с. 332-338.
 21. Сидыганов Ю.Н., Онучин Е.М., Костромин Д.В., Медяков А.А. Математическое моделирование процессов функционирования каталитического подогревателя при обогреве биореактора анаэробного сбраживания органических отходов // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета, 2011, №25, с. 231-237.
 22. Королев С.А., Майков Д.В. Идентификация математической модели и исследование различных режимов метаногенеза в мезофильной среде // Компьютерные исследования и моделирование, 2012, т. 4, № 1, с. 131–141.
 23. Amon T. Gasaubeute in landwirtschaftlichen Biogasanlagen / [Red. : Ursula Roth, Sebastian Wulf]. KTBL-Heft / Hrsg.: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. – V.: Darmstadt: KTBL, 2010. – 37 p.
 24. Прогноз развития энергетики мира и России до 2040 года (апрель 2013 г.). Аналитический отчет ИНЭИ РАН, АЦ 2013.– Сайт Института энергетической исследований РАН. – <http://www.eriras.ru>
 25. Finney C.D., Evans R.S. Anaerobic Digestion: The Rate-Limiting Process and the Nature of Inhibition // *Science*, 12 December 1975, Vol. 190, no. 4219, p. 1088-1089.
 26. Бобович Б.Б., Девяткин В.В. Переработка отходов производства и потребления. – М.: Интермет Инжиниринг, 2000. – 496 с.
 27. РД-АПК 1.10.15.02-08 Методические рекомендации по технологическому проектированию систем удаления и подготовки к использованию навоза и помета. – М.: Минсельхоз РФ, 2008. – 97 с.
 28. Foged H.L. Энергия из навоза скота. Положение, технологии и инновации в Дании. – Agro Business Park A/S, Niels Pedersens Alle 2, 8830 Tjele, 2012. – 40 с.
 29. Рекомендации по организации кормовой базы для мясного скота в Республике Татарстан. – Казань: ГНУ ТатНИИСХ, 2007. – 28 с.
 30. Смирнов П. М., Муравин Э.А. Агрехимия / ред. Ю. М. Лейкина. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Агропромиздат, 1991. – 288 с.
 31. Васильев В.А., Филиппова Н.В. Справочник по органическим удобрениям. – 2-е изд. – М.: Росагропромиздат, 1988. – 255 с.
 32. Ковалев, А.А. Эффективность производства биогаза на животноводческих фермах // Техника в сельском хозяйстве, 2001, №3, с. 30-33.
 33. Перспективы использования возобновляемых источников энергии в Европе и Азии // БИКИ, 2006, №48, с. 14-15.
 34. Аксенов В.В., Резепин А.И. Ресурсосберегающая технология переработки отходов АПК // Ползуновский вестник, 2011, №2/1, с.76-80.
 35. Методические указания по проведению годовых расчетов объема расхода кормов скоту и птице в хозяйствах всех категорий. Утв. Приказом Росстата от 05.10.2012 N 516 // СПС Консультант Плюс.
 36. Поголовье скота в Российской Федерации в 2012 году // М.: Росстат.
 37. Российский статистический ежегодник. 2012: Стат.сб./ М.: Росстат, 2012. – 786 с.
 38. Республика Татарстан, статистический ежегодник 2011. – Казань: Татарстанстат, 2012. – 521 с.
 39. Методологические положения по расчету топливно-энергетического баланса Российской Федерации в соответствии с международной практикой 1999. Утв. Постановлением Госкомстата РФ от 23.06.1999 N 46 // СПС Консультант Плюс.
 40. Приказ Росстата от 20.07.2009 N 146 "Об утверждении указаний по заполнению форм федерального статистического наблюдения N 11-ТЭР "Сведения об использовании топлива, теплоэнергии и электроэнергии на производстве отдельных видов продукции, работ (услуг)" и Приложения к форме N 11-ТЭР "Сведения об образовании и использовании вторичных энергетических ресурсов", N 4-ТЭР "Сведения об остатках, поступлении и

- расходе топлива и теплоэнергии, сборе и использовании отработанных нефтепродуктов" // Вопросы статистики, 2009, N 12.
41. Приказ Минэнерго РФ от 14.12.2011 N 600 "Об утверждении Порядка составления топливно-энергетических балансов субъектов Российской Федерации, муниципальных образований" // Бюллетень нормативных актов федеральных органов исполнительной власти, 16.04.2012, N 16.
 42. ГОСТ 31369-2008 Газ природный. Вычисление теплоты сгорания, плотности, относительной плотности и числа Воббе на основе компонентного состава // М.: Стандартинформ, 2009. – 54 с.
 43. Han J., Mintz M., Wang M. Waste-to-Wheel analysis of Anaerobic-Digestion-Based Renewable Natural Gas Pathways with the GREET Model. – U.S. Department of Energy Argonne National Laboratory, Argonne, LLC, 2011, No. ANL/ESD/11-6. – 40 p.
 44. Аминов А.Х., Царьков А.В. Переработка отходов животноводческих и птицеводческих комплексов и ферм в эффективные биологические удобрения и энергию. Рекомендации // ОАО БАШГИПРОАГРОПРОМ, г.Уфа, 2010. – <http://www.appri.ru/>.
 45. Долгов И.Ю. Энергетика и экология автономных систем энергоснабжения объектов животноводства и птицеводства на энергоносителях собственного производства // Альтернативная энергетика и экология – ISJAEE, 2012, № 09 (113), с. 152-165.
 46. Промышленность России. 2012: Стат.сб. – М.: Росстат, 2012. – 445 с.
 47. Долгосрочная целевая программа "Энергосбережение и повышение энергетической эффективности в Республике Татарстан на 2010-2015 годы и на перспективу до 2020 года". Утв. постановлением КМ РТ от 29.07.2010 г. N 604 (ред. от 09.04.2013) // Сб. постановлений и распоряжений Кабинета Министров Республики Татарстан и нормативных актов республиканских органов исполнительной власти", 27.10.2010, N 40, ст. 1798; 09.04.2013, N 31, ст. 0984.
 48. Справочник по ресурсам возобновляемых источников энергии России и местным видам топлива /показатели по территориям / Под ред. Безруких П.П. // М.: ИАЦ Энергия, 2007. – 272 с.
 49. Долгов И.Ю., Тихомиров А.В., Харченко В.В. Энергопотребление и энергосбережение в сельскохозяйственном секторе Российской Федерации // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2012. № 2. С. 16-19.
 50. Renewables 2013. Global Status Report. – Paris: REN21. – 178 p.
 51. Панцхава Е.С., Шипилов М.М., Пауков А.П., Ковалев Н.Д. Биогаз – высокорентабельное топливо для всех регионов России // Новости теплоснабжения, 2008, № 1 (89), с.20-23.
 52. Проблемы деградации и восстановления продуктивности земель сельскохозяйственного назначения в России/ Под редакцией академиков Россельхозакадемии А.В. Гордеева, Г.А. Романенко. – М.: Росинформагротех, 2008. – 67 с.
 53. ГОСТ Р 52808-2007 Нетрадиционные технологии. Энергетика биоотходов. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2008. – 10 с.
 54. ГОСТ Р 53042-2008 Удобрения органические. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2009. – 11 с.
 55. ГОСТ Р 53117-2008 Удобрения органические на основе отходов животноводства. – М.: Стандартинформ, 2009. – 12 с.
 56. Биоэнергетика России в XXI веке. – М.: РЭА: ФГБУ РЭА МИНЭНЕРГО РФ 2012. – 37 с.
 57. Дегтярева И.А., Алиев Ш.А., Гизатуллин Р.Х., Хидиятуллина А.Я., Биккинина Л.М.-Х., Дмитричева Д.С. Повышение эффективности применения органических и минеральных удобрений под сельскохозяйственные культуры на выщелоченном черноземе Республики Татарстан // Современные проблемы науки и образования, 2012, № 1; с. 206.
 58. Варламова Л.Д. Эколого-агрехимическая оценка и оптимизация применения в качестве удобрений органосодержащих отходов производства: автореф. дис. докт. сельскохоз. наук. – Саранск: Морд. гос. ун-т имени Н.П. Огарева, 2007. – 42 с.
 59. Листов П. Н., Прищеп Л. Г., Кучер П. А. Эффективное использование навоза в сельском хозяйстве // Механизация и электрификация соц. сел. хоз-ва, 1976, № 1, с. 21-22.
 60. Найман С.М. Отходы и почвенный мониторинг. // Ж. экологии и промышленной безопасности, 2007, №2, с.62-64.
 61. Краснянский М.Е., Бельгасем Е. Экологические угрозы свалок ТБО // Спец. информ. бюлл. "Твердые бытовые отходы", 2005, № 5, с. 12.
 62. Mintz M., Han J., Wang M., Saricks C. Well-to-Wheels Analysis of Landfill Gas-Based Pathways and Their Addition to the GREET Model. – U.S. Department of Energy Argonne National Laboratory, Argonne, LLC, 2010, No. ANL/ESD/10-3. – 65 p.
 63. ГОСТ Р 17.4.3.07-2001 Охрана природы. Почвы. Требования к свойствам осадков сточных вод при использовании их в качестве удобрений. – М.: Стандартинформ, 2008. – 5 с.
 64. ГОСТ Р 54651-2011 Удобрения органические на основе осадков сточных вод. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2012. – 15 с.
 65. ГН 2.1.7.2041-06 Предельно-допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве (утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 19 января 2006 г.) // Бюллетень нормативных актов федеральных органов исполнительной власти № 10 2006 Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора № 2006.
 66. ГН 2.1.7.2511-09 Ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве (утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 18 мая 2009 г.) // Бюллетень нормативных актов федеральных органов исполнительной власти", N 28, 13.07.2009.
 67. Гоголь Э.В., Гумерова Г.И., Тунакова Ю.А., Исхакова М.Н., Богданова Д.А. Экспресс-анализ в эохимии // Вестник Казанского технологического университета, 2013, т. 16, № 1, с. 163-166.
 68. Егорова О.С., Салимгареева Л.Ш., Федорова И.А., Гоголь Э.В., Тунакова Ю.А. Разработка методики для определения анионно-катионного состава сточных вод комбинированным способом с использованием полимерсодержащих тест-полосок и фотометрического датчика // Вестник Казанского технологического университета, 2013, т. 16, № 1, с. 167-169.

© С. М. Найман – канд. биол. наук, проф. каф. общей химии и экологии КНИТУ им. А.Н. Туполева-КАИ; Ю. А. Тунакова – д-р хим. наук, проф. каф. технологии пластических масс КНИТУ, juliaprof@mail.ru.