

Ключевые слова: спортивная обувь, стопа, легкая атлетика, проектирование, конструкция, рациональная внутренняя форма, биомеханика.

Петрус Борис Борисович, старший викладач, кафедра легкої промисловості, машинобудування і професійної освіти, Мукачівський державний університет, Україна.

Козарь Оксана Петрівна, доктор технічних наук, доцент, завідувач кафедри легкої промисловості, машинобудування і професійної освіти, Мукачівський державний університет, Україна, e-mail: okoza@mail.ua.

Коновал Віктор Павлович, доктор технічних наук, професор, кафедра конструювання та технології виробів із шкіри, Київський національний університет технологій і дизайну, Україна. Хіміч Валентин Іванович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра легкої промисловості, машинобудування і професійної освіти, Мукачівський державний університет, Україна.

Петрус Борис Борисович, старший преподаватель, кафедра легкой промышленности, машиностроения и профессионально-

го образования, Мукачевский государственный университет, Украина.

Козарь Оксана Петровна, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой легкой промышленности, машиностроения и профессионального образования, Мукачевский государственный университет, Украина.

Коновал Виктор Павлович, доктор технических наук, профессор, кафедра конструирования и технологии изделий из кожи, Киевский национальный университет технологий и дизайна, Украина.

Химич Валентин Иванович, кандидат технических наук, доцент, кафедра легкой промышленности, машиностроения и профессионального образования, Мукачевский государственный университет, Украина.

Petrus Boris, Mukachevo State University, Ukraine.

Kozar Oksana, Mukachevo State University, Ukraine, e-mail: okoza@mail.ua.

Konovall Viktor, Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine.

Himych Valentin, Mukachevo State University, Ukraine

УДК 628.477:66.023

DOI: 10.15587/2312-8372.2016.70688

**Вамболь С. А.,
Шахов Ю. В.,
Вамболь В. В.,
Петухов И. И.**

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССОВ В УСТАНОВКЕ РАЗДЕЛЕНИЯ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ ПРИ УТИЛИЗАЦИИ ОТХОДОВ

Представлена система уравнений материального и энергетического баланса для расчета стационарного режима работы энерготехнологической установки низкотемпературного разделения многокомпонентных углеводородных смесей, образовавшихся при газификации отходов. Получен компонентный состав потоков: один — топливный газ, пригодный для поддержания процесса газификации отходов, два других — компримированный продукт (аналог автомобильного компримированного природного газа).

Ключевые слова: утилизация, отходы, экологическая безопасность, математическое моделирование, многокомпонентные углеводородные смеси, низкотемпературное разделение.

1. Введение

В настоящее время ситуация с отходами является угрожающей для экологической безопасности, а вопрос уменьшения их количества и засорения окружающей природной среды является в Украине наиболее острым. Процесс накопления отходов прогрессирует, все чаще возникают несанкционированные свалки. Широкое применение пластика и различных полимерных материалов в цветной металлургии, химической и пищевой промышленности и целлюлозно-бумажной и полиграфическом деле, строительстве, машино- и приборостроении, а также в производстве товаров народного потребления приводит к росту в отходах доли углерода и его соединений. Это обуславливает увеличение количества различных загрязнителей, включая супертоксичные, как диоксины и фураны.

Углеродсодержащие материалы являются основой многих видов отходов. Их накопление в окружающей природной среде приводит к ее загрязнению, развитию

различных заболеваний у населения и, как следствие, к снижению уровня экологической безопасности [1]. Таким образом, наиболее важным, с научной точки зрения является обеспечение экологически безопасной утилизации твердых отходов, содержащих углерод и его соединения, для повышения эффективности системы управления экологической безопасностью и в целях снижения нагрузки на окружающую природную среду.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Говоря об утилизации отходов, следует понимать их использование в качестве вторичных материальных или энергетических ресурсов. При этом должна быть обеспечена как экологическая безопасность процесса, так и его экономическая эффективность. Наиболее перспективной и активно развивающейся технологией утилизации твердых отходов является их высокотемпературная газификация, при которой как источник высоких температур

применяют генератор плазмы [2–4]. Продуктом такой утилизации твердых отходов, содержащих углерод и его соединения, является калорийный синтез-газ [5, 6]. Экспериментально это доказано авторами в работе [7]. Полученный синтез-газ может быть использован для выработки тепла, электроэнергии или в качестве химического сырья [8, 9]. Однако, из-за непостоянного химического состава отходов теплотворная способность полученного газа тоже не одинакова, что существенно влияет на его расход при газификации вновь поступивших отходов. В связи с суточной и сезонной неравномерностью потребления энергии, полученный синтез-газ может оказаться не востребованным и выброшенным в окружающую природную среду.

Исключить подобную ситуацию позволяет его дальнейшая обработка с целью получения энергетического сырья пригодного для хранения и транспортирования. Данное исследование представляет собой часть научного исследования по созданию экологически безопасной и экономически эффективной технологии утилизации твердых отходов, содержащих углерод и его соединения. В основе такой технологии лежит высокотемпературная газификация отходов, метанирование полученного синтез-газа с последующим низкотемпературным разделением многокомпонентной газовой смеси в целях выделения потока с повышенным содержанием метана [10].

Началом исследования по разработке и созданию установки низкотемпературного разделения газовых смесей, являются работы, где описаны исходные параметры и допущения при расчете сложных энерготехнологических систем, а так же разработаны математические модели отдельных функциональных элементов установки [11–13]. Схема энерготехнологической установки низкотемпературного разделения многокомпонентных углеводородных смесей с характерными сечениями показана на рис. 1.

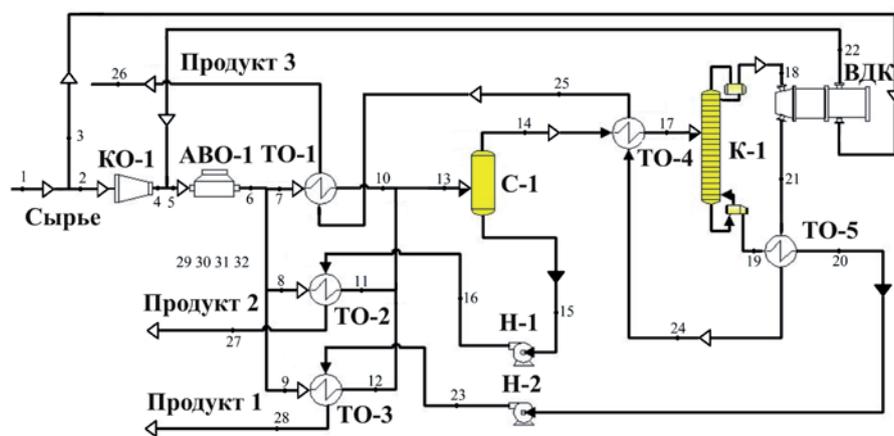


Рис. 1. Схема энерготехнологической установки низкотемпературного разделения многокомпонентных углеводородных смесей: КО-1 — компрессор; АВО-1 — аппарат воздушного охлаждения; ТО-1, ТО-2, ТО-3, ТО-4, ТО-5 — теплообменник; Н-1, Н-2 — насос; С-1 — сепаратор; К-1 — ректификационная колонна; ВДК — волновой детандер-компрессор

3. Объект, цель и задачи исследования

Объект исследования — многокомпонентные газовые смеси, образующиеся при газификации отходов.

Целью исследования является математическое описание процессов разделения многокомпонентных углеводо-

родных смесей, образующихся при газификации отходов, системой замыкающих уравнений, и определение массовых долей компонентов углеводородной газовой смеси.

Для достижения цели исследования были поставлены и решены следующие задачи:

- разработать математические модели отдельных функциональных элементов установки;
- методом последовательных приближений в каждом контрольном сечении определить значения контролируемых параметров, а именно температуры, давления, массового расхода потока и массовых долей компонентов углеводородной газовой смеси.

4. Создание математической модели энерготехнологической установки низкотемпературного разделения многокомпонентных газовых смесей

Для расчета стационарного режима работы энерготехнологической установки низкотемпературного разделения многокомпонентных газовых смесей записываются системы уравнений материального и энергетического баланса. В каждом сечении задаются или рассчитываются значения температуры, давления, массового расхода потока, а также массовые доли компонентов многокомпонентной газовой смеси (H_2 , CO , N_2 , CH_4). В случае, когда при переходе от одного сечения к другому величина параметра не меняется, уравнение может быть заменено равенством.

При создании математической модели энерготехнологической установки низкотемпературного разделения многокомпонентных газовых смесей в предыдущих исследованиях разработаны математические модели отдельных ее функциональных элементов [11–13] и приняты следующие допущения:

- все процессы, происходящие в функциональных элементах установки, стационарные, равновесные, адиабатные;
- гидравлические потери в трубопроводах, сепараторе, ректификационной колонне и теплообменных агрегатах принимаются равными нулю ввиду их малости по сравнению с изменением давления в компрессорах, насосах и детандере;
- рабочий процесс сепаратора предполагает полное разделение двухфазного потока, исходя из условий фазового равновесия многокомпонентной среды;
- внешние теплопритоки к функциональным элементам системы низкотемпературного разделения, отсутствуют.

Система уравнений, описывающих стационарный режим работы энерготехнологической установки низкотемпературного разделения многокомпонентных газовых смесей, выглядит следующим образом:

$$G_1 = G_2 + G_3; \quad (1)$$

$$P_1 = P_2 = P_3; \quad (2)$$

$$T_1 = T_2 = T_3. \quad (3)$$

Величина расхода G_3 газовой смеси, сжимаемой в компрессорной части волнового детандера-компрессора ВДК, определяется мощностью $N_{ВДК}$, получаемой в детандерной части ВДК и рассчитывается с помощью соотношений из [11]:

$$G_3 = f_1(P_3, T_2, P_{22}, N_{ВДК}). \quad (4)$$

Давление P_4 на выходе из компрессора КО-1 и давление P_{22} на выходе из компрессорной части ВДК определяется по значению давления P_{16} на входе в ректификационной колонне К-1, исходя из отсутствия гидравлических потерь:

$$P_4 = P_5 = P_6 = P_7 = P_8 = P_9 = P_{10} = P_{11} = P_{12} = P_{13} = P_{14} = P_{15} = P_{16}. \quad (5)$$

Температура T_{22} на выходе компрессорной части ВДК также определяется с помощью соотношений, приведенных в [12]:

$$T_{22} = f_3(P_3, T_3, P_{22}, G_3), \quad (6)$$

$$G_3 = G_{22}. \quad (7)$$

Аналогично определяется температура T_4 на выходе из компрессора КО-1 [12]:

$$T_4 = f_1(P_2, T_2, P_4, G_2), \quad (8)$$

$$G_2 = G_4. \quad (9)$$

На входе в аппарат воздушного охлаждения АВО-1 производится смешивание двух газовых потоков:

$$G_5 = G_{22} + G_4. \quad (10)$$

При условии равенства давлений смешиваемых потоков величина давления остается постоянной, тогда как температура смеси T_6 определяется из условия закона сохранения энергии:

$$G_5 \cdot i(P_5, T_5) = G_4 \cdot i(P_4, T_4) + G_{22} \cdot i(P_{22}, T_{22}). \quad (11)$$

Давление P_6 на выходе из аппарата воздушного охлаждения АВО-1 известно из (4), тогда как температура T_6 определяется как:

$$T_6 = T_5 + \Delta T; \quad (12)$$

$$G_5 = G_6. \quad (13)$$

Величины расходов прямых потоков газовых смесей G_7 , G_8 и G_9 определяются из условия обеспечения

заданной величины разности температур в пинч-точке в теплообменниках ТО1, ТО2 и ТО3 по известным входным параметрам [11]:

$$G_8 = f_4(P_8, T_8, P_{16}, T_{16}, G_{16}, \Delta T); \quad (14)$$

$$G_9 = f_4(P_9, T_9, P_{23}, T_{23}, G_{23}, \Delta T); \quad (15)$$

$$G_6 = G_7 + G_8 + G_9. \quad (16)$$

Одновременно рассчитываются температуры прямых потоков T_{10} , T_{11} и T_{12} [11]:

$$T_{10} = f_5(P_7, T_7, G_7, P_{25}, T_{25}, G_{25}, \Delta T); \quad (17)$$

$$T_{11} = f_5(P_8, T_8, G_8, P_{16}, T_{16}, G_{16}, \Delta T); \quad (18)$$

$$T_{12} = f_5(P_9, T_9, G_9, P_{23}, T_{23}, G_{23}, \Delta T); \quad (19)$$

$$G_7 = G_{10}; \quad (20)$$

$$G_8 = G_{11}; \quad (21)$$

$$G_9 = G_{12}; \quad (22)$$

и температуры продуктов 1, 2 и 3:

$$T_{26} = f_5(P_7, T_7, G_7, P_{25}, T_{25}, G_{25}, \Delta T); \quad (23)$$

$$T_{27} = f_5(P_8, T_8, G_8, P_{16}, T_{16}, G_{16}, \Delta T); \quad (24)$$

$$T_{28} = f_5(P_9, T_9, G_9, P_{23}, T_{23}, G_{23}, \Delta T); \quad (25)$$

$$G_1 = G_{26} + G_{27} + G_{28}. \quad (26)$$

Массовые расходы продуктов 1, 2 и 3 описываются равенствами:

$$G_{18} = G_{21} = G_{24} = G_{25} = G_{26}; \quad (27)$$

$$G_{19} = G_{20} = G_{23} = G_{28}; \quad (28)$$

$$G_{15} = G_{16} = G_{27}. \quad (29)$$

Перед входом в сепаратор С-1 производится смешивание трех потоков газовых смесей одинакового состава:

$$G_{13} = G_{10} + G_{11} + G_{12}. \quad (30)$$

При условии равенства давлений смешиваемых потоков величина давления остается постоянной, тогда как температура смеси T_{13} определяется из условия закона сохранения энергии:

$$G_{13} \cdot i(P_{13}, T_{13}) = G_{10} \cdot i(P_{10}, T_{10}) + G_{11} \cdot i(P_{11}, T_{11}) + G_{12} \cdot i(P_{12}, T_{12}). \quad (31)$$

При расчете процесса разделения в сепараторе С-1 состав и массовый расход получаемых жидкой и паровой фаз определяется из условия фазового равновесия двухфазных многокомпонентных потоков. В данном случае используется алгоритм расчета сепаратора, изложенный в [12]. Комплект подпрограмм расчетов коэффициентов теплофизических свойств рабочих тел, базирующийся на уравнении состояния Пенга-Робинсона, позволяет рассчитать массовый состав жидкой и паровой фаз доли:

$$g_{CO_14}, g_{H_2_14}, g_{CH_4_14}, g_{N_2_14} = f_6(P_{13}, T_{13}, g_{CO_13}, g_{H_2_13}, g_{CH_4_13}, g_{N_2_13}); \quad (32)$$

$$g_{CO_15}, g_{H_2_15}, g_{CH_4_15}, g_{N_2_15} = f_6(P_{13}, T_{13}, g_{CO_13}, g_{H_2_13}, g_{CH_4_13}, g_{N_2_13}); \quad (33)$$

$$G_{13} = G_{14} + G_{15}; \quad (34)$$

$$T_{13} = T_{14} = T_{15}. \quad (35)$$

Расчет теплообменника ТО-4 выполняется по соотношениям, приведенным в [11]:

$$T_{17} = f_5(P_{14}, T_{14}, G_{14}, P_{24}, T_{24}, G_{24}, \Delta T); \quad (36)$$

$$T_{25} = f_5(P_{14}, T_{14}, G_{14}, P_{24}, T_{24}, G_{24}, \Delta T); \quad (37);$$

$$G_{14} = G_{17}. \quad (38)$$

Для обратного потока (продукта 3) может быть записано равенство:

$$P_{21} = P_{24} = P_{25} = P_{26}. \quad (39)$$

Расчет процесса разделения газовой смеси в ректификационной колонне низкотемпературного разделения с ребойлером и реконденсатором К-1 производится по методике, описанной в [13]:

$$g_{CO_18}, g_{H_2_18}, g_{CH_4_18}, g_{N_2_18} = f_7(P_{17}, T_{17}, g_{CO_17}, g_{H_2_17}, g_{CH_4_17}, g_{N_2_17}, P_{18}, T_{18}); \quad (40)$$

$$g_{CO_19}, g_{H_2_19}, g_{CH_4_19}, g_{N_2_19} = f_8(P_{17}, T_{17}, g_{CO_17}, g_{H_2_17}, g_{CH_4_17}, g_{N_2_17}, P_{19}, T_{19}); \quad (41)$$

$$T_{18} = f_9(P_{18}, g_{CO_18}, g_{H_2_18}, g_{CH_4_18}, g_{N_2_18}); \quad (42)$$

$$T_{19} = f_{10}(P_{19}, g_{CO_19}, g_{H_2_19}, g_{CH_4_19}, g_{N_2_19}); \quad (43)$$

$$G_{18} = f_{11} \left(P_{17}, T_{17}, G_{17}, g_{CO_17}, g_{H_2_17}, g_{CH_4_17}, g_{N_2_17}, P_{18}, T_{18} \right); \quad (44)$$

$$G_{19} = f_{12} \left(P_{17}, T_{17}, G_{17}, g_{CO_17}, g_{H_2_17}, g_{CH_4_17}, g_{N_2_17}, P_{19}, T_{19} \right); \quad (45)$$

$$P_{17} = P_{19}; \quad (46)$$

$$P_{18} = P_{19} - \Delta P_{PK}; \quad (47)$$

$$G_{17} = G_{18} + G_{19}. \quad (48)$$

Многокомпонентный газовый поток из реконденсатора ректификационной колонны К-1 направляется в детандерную часть волнового детандера-компрессора ВДК. Процесс расширения в детандере рассчитывается по методике, представленной в [11]:

$$T_{21} = f_{13}(P_{18}, T_{18}, P_{21}); \quad (49)$$

$$N_{ВДК} = f_{14}(P_{18}, T_{18}, G_{18}, P_{21}). \quad (50)$$

Полезная мощность $N_{ВДК}$, получаемая в детандерной части ВДК, используется для сжатия газовой смеси в компрессорной части ВДК ((4) и (6)).

Утилизация части хладоресурса, полученного в детандерной части ВДК, используется для захлаживания жидкого продукта 1, выходящего из ребойлера ректификационной колонны. Расчет параметров теплообменника ТО-5 выполняется по методике [11]:

$$T_{20} = f_5(P_{19}, T_{19}, G_{19}, P_{21}, T_{21}, G_{21}, \Delta T); \quad (51)$$

$$T_{24} = f_5(P_{19}, T_{19}, G_{19}, P_{21}, T_{21}, G_{21}, \Delta T). \quad (52)$$

Давление подачи продуктов 1 и 2 обеспечивается с помощью насосов Н-1 и Н-2, расчет которых производится по методике, представленной в [11]:

$$T_{16} = f_{15}(P_{15}, T_{15}, P_{16}, G_{15}); \quad (53)$$

$$T_{23} = f_{15}(P_{20}, T_{20}, P_{23}, G_{20}). \quad (54)$$

Для замыкания системы уравнений (1)–(54) необходимо задать следующие рабочие параметры:

- давление P_1 , температура T_1 , расход G_1 и массовый состав компонентов газовой смеси на входе в установку разделения;
- температура окружающей среды $T_{O.C.}$;
- давление выдачи продуктов 1, 2 и 3 P_{26} , P_{27} и P_{28} ;
- давление в ректификационной колонне низкотемпературного разделения газовой смеси P_{17} и перепад давления по высоте ректификационной колонны P_{19} – P_{18} , а также массовая доля CH_4 в потоке паровой фазы, отводимой из реконденсатора ректификационной колонны;
- величина недорекуперации теплоты ΔT в теплообменных аппаратах.

Для решения системы нелинейных уравнений (1)–(54) был использован итерационный метод Ньютона-Рафсона.

5. Обсуждение результатов математического описания процессов низкотемпературного разделения газовых смесей, полученных при утилизации отходов

Представленная система уравнений, реализующая алгоритм расчета процесса разделения многокомпонентных углеводородных смесей, образующихся при газификации

отходов, позволяет путем численного моделирования осуществлять анализ работы энерготехнологической установки с последующей оптимизацией ее параметров в целях повышения эффективности и снижения энергетических затрат при газификации отходов. Произведенный расчет (табл. 1) показывает, что в результате использования установки низкотемпературного разделения многокомпонентных углеводородных смесей могут быть получены три потока энергоносителей. Потоки с высоким массовым содержанием метана 91,5 % (сечение 28, рис. 1) и 83,4 % (сечение 27, рис. 1) представляют собой сжатый продукт и могут быть использованы как моторное топливо, аналог автомобильного сжатого природного газа (КПГ). Газовый поток, полученный в сечении 26 (рис. 1), годится для поддержания процесса газификации отходов.

Таблица 1

Массовые доли компонентов углеводородной газовой смеси в контрольных сечениях

Номер сечения	Давление, МПа	Температура, °С	Расход, кг/ч	Массовый состав продукта			
				CH ₄	H ₂	CO	N ₂
1	0,1	30	60,0	0,3756	0,0196	0,4287	0,1761
2	0,1	30	54,0	0,3756	0,0196	0,4287	0,1761
3	0,1	30	6,0	0,3756	0,0196	0,4287	0,1761
4	0,6	250,7	54,0	0,3756	0,0196	0,4287	0,1761
5	0,6	250,7	60,0	0,3756	0,0196	0,4287	0,1761
6	0,6	30	60,0	0,3756	0,0196	0,4287	0,1761
7	0,6	30	16,8	0,3756	0,0196	0,4287	0,1761
8	0,6	30	9,0	0,3756	0,0196	0,4287	0,1761
9	0,6	30	34,2	0,3756	0,0196	0,4287	0,1761
10	0,6	-168,1	16,8	0,3756	0,0196	0,4287	0,1761
11	0,6	-130,6	9,0	0,3756	0,0196	0,4287	0,1761
12	0,6	-119,7	34,2	0,3756	0,0196	0,4287	0,1761
13	0,6	-150,4	60,0	0,3756	0,0196	0,4287	0,1761
14	0,6	-150,4	55,21	0,3358	0,0212	0,4553	0,1877
15	0,6	-150,4	4,79	0,8347	0	0,1228	0,0424
16	22,0	-135,6	4,79	0,8347	0	0,1228	0,0424
17	0,6	-151,8	55,21	0,3358	0,0212	0,4553	0,1877
18	0,596	-177,5	35,04	0,0023	0,0335	0,6782	0,2860
19	0,6	-140,7	20,17	0,9152	0	0,0679	0,0168
20	0,6	-140,8	20,17	0,9152	0	0,0679	0,0168
21	0,115	-194,6	35,04	0,0023	0,0335	0,6782	0,2860
22	0,6	250,7	6,0	0,3756	0,0196	0,4287	0,1761
23	22,0	-124,7	20,17	0,9152	0	0,0679	0,0168
24	0,115	-194,6	35,04	0,0023	0,0335	0,6782	0,2860
25	0,115	-172,8	35,04	0,0023	0,0335	0,6782	0,2860
26	0,115	11,00	35,04	0,0023	0,0335	0,6782	0,2860
27	22,0	17,16	4,79	0,8348	0	0,1228	0,0424
28	22,0	-3,17	20,17	0,9153	0	0,0679	0,0168

Очевидно, что предложенная схема низкотемпературного разделения многокомпонентных углеводородных смесей и представленное математическое описание про-

цессов, происходящих в ее функциональных элементах, являются удовлетворительными в рамках поставленной задачи и показывают возможность ее реализации. Однако это не исключает возможность определения более эффективного варианта, для поиска которого в дальнейшем можно сформулировать и решить соответствующую задачу оптимизации.

6. Выводы

1. На основе разработанных в предыдущих публикациях [11–13] математических моделях отдельных функциональных элементов энерготехнологической установки в работе представлено математическое описание процесса разделения многокомпонентных углеводородных смесей, образующихся при газификации отходов, в виде системы уравнений.

2. Используя итерационный метод Ньютона-Рафсона для решения системы уравнений, в каждом характерном сечении энерготехнологической установки определены значения температуры, давления, массового расхода потока и массовых долей компонентов углеводородной газовой смеси. При этом могут быть получены два потока с массовой долей метана 91,5 % и 83,4 %, используемые как моторное топливо, а третий поток в качестве топливного газа годится для поддержания процесса газификации отходов.

Литература

1. Экологи: На каждого украинца приходится 750 тонн мусора [Электронный ресурс] // Корреспондент.net. — 4 сентября 2013. — Режим доступа: \www/URL: http://korrespondent.net/ukraine/1599674-ekologi-na-kazhdogo-ukrainca-prihoditsya-750-tonn-musora
2. Патон, Б. Е. Перспективы применения плазменных технологий для уничтожения и переработки медицинских и других опасных отходов [Текст] / Б. Е. Патон, А. В. Чернец, Г. С. Маринский, С. В. Петров // Современная электрометаллургия. — 2005. — № 3. — С. 54–63.
3. Бернадинер, М. Н. Высокотемпературная обработка отходов. Плазменные источники энергии [Текст] / М. Н. Бернадинер, И. М. Бернадинер // Твердые бытовые отходы. — 2011. — № 4. — С. 1–19.
4. Park, H.-S. Medical Waste Treatment Using Plasma [Text] / H.-S. Park, B.-J. Lee, S.-J. Kim // Journal of Industrial and Engineering Chemistry. — 2005. — Vol. 11, № 3. — P. 353–360.
5. Zhang, Q. Properties and optimizing of a plasma gasification & melting process of municipal solid waste [Text] / Q. Zhang, L. Dor, W. Yang, W. Blasiak // Proceedings of International Conference of Thermal Treatment Technology & Hazardous Waste Combustors (IT3/HWC). — San Francisco, California, USA, 2010. — P. 296–316.
6. Lemmens, B. Assessment of plasma gasification of high caloric waste streams [Text] / B. Lemmens, H. Elslander, I. Vanderreydt, K. Peys, L. Diels, M. Oosterlinck, M. Joos // Waste Management. — 2007. — Vol. 27, № 11. — P. 1562–1569. doi:10.1016/j.wasman.2006.07.027
7. Falcucci, G. Integrated numerical and experimental study of a MCFC-plasma gasifier energy system [Text] / G. Falcucci, E. Jannelli, M. Minutillo, S. Ubertaini, J. Han, S. P. Yoon, S. W. Nam // Applied Energy. — 2012. — Vol. 97. — P. 734–742. doi:10.1016/j.apenergy.2012.01.060
8. Themelis, N. J. Technical and economic analysis of Plasma-assisted Waste-to-Energy processes [Text] / N. J. Themelis, M. J. Castaldi. — Columbia: Columbia University, 2010. — 79 p.
9. Livits, J. Предложение по оборудованию для обработки отходов посредством плазменного реактора и импульсной системы питания для Калининградской области, Россия [Текст] / J. Livits, A. McKenna, F. Seif // Проект компаний «Американское торговое партнерство в России», S.A.A. International holdings corp. (CANADA) ltd и Dutemp corp. — 2007. — 51 с.

10. Кобрин, В. Н. Система управления экологической безопасностью при утилизации твердых бытовых и производственных отходов [Текст] / В. Н. Кобрин, Н. В. Нечипорук, В. В. Вамболь // *Екологічна безпека*. — 2014. — Вып. 2(18). — С. 25–30.
11. Шахов, Ю. В. Математическая модель энерготехнологической установки для разделения многокомпонентных газовых смесей [Текст]: сб. науч. пр. / Ю. В. Шахов, И. И. Петухов, В. В. Вамболь // *Вісник НТУ «ХП»*. Сер. Математичне моделювання в техніці та технологіях. — 2015. — № 41(1150). — С. 134–139.
12. Вамболь, С. А. Матмодель расчета сепаратора и компрессора блока разделения газовых смесей при утилизации отходов [Текст] / С. А. Вамболь, Ю. В. Шахов, В. В. Вамболь, И. И. Петухов // *Технологический аудит и резервы производства*. — 2016. — № 1/1(27). — С. 50–53. doi:10.15587/2312-8372.2016.58619
13. Вамболь, С. А. Математическое описание процессов разделения газовых смесей, образующихся при термической утилизации отходов [Текст] / С. А. Вамболь, Ю. В. Шахов, В. В. Вамболь, И. И. Петухов // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. — 2016. — № 1/2(79). — С. 35–41. doi:10.15587/1729-4061.2016.60486

МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС ПРОЦЕСІВ В УСТАНОВЦІ ПОДІЛУ ГАЗОВИХ СУМІШЕЙ ПРИ УТИЛІЗАЦІЇ ВІДХОДІВ

Подано систему рівнянь матеріального і енергетичного балансу для розрахунку стаціонарного режиму роботи енерготехнологічної установки низькотемпературного поділу багатоконпонентних вуглеводневих сумішей, що утворилися при газифікації відходів. Отримано компонентний склад потоків: один — паливний газ, придатний для підтримання процесу газифікації відходів, два інших — компримований продукт (аналог автомобільного компримованого природного газу).

Ключові слова: утилізація, відходи, екологічна безпека, математичне моделювання, багатоконпонентні вуглеводневі суміші, низькотемпературний поділ.

Вамболь Сергей Александрович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной механики, Национальный университет гражданской защиты Украины, Харьков, Украина.

Шахов Юрий Васильевич, старший научный сотрудник, кафедры аэрокосмической теплотехники, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Украина.

Вамболь Виола Владиславовна, кандидат технических наук, доцент, кафедра химии, экологии и экспертных технологий, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Украина, e-mail: violavambol@gmail.com.

Петухов Илья Иванович, кандидат технических наук, доцент, кафедра аэрокосмической теплотехники, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Украина.

Вамболь Сергей Александрович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной механики, Национальный университет гражданской защиты Украины, Харьков, Украина.

Шахов Юрий Васильевич, старший научный сотрудник, кафедры аэрокосмической теплотехники, Национальный аэрокосмический университет им. М. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Украина.

Вамболь Виола Владиславовна, кандидат технических наук, доцент, кафедра химии, экологии та экспертных технологий, Национальный аэрокосмический университет им. М. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Украина.

Петухов Илья Иванович, кандидат технических наук, доцент, кафедра аэрокосмической теплотехники, Национальный аэрокосмический университет им. М. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Украина.

Vambol Sergij, National University of Civil Protection of Ukraine, Kharkiv, Ukraine.

Shakhov Yurij, Zhukovsky National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Ukraine.

Vambol Viola, Zhukovsky National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Ukraine, e-mail: violavambol@gmail.com.

Petukhov Ilya, Zhukovsky National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Ukraine.

УДК 621.327

DOI: 10.15587/2312-8372.2016.71486

**Семенов А. О.,
Кожушко Г. М.,
Сахно Т. В.**

ЗНЕЗАРАЖЕННЯ ВОДИ КОМБІНОВАНИМИ МЕТОДАМИ — УФ-ВИПРОМІНЮВАННЯ В ПОЄДНАННІ З ІНШИМИ ТЕХНОЛОГІЯМИ

В роботі представлені результати дослідження знезараження води УФ-випромінюванням в поєднанні з іншими фізичними безреагентними і хімічними реагентними технологіями. Проведенні дослідження УФ-методу в поєднанні з хлоруванням, озонуванням, з використанням ультразвуку та високих і низьких частот. Вказані переваги і недоліки комбінованих методів.

Ключові слова: УФ-випромінювання, УФ-знезараження, комбіновані методи, озонування, хлорування, ультразвук, НВЧ-частоти.

1. Вступ

Вода — це найбільш важливий компонент життя всіх живих організмів. Вона є невід'ємним показником для рослинного і тваринного світів, а також і для самої лю-

дини. Якість води визначається комплексом її хімічних, біологічних компонентів та фізичних властивостей, які зумовлюють придатність води для водокористування [1].

У середині ХХ сторіччя почався інтенсивний пошук альтернативних способів знезараження води. Одним