



ПРОИЗВОДСТВО ВОДОРОДА ПРИ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ УТИЛИЗАЦИИ ОТХОДОВ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

Ю.В. Караева

Институт энергетики и перспективных технологий – структурное подразделение
Федерального исследовательского центра «Казанский научный центр Российской академии наук»
420111, Казань, ул. Лобачевского, 2/31, а/я 190
тел. (843) 273-92-31, e-mail: julieenergy@list.ru

doi: 10.15518/isjaee.2020.09.003

Заключение совета рецензентов: 23.08.20

Заключение совета экспертов: 23.08.20

Принято к публикации: 29.08.20



В агропромышленном комплексе существует проблема утилизации большого количества органических отходов. Наибольшая часть отходов образуется на животноводческих фермах (56%) и в растениеводстве (35,6%). Централизованные биогазовые установки являются хорошим решением для эффективной переработки сельскохозяйственных отходов и получения биотоплива. Для Республики Татарстан проведен анализ возможностей утилизации коровьего навоза и сухой биомассы амаранта с последующим производством водорода. Предложена схема размещения пяти крупных предприятий, утилизирующих отходы 7-10 районов, входящих в регион. Описана схема паровой каталитической конверсии биогаза. Предлагаемая схема производства водорода включает в себя: сбор растительных отходов и навоза животноводческих комплексов для централизованной утилизации (оптимальная смесь сухой биомассы листьев *Amaranthus retroflexus L.* и коровьего навоза по органическому сухому веществу составляет 1:1,5); приготовление смеси и ультразвуковая обработка при частоте 22 кГц и интенсивности воздействия 10 Вт/см²; процесс анаэробного сбраживания в мезофильном режиме при температуре 310 К, время гидравлического удержания 12 сут.; подача компрессором образующегося биогаза в газгольдер для промежуточного хранения; очистка биогаза от углекислого газа, сероводорода и других примесей в скруббере; паровой риформинг метана: биометан компрессором сжимается до давления 15 атм., затем подается в установку риформинга, подогревается, смешивается с паром в соотношении $H_2O/CH_4=2,5$ и подвергается конверсии при температуре 1073 К и давлении 1 атм., перед выходом полученный газ охлаждается до 573 К; каталитический реактор для осуществления реакции конверсии водяного пара, в котором смесь монооксида углерода с паром подвергается конверсии, продуктами являются водород и диоксид углерода; очистка полученного водорода до чистоты 99,99% об. в системе короткоциклового адсорбции; подача водорода потребителю. Ежегодно можно утилизировать 4,4 млн. т. отходов, а также производить 107 341 кг/сут водорода с чистотой 99,99% об.

Ключевые слова: отходы агропромышленного комплекса, биогаз, биомасса, водород, централизованная утилизация.

HYDROGEN PRODUCTION AT CENTRALIZED UTILIZATION OF AGRICULTURAL WASTE

Karaeva J.V.

Institute of Power Engineering and Advanced Technologies,
FRC Kazan Scientific Center, Russian Academy of Sciences,
420111, Kazan, st. Lobachevsky, 2/31, PO Box 190
Tel. (843) 273-92-31, e-mail: julieenergy@list.ru

doi: 10.15518/isjaee.2020.09.003



There is a problem of utilization a large amount of organic waste in the agro-industrial complex. Most of the waste is generated on livestock farms (56%) and crop production (35.6%). Centralized biogas plants are a good solution for efficient processing of agricultural waste and biofuel production. An analysis of the possibilities of cow dung utilizing and dry biomass of amaranth with the subsequent hydrogen production was carried out for Tatarstan Republic. The diagram of five large facilities utilizing waste from 7-10 districts included in the region is proposed. The diagram of steam catalytic conversion of biogas is described. The proposed hydrogen production scheme includes: collection of plant waste and manure of livestock complexes for centralized recycling (the optimal mixture of dry biomass of *Amaranthus retroflexus L.* leaves and cow manure for organic dry matter is 1:1.5); mixture preparation and ultrasonic treatment at a frequency of 22 kHz and an exposure intensity of 10 W/cm²; anaerobic digestion in the mesophilic mode at a temperature of 310 K, the hydraulic retention time is 12 days; the compressor supplying the resulting biogas into the gasholder for intermediate storage; purification of biogas from carbon dioxide, hydrogen sulfide and other impurities in the scrubber; steam methane reforming: the biomethane is compressed by a compressor to a pressure of 15 atm., then fed to the reformer, heated, mixed with steam in the ratio H₂O/CH₄=2.5 and subjected to conversion at a temperature of 1073 K and a pressure of 1 atm., before exiting, the resulting gas is cooled to 573 K; the catalytic reactor for carrying out a water vapor conversion reaction in which a mixture of carbon monoxide and steam is converted, the products are hydrogen and carbon dioxide; purification of the obtained hydrogen to a purity of 99.99% vol. in the short-cycle adsorption system; hydrogen supply to the consumer. It is possible to utilize of 4.4 million tons of waste annually, and also to produce 107341 kg / day of hydrogen with a purity of 99.99% by volume.

Keywords: agricultural waste, biogas, biomass, hydrogen, centralized utilization.



Юлия Викторовна
Караева
Julia Viktorovna
Karaeva

Сведения об авторе: кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории энергетических систем и технологий Института энергетики и перспективных технологий ФИЦ КазНЦ РАН.

Образование: Казанский государственный энергетический университет (2005).

Область научных интересов: энергоресурсосбережение и энергоэффективные технологии переработки органических отходов, исследования в области возобновляемых источников энергии.

Публикации: 90 научных работ, в том числе 13 статей в журналах, входящих в базу данных Web of Science и SCOPUS, 2 монографии, 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Information about the author: Ph.D., Senior Researcher, Laboratory of Energy Systems and Technologies, Institute of Power Engineering and Advanced Technologies, FRC Kazan Scientific Center, Russian Academy of Sciences.

Education: Kazan State Power Engineering University (2005).

Research interests: energy-resource saving and energy-efficient technologies for processing organic waste, research in the field of renewable energy sources.

Publications: 90 scientific works, including 13 articles in journals included in the Web of Science and SCOPUS databases, 2 monographs, 3 certificates of state registration of computer programs.

Список сокращений и обозначений

СВ	сухое вещество
оСВ	органическое сухое вещество
ХПК	химическое потребление кислорода
КРС	крупный рогатый скот
КЦА	короткоцикловая адсорбция
<i>P</i>	потенциальный выход биогаза (мл/г оСВ)
<i>R_{max}</i>	максимальная скорость образования биогаза(мл/г оСВ ·сут)
<i>P</i>	давление (мм рт. ст.)
<i>T</i>	температура (К)

Введение

В агропромышленном комплексе существует проблема переработки большого количества органических отходов, накапливающихся около животно-

водческих ферм. Для малых сельскохозяйственных организаций экономически нецелесообразно внедрение инновационных технологий, имеющий длительный срок окупаемости. Новые технологические решения к тому же должны субсидироваться государ-

ством, это дополнительно снижает инвестиционную привлекательность таких проектов. Централизованные установки являются хорошим решением для эффективной утилизации большого количества органических отходов [1, 2, 3].

В статье [4] отмечается, что на централизованных биогазовых установках проще осуществлять совместное сбраживание отходов животноводства и растениеводства. Коферментация позволяет улучшить протекание процесса метаногенеза и увеличить выход биогаза [5]. Кроме того, использование сухой биомассы растений гарантирует постоянное наличие сырья в процессе получения биогаза, поскольку они могут храниться в течение года.

Амарант является одной из наиболее перспективных зерновых культур в мире [6], поэтому его доступность в качестве субстрата, в дальнейшем смешиваемого с навозом, является осуществимой. В процессе его культивирования остаются отходы (например, стебли), которые также можно использовать в анаэробном сбраживании. Следует отметить, что мало изучено использование сорных растений семейства Амарантовые в процессе производства биогаза. Централизованная переработка отходов животноводства и растениеводства позволяет вырабатывать достаточное количество биогаза для дальнейшего получения водорода.

Обзор возможностей использования возобновляемых источников энергии для производства водорода представлен в [7, 8], в том числе и биогаза [9]. В исследовании [10] отмечается, что паровой риформинг биогаза является одним из наиболее дешевых и перспективных способов получения водорода. Проведен технико-экономический анализ новой технологии с использованием палладиевой мембраны в реакторе риформинга для одновременного производства и разделения водорода.

В исследовании [11] рассмотрена утилизация пищевых отходов в крупных городах юго-западной Нигерии с целью получения водорода методом парового риформинга. Проведена оценка возможностей

дальнейшей выработки электроэнергии и применения топливных элементов.

Чистый водород из биогаза можно также получить методом сухого риформинга метана в реакторе с псевдоожиженным слоем [12]. Когенерационная система для производства не только водорода, но и энергии возможна путем интеграции системы биогазового парового риформинга и органического цикла Ренкина [13].

Детальная термодинамическая оценка парового риформинга биогаза, в котором содержание метана варьировалось от 45% до 80%, проводилась в широком интервале температур и при различных соотношениях пара к метану [14]. Оптимальные рабочие характеристики для производства водорода с чистотой выше 99%: давление 1 атм., температура 1073 К и соотношение пара к метану, равное 1,6.

Децентрализованное производство водорода экономически нецелесообразно из-за высоких затрат, которые варьируются от 5,5 до 9 долл. США на 1 кг водорода [15]. Таким образом, важно создавать более масштабное производство, позволяющее увеличить выработку продукции и снизить затраты [11].

Целью данного исследования является оценка перспектив централизованной утилизации коровьего навоза и сухой биомассы амаранта для получения водорода. На основе экспериментальных исследований определены способы увеличения выхода из органических отходов животноводства. На примере Республики Татарстан (Россия) проведен анализ возможностей производства и применения водорода.

1. Материалы и методы

Характеристики субстратов

Отходы животноводства (коровий навоз) и биомасса амарантов (*Amaranthus retroflexus* L., *Amaranthus cruentus* L.) были собраны в Республике Татарстан (Россия). Основные параметры, характеризующие использованные субстраты, представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Характеристики отходов и инокулята

Table 1.

Waste and inoculum characteristics

	Коровий навоз	<i>Amaranthus cruentus</i> L. листья (стебли)	<i>Amaranthus retroflexus</i> L. листья (стебли)	Инокулят
C, %	27,13	32,33 (35,19)	32,61 (34,89)	24,68
N, %	1,64	2,91 (2,36)	4,22 (2,34)	1,23
C:N	16,5	7,8 (14,9)	11,1 (14,9)	20,1
CB, %	19,12	92,55 (92,9)	93,06 (92,2)	9,86
oCB, %	89,71	75,97 (87,49)	74,99 (91,27)	90,14
ХПК, мг/л	26300	-	-	-
pH	6,93	5,37 (5,24)	5,48 (5,33)	7,09

Навоз молочной коровы был собран в фермерском хозяйстве и хранился в течение двух дней в холодильнике при температуре 277 К.

Amaranthus retroflexus L. - однолетнее сорное растение высотой до 1 м. Листья имеют ширину до 0,06 м и длину до 0,14 м. *Amaranthus cruentus L.* – культурное растение, высота которого может достигать 2 м. Листья крупные, длина которых может достигать 0,18 м, а ширина 0,12 м. Растения выращены на поле с культурными растениями (55°63' с.ш., 48°73' в.д., затем высушены в сушильном шкафу (при температуре 313 К) и направлены в измельчитель для получения биомассы с размером частиц ме-

нее 5 мм. В экспериментах использовались стебли и листья растений.

Инокулят был взят из лабораторной биогазовой установки, работающей в мезофильном режиме.

Состав всех исследованных субстратов представлен в таблице 2. Таким образом, эксперимент №1 (контроль), №2 (смесь стеблей, листьев *Amaranthus retroflexus L.* и навоза), №3 (смесь стеблей, листьев *Amaranthus cruentus L.* и навоза), №4 (смесь стеблей *Amaranthus retroflexus L.* и навоза), №5 (смесь стеблей *Amaranthus cruentus L.* и навоза), №6, №7 и №8 (смесь листьев *Amaranthus retroflexus L.* и навоза, соответственно, по массе 1:16, 1:6 и 1:3).

Таблица 2.

Состав субстратов для анаэробного сбраживания

Table 2.

Substrate composition for anaerobic digestion

Состав субстратов	Пропорции по массе	Пропорции по оСВ
Стебли амаранта: листья амаранта: навоз	1: 4: 120	1: 5: 16
Стебли амаранта: навоз	1:40	1:6
Листья амаранта*: навоз	1:16	1:4
Листья амаранта*: навоз	1:6	1:1,5
Листья амаранта*: навоз	1:3	1:1

*только *Amaranthus retroflexus L.*

Аналитические методы

Для определения количества углерода и азота в исследуемых органических отходах использовался анализатор серии EA 3000 («EuroVector», Италия). Содержание сухого вещества (СВ), органического сухого вещества (оСВ), химическое потребление кислорода (ХПК), рН определяли стандартными методами (ГОСТ 26713-85, ГОСТ 27980-85, ГОСТ 27979-88, ГОСТ 31859-2012, ГОСТ Р 56881-2016). Хроматографический анализ состава образующегося биогаза проводился на газовом хроматографе Хром 5 («Лабораторные приборы», Чехия). Исследования макро- и микроэлементов проводились на энергодисперсионном флуоресцентном рентгеновском спектрометре EDX-800HS2 («Shimadzu», Япония) полуколичественным методом.

Методика проведения эксперимента

Проведение экспериментов осуществлялось в соответствии с международными рекомендациями [16]. Для процесса анаэробного сбраживания использовалась лабораторная установка, работающая в мезофильном режиме (310 К). Во всех экспериментах использовалась дистиллированная вода. Объем одного метантенка 500 мл. Количество образующегося газа оценивали объемным методом. Ежедневный выход биогаза был нормализован (сухой газ, P=760 мм рт. ст., T=273 К) в соответствии с VDI 4630. Со-

став биогаза анализировали раз в неделю. Эффлюент, образовавшийся после анаэробного сбраживания, был высушен при температуре 378 К. Все эксперименты проводили в трех повторах. Полученные данные обрабатывались с применением дисперсионного анализа.

2. Результаты и обсуждение

Экспериментальные исследования коферментации

В результате экспериментальных исследований определен потенциальный выход биогаза при коферментации коровьего навоза, сухой биомассы *Amaranthus retroflexus L.* и *Amaranthus cruentus L.* (рис. 1). Полученные результаты подтверждают, что не только культурное растение *Amaranthus cruentus L.* является стимулятором метаногенеза, но и сорное растение *Amaranthus retroflexus L.* Этот результат открывает возможности для применения нестандартных субстратов и создания новых способов получения биогаза. Наибольший потенциальный выход биогаза наблюдался в эксперименте №2, где использовалась сухая биомасса *Amaranthus retroflexus L.* Он на 26,7% выше по сравнению с контролем. Во всех экспериментах с использованием амарантов наблюдалось увеличение выхода биогаза.



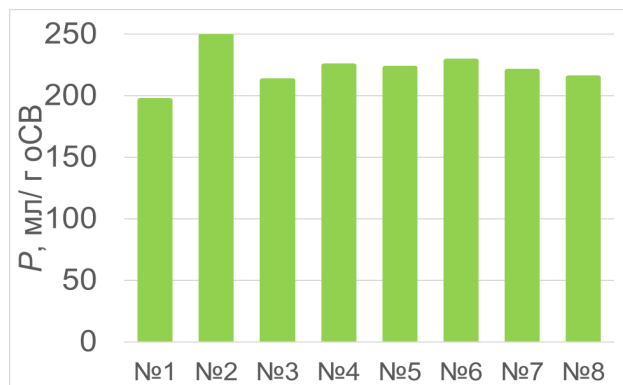


Рис. 1. Потенциальный выход биогаза (P) при проведении экспериментов
Fig. 1. Potential biogas yield (P) during conducting experiments

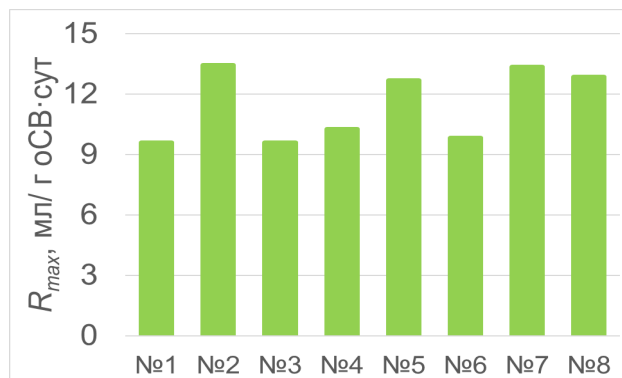


Рис. 2. Максимальная скорость образования биогаза (R_{max})
Fig. 2. Maximum formation rate of biogas (R_{max})

Стебли растений, как правило, не используются в биогазовых установках из-за высокого содержания целлюлозы и лигнина, практически не разлагающихся при анаэробном сбраживании. Первоначально предполагалось, что стебли будут эффективным средством для иммобилизации микроорганизмов в процессе сбраживания. Однако результаты экспериментов показывают, что в них также содержатся вещества, полезные для метаногенеза. При использовании в качестве добавки биомассы стеблей амарантов (эксперименты №4 и №5) увеличение потенциального выхода биогаза возможно на 13,4%.

Рассмотрим изменение максимальной скорости образования биогаза после использования сухой биомассы амарантов (рис. 2).

Наиболее высокий показатель наблюдается в эксперименте №2, он равен 13,44 мл/г оСВ·сут. На 32,2% выше, чем в контроле, значение R_{max} в эксперименте №5. Таким образом, при использовании только стеблей растений в биогазовых установках можно отдать предпочтение *Amaranthus cruentus* L. Хотя по потенциальному выходу биогаза оба амаранта сопоставимы (рис. 1), но при использовании биомассы *Amaranthus retroflexus* L. нет увеличения скорости образования газа (рис. 2).

Особое внимание стоит уделить экспериментам №6, №7 и №8, в которых при увеличении доли сухой биомассы *Amaranthus retroflexus* L. в сбраживаемой смеси потенциальный выход биогаза уменьшается (рис. 1), но скорость протекания процесса

увеличивается (рис. 2). Следует отметить, что в эксперименте №8 была длительная лаг-фаза. Таким образом, рекомендуемая для биогазовой установки смесь сухой биомассы листьев *Amaranthus retroflexus* L. и коровьего навоза по оСВ составляет 1: 1,5.

Анализ качественного состава биогаза показал, что при моносбраживании коровьего навоза содержание метана составляло 52-55% (эксперимент №1), при коферментации с использованием сухой биомассы *Amaranthus retroflexus* L. от 63-65%, а при использовании *Amaranthus cruentus* L. от 58-60%.

Эффлюент, образующийся после получения биогаза, составляет 97% по массовому балансу. Соответственно, необходимо оценить возможность его использования в качестве органического удобрения. Рассмотрим элементный состав эффлюента, полученного в эксперименте №2, который характеризуется самыми высокими показателями скорости образования биогаза и потенциального выхода газа (таблица 3). А также дополнительно проанализируем смесь эффлюента с растительными остатками биомассы *Amaranthus retroflexus* L.

Содержание цинка и меди в эффлюенте превышает предельно допустимые массовые концентрации, рекомендованные ГОСТ Р 53117-2008. Следовательно, он не может быть использован в качестве удобрения в чистом виде. Таким образом, для применения эффлюента необходимо его смешивать с другими компонентами, характеризующимися «бедным» минеральным составом.

Таблица 3.

Содержание макро- и микроэлементов в образцах эффлюента

Table 3.

Content of macro- and microelements in effluent samples

Название	Эффлюент	Эффлюент и растительные отходы (1: 1 по массе)
Кальций, %	42,229	46,141
Кремний, %	18,194	12,009
Калий, %	17,302	24,458
Хлор, %	4,508	3,385

Фосфор, %	4,398	3,478
Магний, %	3,660	3,720
Железо, %	3,568	2,317
Сера	2,766	2,675
Алюминий	1,311	1,041
Титан	0,427	0,291
Марганец	0,268	0,230
Цинк	0,143	0,091
Стронций	0,100	0,057
Медь	0,059	0,03
Цирконий, %	0,037	-
Бром, %	0,031	0,053

Оценка централизованной утилизации сельскохозяйственных отходов

Рассмотрена возможность централизованной утилизации отходов ферм крупного рогатого скота (КРС) и сухой биомассы *Amaranthus retroflexus L.* на примере Республики Татарстан. Сельское хозяйство этого региона во многом опирается на скотоводство. В феврале 2020 года поголовье КРС в регионе включало 707 800 животных (второе место в России), в том числе 235 300 коров (третье место в России). Республика входит в десятку лидеров в рейтинге регионов-производителей говядины. По производ-

ству молока в настоящее время регион занимает первое место в России. В регионе находится 11 крупнейших в Европе мега ферм. Следует отметить, что в ближайшие два года планируется ввести в эксплуатацию еще 24 молочных комплекса на 17 000 коров.

Согласно статистическим данным, фактическое количество образующихся отходов составляет 4,4 млн. т в год. Объем имеющихся навозохранилищ вмещает лишь 17% образующегося навоза. На рис. 3 представлена рекомендуемая схема размещения централизованных предприятий, утилизирующих отходы агропромышленного комплекса. Предполагается строительство пяти крупных предприятий.



Рис. 3. Установки производства водорода при централизованной утилизации сельскохозяйственных отходов

Fig. 3. Hydrogen production facilities with a centralized utilization of agricultural waste

Каждое предприятие позволит утилизировать сельскохозяйственные отходы 7-10 районов, входящих в регион. Предлагаемая схема производства водорода (рис. 4) включает в себя:

- сбор растительных отходов и навоза животноводческих комплексов для централизованной утилизации;

- приготовление смеси и ультразвуковая обработка при частоте 22 кГц и интенсивности воздействия 10 Вт/см² с целью гомогенизации и предварительного подогрева сырья для переработки;

- процесс анаэробного сбраживания в мезофильном режиме при температуре 310 К, время гидравлического удержания 12 сут.;



- подача компрессором образующегося биогаза в газгольдер для промежуточного хранения;

- очистка биогаза от углекислого газа, сероводорода и других примесей в скруббере;

- паровой риформинг метана: биометан компрессором сжимается до давления 15 атм., затем подается в установку риформинга, подогревается, смешивается с паром в соотношении $H_2O/CH_4=2,5$ и подвергается конверсии при температуре 1073 К и давлении 1 атм., перед выходом полученный газ охлаждается до 573 К;

- каталитический реактор для осуществления реакции конверсии водяного пара, в котором смесь монооксида углерода с паром подвергается конверсии, продуктами являются водород и диоксид углерода;

- очистка полученного водорода до чистоты 99,99% об. в системе короткоциклового адсорбции (КЦА);

- подача водорода потребителю.

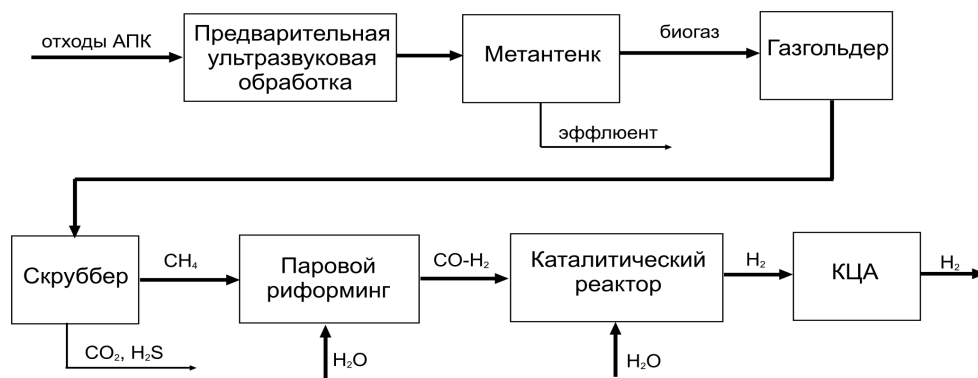


Рис. 4. Схема паровой каталитической конверсии биогаза
Fig. 4. Diagram of steam catalytic conversion of biogas

Оценка потенциала получения водорода проведена, исходя из данных, представленных в работе [17, 18]. В таблице 4 представлены данные по производительности централизованных установок. Предприятие I будет самым большим, ежегодное количество

поступающего навоза с ферм составит 1,34 млн. тонн. При утилизации этих отходов на установке I можно производить ежедневно 3,5 тыс. тонн добавок к органическим удобрениям, а также 32,5 тонны водорода.

Таблица 4.
Основные продукты, получаемые при централизованной утилизации органических отходов

The main products obtained from the centralized utilization of organic waste

Table 4.

Название установки	Отходы, тыс. т/год	Эффлюент, т/сут	Выход метана, м ³ /сут	Производство водорода, кг/сут
I	1399,7	3549	111131	32545
II	776,3	1968	61638	18051
III	814,8	2066	64691	18945
IV	953,5	2418	75707	22171
V	672,1	1704	53366	15629
Всего	4616	11705	366533	107341

Следует отметить, что на централизованных крупных предприятиях возможна утилизация отходов свиноводческих и птицеводческих комплексов, а это еще, как минимум, 1,1 млн. т в год отходов.

Математическая модель парового риформинга

Для описания процесса парового риформинга метана используется математическая модель, включа-

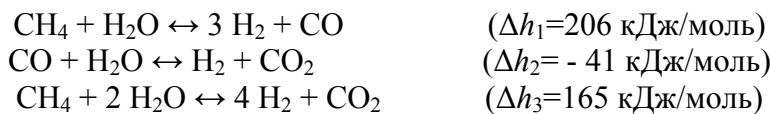
ющая уравнения сохранения массы, импульса, энергии и количества частиц. Она имеет следующий вид [19, 20].

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0,$$

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau - \frac{\mu}{K} \vec{u},$$

$$\nabla \cdot (\rho c_p \bar{u} T) = \nabla \cdot (k^{eff} \nabla T) - \sum \frac{h_i^0}{M_i} r_i,$$

$$\nabla \cdot (\rho \bar{u} m_i) = \nabla \cdot (\rho D_i^{eff} \nabla m_i) + M_i \sum r_i$$



Кинетические параметры химических реакций представлены в работах [19, 21].

При построении математической модели парового риформинга метана приняты следующие допущения:

- моделируемая среда является многокомпонентной;
- движение среды ламинарное, стационарное, осесимметричное;
- температура внутри реактора 1073 К, давление 1 атм.;
- диффузионный массоперенос происходит по длине всего реактора.

Для численной реализации математической модели гидродинамики и процессов теплопереноса при паровом риформинге метана будет использован программный пакет *COMSOL Multiphysics 3.5a*. Он позволяет решать системы нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных методом конечных элементов. Таким образом, использование современного программного обеспечения позволит изучать конструктивно-технологические особенности установки до начала строительства, таким образом, позволяя проектировать и предлагать собственные инновационные решения.

Перспективные пути использования водорода в Республике Татарстан

Объем потребления природного газа в Республике Татарстан составляет около 17 млрд. м³ в год. Производство аммиака, добыча сверх вязкой нефти и комплексы глубокой переработки тяжелых остатков являются крупными потребителями газа. Развитая газовая промышленность способствует внедрению водородной энергетики, т.к. природный газ является основным источником водорода; существующая система газопроводов может стать основой системы транспорта водорода.

Таким образом, одним из перспективных путей использования водорода является его добавление в региональные распределительные сети природного газа. Кроме того, уже известно о 25 подобных реализованных проектах в мире [22]. Однако возникают технические сложности при впрыске водорода, в настоящее время точно не определена допустимая концентрация водорода в смеси. В литературе данные варьируются от 0,5 % до 25%. Кроме того, существует проблема водородного охрупчивания газопроводов.

При проведении численных исследований учитываются только три основные химические реакции, описывающие процесс паровой конверсии метана [20]:

Более 50% производимого в мире водорода, используется в производстве аммиака [23]. В регионе с 2016 года успешно работает предприятие АО «Аммоний», имеющее собственное производство водорода на базе парового каталитического риформинга и паро-воздушного риформинга с отделением очистки и подготовки синтез-газа, а также синтезом аммиака под давлением 128,7-190 атм. по циркуляционной схеме. В связи с высоким спросом на продукцию, в настоящее время рассматривается возможность строительства второго завода для производства аммиака и минеральных удобрений. Таким образом, новое производство будет крупным потребителем водорода.

Нефтеперерабатывающие заводы Республики Татарстан также заинтересованы в производстве водорода. На 30 предприятиях используется водород, который производят организации ТАНЕКО и ТАИФ-НК. В настоящее время уже начаты пусконаладочные работы для строительства новой установки (ТАНЕКО), расчетная мощность которой по продуктивному водороду чистотой 99,9 % об. будет составлять 30000 м³/ч или 22 тысяч тонн в год. Полученный водород необходим для обеспечения установки гидроочистки тяжелого газойля коксования. Так как установки производства водорода расположены в разных районах, то предлагается создать кольцевую схему газопроводов с водородом.

Заключение

Рассмотрена возможность централизованной утилизации отходов животноводческих ферм с использованием сухой биомассы амаранта на примере Республики Татарстан. Оптимальная смесь сухой биомассы листьев *Amaranthus retroflexus L.* и коровьего навоза по оСВ составляет 1: 1,5. Ее использование позволит получить на 72% больше биогаза.

Предложена схема производства водорода с одновременной утилизацией сельскохозяйственных отходов 7-10 районов, входящих в регион. Рекомендуется строительство пяти крупных предприятий, это позволит производить 107 341 кг/сут водорода с чистотой 99,99% об. Это позволит также ежегодно переработать 4,4 млн. т отходов агропромышленного комплекса.

В Республике Татарстан развитая система газоснабжения, поэтому водород может использоваться для добавления в региональную систему трубопро-



водов природного газа. Кроме того, в регионе есть крупные потребители водорода, и имеется спрос на эту продукцию.

Список литературы

1. Yalcinkaya S. A spatial modeling approach for siting, sizing and economic assessment of centralized biogas plants in organic waste management // *Journal of Cleaner Production*. Vol. 255, **2020**, 120040 <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120040>
2. Lavergne C., Bovio-Winkler P., Etchebehere C., García-Gen S. Towards centralized biogas plants: Co-digestion of sewage sludge and pig manure maintains process performance and active microbiome diversity // *Bioresource Technology*. Vol. 297, **2020**, 122442 <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122442>
3. Kucuker, M.A., Demirel, B. & Onay, T.T. Enhanced biogas production from chicken manure via enzymatic pretreatment. *J Mater Cycles Waste Manag*, **2020**. <https://doi.org/10.1007/s10163-020-01039-w>
4. Velásquez Piñas J.A., Venturini O.J., Silva Lora E.E., del Olmo O.A., Calle Roalcaba O.D. An economic holistic feasibility assessment of centralized and decentralized biogas plants with mono-digestion and co-digestion systems// *Renewable Energy*. Volume 139, **2019**, Pages 40-51 <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.02.053>
5. Hagos K., Zong J., Li D., Liu C., Lu X. **2017**. Anaerobic co-digestion process for biogas production: Progress, challenges and perspectives // *Renewable and Sustainable Energy Reviews* vol. 76(C), pages 1485-1496. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.184>
6. Joshi, D.C., Sood, S., Hosahatti, R. et al. From zero to hero: the past, present and future of grain amaranth breeding // *Theor Appl Genet* **2018**, 131, 1807–1823. <https://doi.org/10.1007/s00122-018-3138-y>
7. Hosseini S.E., Wahid M.A. Hydrogen production from renewable and sustainable energy resources: Promising green energy carrier for clean development // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Volume 57, **2016**, Pages 850-866 <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.112>
8. Nikolaidis P., Poullikkas A. A comparative overview of hydrogen production processes // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. **2017**. Volume 67, Pages 597-611. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.044>
9. Alves H.J., Junior C.B., Niklevicz R.R., Frigo E.P., Frigo M.S., Coimbra-Araújo C.H. Overview of hydrogen production technologies from biogas and the applications in fuel cells // *International Journal of Hydrogen Energy*. Volume 38, Issue 13, **2013**, Pages 5215-5225. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.02.057>
10. Di Marcoberardino G., Foresti S., Binotti M., Manzolini G. Potentiality of a biogas membrane reformer for decentralized hydrogen production // *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*. Volume 129, **2018**, Pages 131-141. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2018.04.023>
11. Ayodele T.R., Alao M.A., Ogunjuyigbe A.S.O., Munda J.L. Electricity generation prospective of hydrogen derived from biogas using food waste in south-western Nigeria // *Biomass and Bioenergy*. **2019**, Volume 127, 105291. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.105291>
12. Durán P., Sanz-Martínez A., Soler J., Menéndez M., Herguido J. Pure hydrogen from biogas: Intensified methane dry reforming in a two-zone fluidized bed reactor using permselective membranes // *Chemical Engineering Journal*. **2019**, Volume 370, Pages 772-781. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.03.199>
13. Ghaebi H., Yari M., Gargari S.G., Rostamzadeh H. Thermodynamic modeling and optimization of a combined biogas steam reforming system and organic Rankine cycle for coproduction of power and hydrogen // *Renewable Energy*, **2019**, Volume 130, Pages 87-102. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.06.046>
14. Chouhan K., Sinha S., Kumar S., Kumar S. Utilization of biogas from different substrates for SOFC feed via steam reforming: Thermodynamic and exergy analyses // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. **2019**, Volume 7, Issue 2, 103018. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103018>
15. Bock S., Zacharias R., Hacker V. Experimental study on high-purity hydrogen generation from synthetic biogas in a 10 kW fixed-bed chemical looping system // *RSC Advances*, **2019**, 9, 23686. <https://doi.org/10.1039/c9ra03123e>
16. Holliger, C.; Alves, M.; Andrade, D.; Angelidaki, I.; Astals, S.; Baier, U.; Bougrier, C.; Buffiere, P.; Carballa, M.; de Wilde, V et al. Towards a standardization of biomethane potential tests // *Water Science and Technology*. **2016**, 74, 2515-2522. <https://doi.org/10.2166/wst.2016.336>
17. Pham Minh, Doan & Siang, Ji & Vo, Dai-Viet & Phan, Thanh Son & Ridart, Cyrille & Nzihou, Ange & Grouset, Didier. Hydrogen production from biogas reforming: an overview of steam reforming, dry reforming, dual reforming, and tri-reforming of methane. // *Hydrogen Supply Chains. Design, Deployment and Operation*. **2018**, Pages 111-166 <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811197-0.00004-X>
18. Shagdar E., Lougou B.G., Shuai Y., Ganbold E., Chinonso O.P., Tan H. Process analysis of solar steam reforming of methane for producing low-carbon hydrogen // *RSC Adv.*, **2020**, 10, 12582. <https://doi.org/10.1039/c9ra09835f>
19. Oh K., Kim D., Lim K., Ju H. Multidimensional Modeling of Steam-Methane-Reforming-Based Fuel Processor for Hydrogen Production // *Fusion Science and Technology*. 2020. Volume 76:4, Pages 415-423. <https://doi.org/10.1080/15361055.2020.1712995>
20. Patel K.S., Sunoal A.K. Modeling and simulation of methane steam reforming in a thermally coupled membrane reactor // *International Journal of Hydrogen Energy*, **2007**, Vol. 32, Is. 13, pp. 2344-2358. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.03.004>
21. Yuan J., Ren F., Sundén B. Analysis of chemical-reaction-coupled mass and heat transport phenomena



in a methane reformer duct for PEMFCs // International Journal of Heat and Mass Transfer. Volume 50, Issues 3–4, 2007, Pages 687-701. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.07.005>

22. Quarton C.J., Samsatli S. Power-to-gas for injection into the gas grid: What can we learn from real-life projects, economic assessments and systems modelling? // Renewable and Sustainable Energy Reviews. Volume 98, 2018, Pages 302-316. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.09.007>

23. Cheddie D. Ammonia as a Hydrogen Source for Fuel Cells: A Review (в книге Hydrogen Energy - Challenges and Perspectives, глава 13). 2012. <https://doi.org/10.5772/47759>

References

1. Yalcinkaya S. A spatial modeling approach for siting, sizing and economic assessment of centralized biogas plants in organic waste management // Journal of Cleaner Production. Vol. 255, 2020, 120040 <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120040>

2. Lavergne C., Bovio-Winkler P., Etchebehere C., García-Gen S. Towards centralized biogas plants: Codigestion of sewage sludge and pig manure maintains process performance and active microbiome diversity // Bioresource Technology. Vol. 297, 2020, 122442 <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122442>

3. Kucuker, M.A., Demirel, B. & Onay, T.T. Enhanced biogas production from chicken manure via enzymatic pretreatment. J Mater Cycles Waste Manag, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10163-020-01039-w>

4. Velásquez Piñas J.A., Venturini O.J., Silva Lora E.E., del Olmo O.A., Calle Roalcaba O.D. An economic holistic feasibility assessment of centralized and decentralized biogas plants with mono-digestion and codigestion systems// Renewable Energy. Volume 139, 2019, Pages 40-51 <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.02.053>

5. Hagos K., Zong J., Li D., Liu C., Lu X. 2017. Anaerobic co-digestion process for biogas production: Progress, challenges and perspectives // Renewable and Sustainable Energy Reviews vol. 76(C), pages 1485-1496. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.184>

6. Joshi, D.C., Sood, S., Hosahatti, R. et al. From zero to hero: the past, present and future of grain amaranth breeding // Theor Appl Genet 2018, 131, 1807–1823. <https://doi.org/10.1007/s00122-018-3138-y>

7. Hosseini S.E., Wahid M.A. Hydrogen production from renewable and sustainable energy resources: Promising green energy carrier for clean development // Renewable and Sustainable Energy Reviews. Volume 57, 2016, Pages 850-866 <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.112>

8. Nikolaidis P., Poullikkas A. A comparative overview of hydrogen production processes // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. Volume 67, Pages 597-611. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.044>

9. Alves H.J., Junior C.B., Niklevicz R.R., Frigo E.P., Frigo M.S., Coimbra-Araújo C.H. Overview of hydrogen production technologies from biogas and the

applications in fuel cells // International Journal of Hydrogen Energy. Volume 38, Issue 13, 2013, Pages 5215-5225. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.02.057>

10. Di Marcobertardino G., Foresti S., Binotti M., Manzolini G. Potentiality of a biogas membrane reformer for decentralized hydrogen production // Chemical Engineering and Processing - Process Intensification. Volume 129, 2018, Pages 131-141. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2018.04.023>

11. Ayodele T.R., Alao M.A., Ogunjuyigbe A.S.O., Munda J.L. Electricity generation prospective of hydrogen derived from biogas using food waste in southwestern Nigeria // Biomass and Bioenergy. 2019, Volume 127, 105291. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.105291>

12. Durán P., Sanz-Martínez A., Soler J., Menéndez M., Herguido J. Pure hydrogen from biogas: Intensified methane dry reforming in a two-zone fluidized bed reactor using permselective membranes // Chemical Engineering Journal. 2019, Volume 370, Pages 772-781. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.03.199>

13. Ghaebi H., Yari M., Gargari S.G., Rostamzadeh H. Thermodynamic modeling and optimization of a combined biogas steam reforming system and organic Rankine cycle for coproduction of power and hydrogen // Renewable Energy, 2019, Volume 130, Pages 87-102. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.06.046>

14. Chouhan K., Sinha S., Kumar S., Kumar S. Utilization of biogas from different substrates for SOFC feed via steam reforming: Thermodynamic and exergy analyses // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2019, Volume 7, Issue 2, 103018. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103018>

15. Bock S., Zacharias R., Hacker V. Experimental study on high-purity hydrogen generation from synthetic biogas in a 10 kW fixed-bed chemical looping system // RSC Advances, 2019, 9, 23686. <https://doi.org/10.1039/c9ra01323e>

16. Holliger, C.; Alves, M.; Andrade, D.; Angelidaki, I.; Astals, S.; Baier, U.; Bougrier, C.; Buffiere, P.; Carballa, M.; de Wilde, V et al. Towards a standardization of biomethane potential tests // Water Science and Technology. 2016, 74, 2515-2522. <https://doi.org/10.2166/wst.2016.336>

17. Pham Minh, Doan & Siang, Ji & Vo, Dai-Viet & Phan, Thanh Son & Ridart, Cyrille & Nzihou, Ange & Grouset, Didier. Hydrogen production from biogas reforming: an overview of steam reforming, dry reforming, dual reforming, and tri-reforming of methane. // Hydrogen Supply Chains. Design, Deployment and Operation. 2018, Pages 111-166 <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811197-0.00004-X>

18. Shagdar E., Lougou B.G., Shuai Y., Ganbold E., Chinonso O.P., Tan H. Process analysis of solar steam reforming of methane for producing low-carbon hydrogen // RSC Adv., 2020, 10, 12582. <https://doi.org/10.1039/c9ra09835f>

19. Oh K., Kim D., Lim K., Ju H. Multidimensional Modeling of Steam-Methane-Reforming-Based Fuel Processor for Hydrogen Production // Fusion Science and Technology. 2020. Volume 76:4, Pages 415-423. <https://doi.org/10.1080/15361055.2020.1712995>



20. Patel K.S., Sunoal A.K. Modeling and simulation of methane steam reforming in a thermally coupled membrane reactor // International Journal of Hydrogen Energy, 2007, Vol. 32, Is. 13, pp. 2344-2358. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.03.004>

21. Yuan J., Ren F., Sundén B. Analysis of chemical-reaction-coupled mass and heat transport phenomena in a methane reformer duct for PEMFCs // International Journal of Heat and Mass Transfer. Volume 50, Issues 3-4, 2007, Pages 687-701. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.07.005>

22. Quarton C.J., Samsatli S. Power-to-gas for injection into the gas grid: What can we learn from real-life projects, economic assessments and systems modelling? // Renewable and Sustainable Energy Reviews. Volume 98, 2018, Pages 302-316. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.09.007>

23. Cheddie D. Ammonia as a Hydrogen Source for Fuel Cells: A Review (v knige Hydrogen Energy - Challenges and Perspectives, glava 13). 2012. <https://doi.org/10.5772/47759>

Транслитерация по BSI



«Росатом» запустил самый крупный в России ветропарк»



Самый крупный ветропарк в России заработал на Ставрополье.

Кочубеевская ветроэлектростанция начала поставки на оптовый рынок электроэнергии и мощности, сообщил ветроэнергетический дивизион «Росатома» «Новавинд».

Мощность станции — 210 Мвт, она состоит из 84 установок высотой 150 метров и мощностью 2,5 Мвт каждая. Предполагается, что среднегодовая выработка станции составит 496 млн кВт/ч.

Строительство ветропарка началось осенью 2019 года. Оборудование станции локализовано на 65%.

Ранее корпорация построила первый ветропарк в Адыгее.

«Успешный опыт строительства и эксплуатации ВЭС, выполнение планов по созданию серийного производства компонентов и узлов ВЭУ на территории РФ, эффективная цепочка поставок, в том числе с участием предприятий госкорпорации, позволили нам выйти на системный уровень реализации проектов в ветроэнергетике и завершить проект по строительству Кочубеевской ВЭС за два года. Ставропольский край стал нашим ключевым регионом», — заявил гендиректор «Новавинд» Александр Корчагин.

Ставрополье и Ростовская область являются ключевым регионом для реализации ветроэнергетической программы «Росатома». Сейчас корпорация строит здесь еще три ветропарка. До конца года заработают Бондаревская ветростанция мощностью 120 Мвт, Кармалиновская мощностью 60 Мвт и ветропарк в Труновском районе мощностью 60 Мвт.

Губернатор региона Владимир Владимиров ранее заявлял о необходимости довести мощности ветрогенерации до 1 гигаватта. До 2024 года здесь планируется построить 7 ветроэлектростанций и две солнечные.

Таким образом, Ставрополье с его ветрами и солнечным климатом может стать своеобразным «форпостом» ВИЭ в России. Всего до 2024 года «Росатом» введет ветроэлектростанции общей мощностью около 1,2 ГВт.

globalenergyprize.org

