

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИ АНАЛИЗЕ ОЧИСТКИ БИОГАЗА ОТ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА

*Канд. техн. наук, доц. ЛОСЮК Ю. А., студ. ПЛЕСКАЧ А. В.*

*Белорусский национальный технический университет*

Уже в ближайшие два-три года не менее 25 % вырабатываемой в Республике Беларусь энергии должно базироваться на местном сырье для обеспечения суверенитета и независимости страны. Такую задачу поставил перед республикой Глава государства [1].

По данным Комитета по энергоэффективности, Республика Беларусь располагает следующими видами топлива: нефтью и попутным газом, торфом, горючими сланцами, бурыми углями, дровами и отходами древесины. Из рассматриваемых возобновляемых источников энергии можно выделить: гидроэнергетические ресурсы, ветроэнергетический потенциал, биомассу, солнечную энергию, геотермальные ресурсы, твердые бытовые отходы, фитомассу, отходы растениеводства [2].

На сегодняшний день наиболее актуален вопрос применения возобновляемых источников энергии. В Беларуси только начинаются установка ветряков, применение биомассы как источника энергии. Хотелось бы заострить внимание на твердых бытовых отходах, так как опыт их переработки и применения в качестве источника энергии за рубежом уже велик, а в Беларуси совершенно не развит. Содержание органического вещества в бытовых отходах составляет 40–75 %, углерода – 35–40 %, зольность – 40–70 %, горючие компоненты в бытовых отходах – 50–88 %, теплотворная способность ТБО – 3360–8400 МДж/кг. Чем же так привлекательны ТБО как источник энергии? И что заставляет мировую энергетику не обходить стороной бытовые отходы? Эффективность данного направления следует оценивать не только по выходу биогаза, но и по экологической составляющей.

Еще семь-восемь лет назад перед человечеством встала проблема озоновых дыр, а точнее – необходимости прекращения использования озоноопасного хладагента R-22. Этого потребовали и Монреальская конвенция, Монреальский протокол. Это крупный международный экологический проект, который был успешно реализован. Однако по завершении данного проекта выяснилось, что вовсе не фреон является самым мощным врагом озонового слоя, а метан, образующийся при бескислородном брожении – болотный газ и биогаз. По официальной мировой оценке, метан в 21 раз опаснее  $\text{CO}_2$ . После подписания Киотского протокола любой выброс метана расценивается как атмосферное загрязнение. Таким образом, с одной стороны, говоря об отходах, следует иметь в виду предварительную обработку для их выброса, с другой стороны, органические отходы – ценное энергетическое сырье [3].

В Республике Беларусь ежегодно накапливается около 2,4 млн т твердых бытовых отходов, которые направляются на свалки и два мусороперерабатывающих завода (Минский и Могилевский), на них ежегодно вывозится, тыс. т в год: бумаги – 648,6; пищевых отходов – 548,6; стекла – 117,9; металла – 82,5; текстиля – 70,8; дерева – 54,2; кожи и резины – 47,2; пластмассы – 70,8. Потенциальная энергия, заключенная в твердых бытовых отходах, образующихся на территории Беларуси, равноценна 470 тыс. т условного топлива при их переработке с целью получения газа. При этом эффективность составит не более 20–25 %, что эквивалентно 100–120 тыс. т условного топлива. Кроме того, необходимо учитывать многолетние запасы ТБО, которые имеются во всех

крупных городах и создают проблемы их складирования. Только по областным городам Беларуси ежегодная переработка ТБО в газ позволила бы получить биогаза около 50 тыс. т условного топлива, а по Минску – до 30 тыс. т условного топлива, что эквивалентно энергоснабжению трех-пяти крупных предприятий.

В целях анализа, эколого-экономического определения основных путей решения проблемы ТБО в условиях Республики Беларусь целесообразно охарактеризовать в общих чертах мировую и отечественную практику конверсий ТБО.

В мировой практике получение энергии из ТБО осуществляется несколькими способами: сжиганием, активной и пассивной газификацией, в результате которой в толще ТБО образуется биогаз. Наиболее перспективна газификация, так как в случае прямого сжигания возникают экологические проблемы, для решения которых требуются инвестиции, двукратно превышающие стоимость самих сжигающих установок.

В Швеции, например, биогаз используется более чем в 100 местах. Его годовое производство равно 5 ПДж, а потенциал в 10 раз выше. К 2020 г. Швеция может стать первой страной в мире, которая откажется от использования нефти. В 2004 г. 29 МСУ Швеции перерабатывали более 3,1 млн т мусора и вырабатывали 9,3 ТВт·ч энергии, в том числе 8,6 ТВт·ч тепловой. Потребление жидкого топлива в быту и сфере услуг с 1994 г. снизилось на 15,2 ТВт·ч [4, 5].

В Германии в 1992 г. 139 предприятий производили биогаз, в 2002 г. их стало 1222. По прогнозам, производство биогаза к 2030 г. достигнет 100 млрд кВт·ч/год, что составит 10 % потребляемого импортного газа. На данный момент стоимость 1 кВт·ч энергии, выработанной с помощью биогаза, равна 20 евроцентам [5].

В рамках программы «Эколинкс» (Украина, США) начинается реализация проекта снижения выбросов парниковых газов в атмосферу за счет сбора и утилизации метана на полигоне ТБО г. Луганска, куда ежегодно вывозится 350–500 тыс. м<sup>3</sup> отходов. До 2002 г. их накопилось около 1600 тыс. т. Представлены технические данные о системе сбора биогаза и оценка ее производительности, производя-

щиеся по методике Агентства защиты среды США [6].

Что же касается Беларуси, то практически единственным способом обезвреживания коммунальных отходов в республике является их захоронение на полигонах или необустроенных свалках. Суммарная площадь пригородных земель под полигонами и свалками сегодня составляет около 1000 га. Ежегодно эта площадь увеличивается на 40–60 га. Многие действующие полигоны складирования и обезвреживания отходов, расположенные в непосредственной близости от городов, свою эксплуатационную мощность исчерпали. Размещение новых площадок осуществляется на большом расстоянии от городов (Брест – 44 км, Могилев – 28 км, Мозырь – 25 км и т. д.). Эксплуатация не имеющих элементарных природоохранных сооружений – гидрозащитных экранов, систем сбора и контроля фильтрата и т. д. («Тростенецкая», г. Минск; свалки Гомеля, Могилева, Борисова и др.), с социальной точки зрения, противопоказана, с природоохранной – опасна. Сегодня глубинное загрязнение подземных вод ядовитым фильтратом вызывает серьезную тревогу (свалки Борисова, Гомеля, Лиды и др.).

Не меньшую опасность вызывают и полигоны, эксплуатация которых осуществляется с нарушением нормативных требований. Из-за отсутствия в большинстве случаев землеройных механизмов и финансовых средств не ведутся уплотнение и картово-послойное захоронение отходов, их изоляция. Несвоевременно осуществляются или не осуществляются вообще откачка фильтрата из колодцев, отбор проб воды из наблюдательных скважин и т. д. Практически ни на свалках, ни на полигонах нет весового учета отходов, поступающих из организаций и промышленных предприятий [7].

Из сложившейся в Беларуси ситуации можно сделать вывод о том, что как минимум одним источником энергии страна обеспечена. И применение биогаза как источника энергии не только необходимо для энергетического улучшения баланса Беларуси, но и для решения ряда экологических проблем.

При подготовке технических объектов к эксплуатации важным фактором является технико-экономическое обоснование, в котором рассматриваются предполагаемые источники

финансирования. На основании этого проводят выбор рациональных структур и оптимальных параметров теплотехнических систем. Решение этих задач осуществляется с применением математической модели. Реализация математической модели существующего объекта позволяет:

- исследовать характер взаимосвязи параметров системы и анализировать их влияние на основные показатели как технические, так и экономические;
- исследовать влияние внешних условий сооружения и эксплуатации теплоэнергетической установки на соотношение ее параметров и технико-экономических показателей;
- численно оценить дополнительные материальные вложения, снижение КПД, изменение приведенных затрат и ряда других показателей системы в случае отказа оптимальных параметров и схем по техническим или экономическим причинам;
- оценить структурную и параметрическую оптимизацию системы.

Сотрудниками кафедры промтеплоэнергетики и теплотехники БНТУ предложен метод математического моделирования теплотехнической системы, суть которого заключается в создании совокупности математических моделей и соотношений, определяющих взаимосвязи параметров того или иного процесса, явления. Предложенный метод моделирования универсален и может быть использован не только для исследования, но и при создании и эксплуатации технического объекта.

Математическое моделирование позволяет выполнять в едином интерактивном процессе расчет технологической схемы установки и технические расчеты оборудования. При этом определяются величины тепловых балансов, рассчитываются тепловые и гидравлические потери, уточняются КПД и основные показатели системы установок. Следует помнить, что математические модели, разработанные на стадии проектирования технического объекта, можно использовать на этапе его эксплуатации. Физическое старение оборудования приводит к изменению оптимальных параметров, которые должны периодически или постоянно уточняться при эксплуатации оборудования. При выполнении технико-экономического обосно-

вания следует учитывать, что теплоэнергетические системы являются элементами топливно-энергетического комплекса страны, а также взаимосвязаны с другими промышленными отраслями: металлургией и машиностроением. При оптимизации следует учитывать не только внутренние связи, но и внешние, т. е. общее состояние развития энергетики, металлургии, машиностроения, вопросы взаимодействия с окружающей средой. Учет внешних связей еще более усложняет задачу оптимизации. В то же время применение математического моделирования позволяет не только описать известные связи, характеризующие исследуемый объект, но и раскрыть новые закономерности как в самом объекте, так и при его взаимодействии с внешними системами. Применение математического моделирования повышает ответственность исполнителей, участвующих в процессе проектирования оборудования. Таким образом, при выполнении технико-экономического обоснования с применением метода математического моделирования необходимо иметь обобщенную модель, включающую в себя модели структуры системы, ее элементов и характера взаимодействия с внешней системой. В то же время следует отметить, что основной проблемой внедрения этого метода в инженерную практику являются большие затраты труда на создание математических моделей, программного обеспечения для их реализации [8].

Рассмотрим, например, схему обогащения биогаза путем очистки от  $\text{CO}_2$  методом абсорбции водой под давлением. Поставим цель: подобрать наиболее оптимальное давление воды и степень очистки биогаза, полученного с полигона ТБО, с учетом стоимости воды, электроэнергии, исходного и получаемого газа, а также себестоимость установки и т. п.

Схема обогащения биогаза путем очистки его от  $\text{CO}_2$  представлена на рис. 1.

В данной схеме биогаз очищается от наличия  $\text{CO}_2$  путем абсорбции водой под давлением 1,6–3,0 МПа, осуществляемым эжектором II. Вытекающую из абсорбера III воду пропускают через гидротурбину IV, которая используется для вращения насоса I, нагнетающего воду в абсорбер. Благодаря работе гидротурбины возвращается около 40 % затрачиваемой на работу насоса энергии. Остальная энергия полу-

чается от электродвигателя VI, расположенного на одном валу с насосом и турбиной. После турбины давление воды снижается до атмосферного. Далее вода попадает в десорбер V, где CO<sub>2</sub> отделяется, а вода опять направляется на абсорбцию. На основании информации, полученной в результате обследования объекта, формируется его расчетная схема, подбираются технические элементы, определяются связи между потоками веществ внутри системы и энергии, связи с внешней системой, окружающей средой.

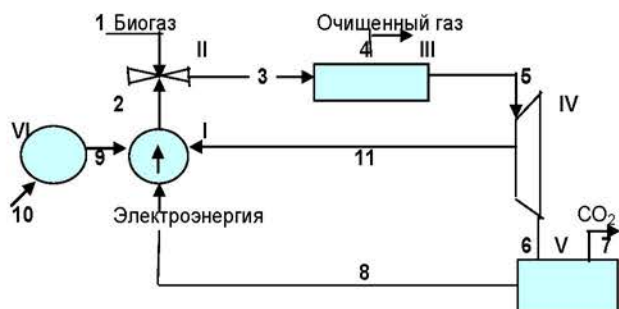


Рис. 1. Схема обогащения биогаза путем очистки от CO<sub>2</sub>

На рис. 1 номерами I–II обозначены элементы схемы, служащие для транспорта материальных и энергетических потоков, – связи. Связи, осуществляющиеся каким-либо теплоносителем, определяются расходным I и термодинамическими 2 параметрами его состояния (температурой и энтальпией). В результате составляется граф схемы – совокупность отрезков (дуги) и точек пересечения отрезков (вершины). Элементы исследуемой системы в этом случае являются вершинами, а потоки сырья и энергии – ориентированными дугами. С помощью метода графов и решения балансовых уравнений, составленных математических моделей и матриц, записывается алгоритм для анализа системы и его программной реализации на ЭВМ. Программа на основании известных исходных данных и постоянных величин выводит итоговый показатель эффективности, с помощью которого можно осуществить выбор определяющих критериев.

На примере схемы, проанализируем количество воды, электроэнергии, а также выход очищенного газа и содержание в нем CO<sub>2</sub> при изменении давления воды от 1,6 до 3,0 МПа и при изменении степени очистки от CO<sub>2</sub> от

80 до 95 % с шагом 1 % от содержания CO<sub>2</sub> в исходном газе.

Рассмотрим граф, составленный на основе структуры исследуемого объекта (рис. 2).

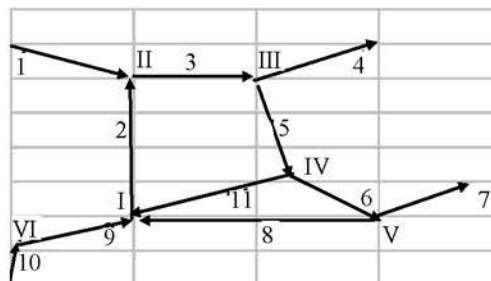


Рис. 2. Граф схемы обогащения биогаза

Элементы схемы обогащения газа являются вершинами графа, а потоки сырья и энергии – ориентированными дугами, совпадающими с направлением потоков.

На следующем этапе для всех элементов схемы составляются материальные и тепловые балансы, которые отражают зависимость между входящими и выходящими связями. Система балансовых уравнений в элементах теплотехнической системы устанавливает такое соотношение между параметрами связи, которое обеспечивает получение заданной стационарной нагрузки системы с определенными конструктивно-компановочными характеристиками.

Приведем пример составления балансов для абсорбера как элемента в схеме очистки биогаза от CO<sub>2</sub> (рис. 3).

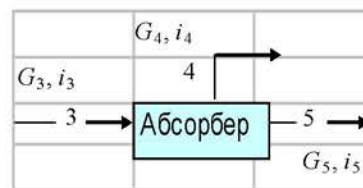


Рис. 3. Абсорбер как элемент графа схемы обогащения биогаза

Составим материальный и тепловой балансы графа:

$$G_3 - G_4 - G_5 = 0;$$

$$G_3 i_3 - G_4 i_4 - G_5 i_5 = 0,$$

где  $G_3, G_4, G_5$  – расход воды на входе в абсорбер, очищенного биогаза и вытекающей из

абсорбера воды соответственно;  $i_3, i_4, i_5$  – их энтальпии.

После рассмотрения всех элементов анализируемой схемы и решения балансовых уравнений, составленных математических моделей и матриц, записи алгоритма для анализа системы и его программы получаем программу, в которой можно осуществлять подбор наиболее оптимального давления воды и степени очистки биогаза, результаты расчета которой представлены в табл. 1.

Несложно заметить тенденции к изменению расхода воды и электроэнергии. При увеличении степени очистки биогаза расход воды и электроэнергии повышается. В случае уве-

личения давления расход воды падает, а расход электроэнергии растет. Причем с увеличением давления расход воды меняется довольно значительно.

### ВЫВОД

Таким образом, реализация математической модели рассматриваемого объекта позволяет провести выбор рациональных структур и оптимальных параметров теплотехнических систем. Данный метод может быть полезен при разработке технико-экономических обоснований или обоснований инвестиций для решения различных задач.

Таблица 1

Доля извлечения CO <sub>2</sub>	Количество получаемого биогаза, м <sup>3</sup>	Содержание CO <sub>2</sub> в конечном газе, доли	Давление после насоса, МПа					
			1,6		2,3		3,0	
			Количество необходимой воды, м <sup>3</sup>	Расход электроэнергии, кВт·ч	Количество необходимой воды, м <sup>3</sup>	Расход электроэнергии, кВт·ч	Количество необходимой воды, м <sup>3</sup>	Расход электроэнергии, кВт·ч
0,80	0,56	0,20	203	35,7	145	37,1	114	38,3
0,82	0,55	0,18	208	36,5	149	38,0	117	39,3
0,84	0,54	0,16	213	37,4	152	38,9	120	40,2
0,86	0,53	0,15	218	38,3	156	39,9	123	41,2
0,88	0,51	0,13	223	39,2	159	40,8	126	42,2
0,90	0,50	0,11	228	40,1	163	41,7	129	43,1
0,92	0,49	0,09	233	41,0	167	42,6	132	44,1
0,94	0,48	0,07	238	41,9	170	43,6	134	45,0

### ЛИТЕРАТУРА

1. **О мероприятиях** по реализации Директивы Президента Республики Беларусь от 14 июня 2007 г. № 3: постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 31 авг. 2007 г., № 1122 // [www.pravo.by](http://www.pravo.by)
2. **Чем богаты**, или Наша альтернатива энергонезависимости // Экономическая политика. – 2007. – 29 июня.
3. **Пчелина, И.** Настало время бороться с мегатоннами / И. Пчелина // [www.priroda.org](http://www.priroda.org)
4. **Реферативный журнал** «Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии». Москва 2007(9) 07.09–90.124 «Подготовка биогаза к подаче в трубопроводы природного газа» Aufbereitung van Biogas zur Einspeisung in das Erdgarnets. Euroheat and Power. – 2007. – № 1–2. – С. 42–46.
5. **Реферативный журнал** «Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии». Москва 2007(6) 07.11 – 90.130

«Биоэнергетика в Германии». BEE fordert Uberarbeitung der Bioenergie. – 2007. – № 4. – С. 5.

6. **Реферативный журнал** «Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии». Москва 2006(2) «Биогаз із Луганського полігона ТПВ». – Зеленая энергия. – 2003. – № 2. – С. 8–10.

7. **О выполнении** постановления Совета Министров Респ. Беларусь от 1 сентября 1998 г. № 1368 «О республиканской программе обращения с коммунальными отходами»: приказ Министерства жилищно-коммунального хозяйства Респ. Беларусь, 16 сент. 1998 г., № 135 // [www.zakon2006.by.ru](http://www.zakon2006.by.ru)

8. **Седнин, В. А.** Моделирование, оптимизация и управление ТТС: метод. пособие / В. А. Седнин, В. Н. Романюк, А. А. Седнин. – Минск: БНТУ, 2002.

Поступила 24.04.2008