



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

## МАТМОДЕЛЬ РАСЧЕТА СЕПАРАТОРА И КОМПРЕССОРА БЛОКА РАЗДЕЛЕНИЯ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ ПРИ УТИЛИЗАЦИИ ОТХОДОВ

*В статье рассмотрены вопросы разделения потоков газовых смесей при реализации технологического процесса экологически безопасной утилизации отходов. Разработаны математические модели функциональных элементов энерготехнологической установки разделения многокомпонентных газовых смесей, полученных при утилизации отходов. В исследовании описана модель комплекса как единого целого и как исполнительной части системы управления экологической безопасностью процесса утилизации отходов.*

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

### 1. Введение

Отходы, накопленные на полигонах для захоронения и стихийных свалках, являются источниками формирования экологической опасности. Одной из наиболее актуальных задач, не только для Украины, но и для многих других стран мира, является снижение количества уже имеющихся отходов. При этом процесс их утилизации должен быть экологически безопасным и экономически эффективным, т. е. в результате их утилизации должны быть получены вторичные материальные или энергетические ресурсы.

Газификация отходов с последующим дожиганием отходящих газов является наиболее безопасным с экологической точки зрения способом их утилизации. В целях получения топливных продуктов (энергетических ресурсов) установка для экологически безопасной и эффективной утилизации отходов [1–3] включает в себя блок низкотемпературного разделения потоков многокомпонентных газовых смесей (МГС), образованных при газификации отходов. Этот блок представляет собой сложную энерготехнологическую установку (ЭТУ), состоящую из большого числа функциональных элементов. При создании основных технологических устройств предполагается проведение термодинамического анализа многокомпонентного двухфазного потока и расчет его параметров. В настоящей работе представлено математическое описание двух основных элементов установки — сепаратора и компрессора.

### 2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Экспериментально доказано, что синтез-газ, полученный при плазменной технологии утилизации, более калорийный, чем при традиционной газификации [4–6]. Проблеме утилизации отходов с получением полезного продукта в виде тепла, электрической энергии или синтетического газа уделяют внимание ученые США, Швейцарии, Германии, Японии, Кореи, Беларуси, Украи-

ны и других стран [7–11]. При этом, как правило, решаются задачи создания перерабатывающего комплекса для многотоннажной утилизации отходов, т. е. расчет на большую производительность для обеспечения рентабельности. Разработаны также технологии, в которых используется процесс метанирования для преобразования синтез-газа в газообразный метан путем применения экзотермических реакций окиси и двуокиси углерода с водородом. Однако ввиду сложности обеспечения нужного соотношения реагирующих компонентов для полного их преобразования в метан состав полученного топливного газа может не соответствовать требованиям стандартов, а следовательно, быть товарным продуктом.

Применение низкотемпературного разделения потоков МГС позволяет утилизировать отходы и наряду с производством тепловой и электрической энергии получать газообразные или сжиженные топливные продукты, которые можно хранить и транспортировать. В работе [12], которая является началом данного исследования, авторами разработана схема сложной ЭТУ для разделения МГС как часть комплекса энергетических и технологических блоков для утилизации отходов.

### 3. Объект, цель и задачи исследования

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

*Целью исследования* является математическое описание процессов в сепараторе и компрессоре — функциональных элементах сложной энерготехнологической установки для разделения многокомпонентных газовых смесей, образующихся при газификации отходов.

Для достижения цели исследования были поставлены и решены следующие задачи:

- разработка математической модели расчета сепаратора как функционального элемента сложной ЭТУ разделения потоков МГС;
- разработка математической модели расчета компрессора как функционального элемента сложной ЭТУ разделения потоков МГС.

#### 4. Математическая модель расчета сепаратора

Для расчета сепаратора, который осуществляет разделение паровой и жидкой фаз многокомпонентного двухфазного потока, используется адиабатная изоэнтальпийная модель. В этой модели как исходные данные принимаются расход, состав, давление и температура потока на входе в сепаратор. В целях определения предельно достижимых параметров сепаратора предполагается полное разделение фаз, а гидравлические потери принимаются равными нулю.

Энтальпия многокомпонентного двухфазного потока на входе в сепаратор определяется выражением:

$$i_{1\_сеп} = \sum_{i=1}^N g_i \cdot i_i(P_1, T_1), \quad (1)$$

где  $g_i$  — массовые доли компонентов многокомпонентного потока [13],  $i_i$  — удельная энтальпия  $i$ -го компонента потока на входе в детандер, определяемая по известным входным параметрам (температуре  $T_1$  и давлению  $P_1$ ).

Для определения составов парового и жидкостного продуктов, получаемых на выходе из сепаратора, используется комплект подпрограмм расчетов коэффициентов теплофизических свойств рабочих тел, который базируется на уравнении состояния Пенга-Робинсона. В частности, для двухфазных потоков рассчитывается состав паровой и жидкой фаз при условии их термического равновесия. В принятой математической модели сепаратора должно выдерживаться следующее соотношение входных и выходных параметров потоков:

$$P_1 = P_2; \quad T_1 = T_2.$$

При этом на выходе из сепаратора получаем следующие значения удельных энтальпий паровой и жидкой фаз:

$$i_{v2\_сеп} = \sum_{i=1}^N g_{vi} \cdot i_{vi}(P_2, T_2); \quad (2)$$

$$i_{l2\_сеп} = \sum_{i=1}^N g_{li} \cdot i_{li}(P_2, T_2). \quad (3)$$

Тогда массовый расход потоков на выходе из сепаратора может быть рассчитан в соответствии с выражениями:

$$G_1 \cdot i_{1\_сеп} = G_{L2} \cdot i_{L2\_сеп} + G_{V2} \cdot i_{V2\_сеп}; \quad (4)$$

$$G_1 = G_{L2} + G_{V2}, \quad (5)$$

где  $G_1$  — массовый расход сепарируемого двухфазного потока;  $G_{L2}$ ,  $G_{V2}$  — массовые расходы разделенных в сепараторе жидкой и паровой фаз.

#### 5. Математическая модель расчета компрессора

Расчет компрессора для сжатия теплоносителя в газобразном виде сводится к определению давления и температуры потока на выходе из компрессора, а также потребной мощности привода компрессора.

Для описания компрессора используются характеристики в виде зависимостей степени сжатия  $\pi_K$  и адиабатного коэффициента полезного действия  $\eta_{АД}$  от объемного расхода рабочего тела, представленные в виде полиномов:

$$\pi_K = A_K + B_K \cdot Q + C_K \cdot Q^2 + D_K \cdot Q^3 + \dots, \quad (6)$$

где  $A_K, B_K, C_K, D_K$  — коэффициенты полинома, описывающего зависимость степени сжатия компрессора данной модели от объемного расхода;

$$\eta_{АД} = A_{АД} + B_{АД} \cdot Q + C_{АД} \cdot Q^2 + D_{АД} \cdot Q^3 + \dots, \quad (7)$$

где  $A_{АД}, B_{АД}, C_{АД}, D_{АД}$  — коэффициенты полинома, характеризующие зависимость адиабатного коэффициента полезного действия данной модели компрессора от объемного расхода.

Объемный расход  $Q$  определяется из известного массового расхода  $G$  и параметров потока на входе в компрессор (условий всасывания):

$$Q = G/\rho_0, \quad (8)$$

где  $\rho_0$  — плотность рабочего тела, которая находится с помощью программы для определения коэффициентов теплофизических свойств рабочих тел по известному давлению  $P_1$  и температуре  $T_1$  смеси на входе в компрессор.

Для полученного значения объемного расхода  $Q$  определяется степень сжатия  $\pi_K$ , используемая затем для определения давления на выходе из компрессора  $P_2$ :

$$P_2 = P_1 \cdot \pi_K. \quad (9)$$

Температура рабочего тела на выходе из компрессора определяется при условии адиабатного сжатия потока:

$$T_{2АД} = T_1 \cdot \pi_K^{\left(\frac{k-1}{k}\right)}, \quad (10)$$

где  $k$  — показатель адиабаты.

Удельная работа при идеальном адиабатическом сжатии многокомпонентных смесей находится как разность удельных энтальпий для параметров на выходе и входе идеального компрессора:

$$L_{АД} = i(P_2, T_{2АД}) - i(P_1, T_1). \quad (11)$$

Значения удельных энтальпий определяются с помощью программы для определения коэффициентов теплофизических свойств рабочих тел.

Тогда действительная удельная работа, подводимая к компрессору:

$$L_{ДК} = L_{АД} / \eta_{АД}. \quad (12)$$

Адиабатный коэффициент полезного действия  $\eta_{АД}$  для данной модели компрессора определяется по объемному расходу  $Q$ .

Температура рабочего тела на выходе из компрессора определяется с помощью программы для определения коэффициентов теплофизических свойств рабочих тел по известным значениям давления и удельной энтальпии потока в сечении выхода:

$$i(P_2, T_2) = i(P_1, T_1) + \frac{L_{АД}}{\eta_{АД}}. \quad (13)$$

Мощность компрессора (потребляемая работа за единицу времени):

$$N_k = \frac{G \cdot L_{АД}}{\eta_{АД}}. \quad (14)$$

После выполнения всей описанной последовательности действий расчет компрессора считается завершённым.

## 6. Обсуждение результатов исследования термодинамических параметров функциональных элементов энерготехнологической установки

Данная работа является частью научного исследования по созданию экономически эффективного технологического процесса утилизации отходов. Начало исследования представлено в работе [12], где предложена методика расчета сложных энерготехнологических схем, описаны исходные параметры и допущения и разработаны математические модели расчета насоса, детандера и рекуперативного теплообменника. Наряду с этим будут представлены научные работы по созданию математических моделей других функциональных элементов.

В совокупности математические модели расчета функциональных элементов ЭТУ, полученные в данном исследовании и проведенных ранее, являются основой для создания системы уравнений всей установки в целом.

В приведенной последовательности действий разработанных математических моделей расчета функциональных элементов использован классический подход и общепринятые соотношения термодинамики, в том числе уравнение состояния Пенга-Робинсона для описания коэффициентов теплофизических свойств рабочих тел, что обеспечивает достоверность расчетов и возможность моделирования приемлемого с технической точки зрения варианта компоновки ЭТУ в целях ее практической реализации.

## 7. Выводы

По результатам данного исследования можно сделать следующие выводы.

1. Используя классический подход и общепринятые соотношения термодинамики, в том числе уравнение

состояния Пенга-Робинсона для описания коэффициентов теплофизических свойств рабочих тел, в данной части исследования разработаны математические модели функциональных элементов установки утилизации отходов — адиабатного изоэнтальпийного сепаратора и адиабатного компрессора.

2. Для последующей реализации технологического процесса экологически безопасной утилизации отходов необходима разработка математических моделей для расчета теплообменника-охладителя (аппарата воздушного охлаждения) и ректификационной колонны.

## Литература

1. Вамболь, В. В. Обеспечение экологической безопасности при обращении с отходами [Текст] / В. В. Вамболь, В. Н. Кобрин, Н. В. Нечипорук // Международный научно-исследовательский журнал. — Екатеринбург, 2014. — № 11–2(30). — С. 8–10.
2. Чубенко, А. С. Экологически чистая утилизация отходов жизнедеятельности [Текст] / А. С. Чубенко, В. Н. Кобрин, В. В. Вамболь // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. — X.: ХАИ, 2013. — Вып. 62. — С. 98–102.
3. Кобрин, В. Н. Система управления экологической безопасностью при утилизации твердых бытовых и производственных отходов [Текст] / В. Н. Кобрин, Н. В. Нечипорук, В. В. Вамболь // Экологічна безпека. — Кременчук: КрНУ, 2014. — Вып. 2(18). — С. 25–30.
4. 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.
5. 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
6. 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
7. 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.
8. Park, H.-S. Medical Waste Treatment Using Plasma [Text] / H.-S. Park, B.-J. Lee, S.-J. Kim // Industrial & Engineering Chemistry. — 2005. — Vol. 11, № 3. — P. 353–360.
9. Ha, S. A. Waste incineration [Text] / S. A. Ha, H. J. Son, N. C. Sung // J. Korea Society of Waste Management. — 2000. — Vol. 17. — 665 p.
10. Park, H.-S. The formation of dioxins from waste incineration [Text] / H.-S. Park, J. D. Chung // J. Korea Society of Waste Management. — 2001. — Vol. 18. — 302 p.
11. Park, H.-S. Secondary environmental problem during incineration [Text] / H.-S. Park, B. J. Lee // J. Korea Society of Waste Management. — 2001. — Vol. 218. — 722 p.
12. 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.
13. Стаскевич, Н. Л. Справочник по газоснабжению и использованию газа [Текст] / Н. Л. Стаскевич, Г. Н. Северинец, Д. Я. Вигдорчик. — Л.: Недра, 1990. — 762 с.

## МАТМОДЕЛЬ РОЗРАХУНКУ СЕПАРАТОРА І КОМПРЕСОРА БЛОКУ РОЗПОДІЛУ ГАЗОВИХ СУМІШЕЙ ПРИ УТИЛІЗАЦІЇ ВІДХОДІВ

У статті розглянуто питання поділу потоків газових сумішей при реалізації технологічного процесу екологічно безпечної

утилізації відходів. Розроблено математичні моделі функціональних елементів енерготехнологічної установки поділу багатокомпонентних газових сумішей, отриманих при утилізації відходів. У дослідженні описано модель комплексу як єдиного цілого і як виконавчої частини системи управління екологічною безпекою процесу утилізації відходів.

**Ключові слова:** утилізація, відходи, екологічна безпека, математичне моделювання, багатокомпонентні газові 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, кафедра аэрокосмической теплотехники, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Украина.*

*Вамболь Виола Владиславовна, кандидат технических наук, доцент, кафедра химии, экологии и экспертизных 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, кафедра аэрокосмической теплотехники, Национальный аэрокосмический университет им. М. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Украина.*

*Вамболь Виола Владиславовна, кандидат технических наук, доцент, кафедра химии, экологии и экспертизных 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 Yuriy, 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 544.726

DOI: 10.15587/2312-8372.2016.58747

**Афонін Г. Г.,  
Безносик Ю. О.,  
Дзязько Ю. С.,  
Складанний Д. М.,  
Бондаренко О. С.**

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВИЛУЧЕННЯ ІОНІВ НІКЕЛЮ ІЗ КОМБІНОВАНИХ РОЗЧИНІВ

Досліджено вилучення іонів  $Ni^{2+}$  з комбінованого розчину з використанням сильноокислотної гелевої катіонообмінної смоли та композиційного іоніту на її основі, що містить агрегати наночасток гідрофосфату цирконію. За допомогою планування експерименту отримано моделі процесу вилучення іонів  $Ni^{2+}$  з розчину за допомогою полімерного та органо-неорганічного іоніту.

**Ключові слова:** іонообмін, очистка води, іони нікелю, кальцію, магнію, математична модель, планування експерименту.

### 1. Вступ

Інтенсивне зростання промислового виробництва й енергетики, освоєння природних ресурсів і розвитку сільськогосподарства в районах з обмеженими джерелами прісної води, ріст народонаселення створюють в усьому світі дефіцит прісної води. Поряд з цим, розвиток деяких галузей промисловості, зокрема, таких як оптична, фармацевтична, хімічна обумовлює зростання необхідності у воді з високим ступенем очищення. У той же час збільшуються обсяги стічних вод, які, у свою чергу, впливають на навколишнє середовище і стан водних басейнів. Насичення природного середовища шкідливими речовинами зокрема токсичними важкими металами стає все більш усвідомлюваною небезпекою для нормальної життєдіяльності і здоров'я людства.

В наш час глибоке очищення води здійснювалось, в основному, з використанням іонного обміну. Іонний

обмін успішно доповнює процеси коагуляції, баромембранної фільтрації, зокрема зворотного осмосу тощо. Іонний обмін використовується для вирішення багатьох наукових і практичних задач: для концентрування іонів з метою їх подальшого аналітичного визначення, вилучення токсичних та цінних компонентів із рідких промислових відходів, отримання пом'якшеної і питної води тощо. Застосування іонного обміну у промисловості потребує кількісної оцінки перебігу процесів.

Тому проблема розробки ефективних способів очищення води від небажаних домішок залишається вельми актуальною.

### 2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Дослідження процесів іонного обміну потребує значних затрат часу та матеріальних ресурсів. Для розрахунків