

*Обговорюються питання математичного опису поділу потоків газових сумішей при реалізації технологічного процесу екологічно безпечної утилізації відходів. Проведено розроблення математичних моделей окремих функціональних елементів складної енерготехнологічної установки низькотемпературного поділу багатокомпонентних газових сумішей, отриманих при утилізації відходів. У цій частині дослідження наведено математичні моделі розрахунку таких агрегатів установки, як теплообмінник-охолоджувач і ректифікаційна колона*

*Ключові слова: утилізація, відходи, екологічна безпека, багатокомпонентні газові суміші, низькотемпературний поділ, енергоносій*

*Обсуждаются вопросы математического описания разделения потоков газовых смесей при реализации технологического процесса экологически безопасной утилизации отходов. Проведена разработка математических моделей отдельных функциональных элементов сложной энерготехнологической установки низкотемпературного разделения многокомпонентных газовых смесей, полученных при утилизации отходов. В данной части исследования представлены математические модели расчета таких агрегатов установки, как теплообменник-охладитель и ректификационная колонна*

*Ключевые слова: утилизация, отходы, экологическая безопасность, многокомпонентные газовые смеси, низкотемпературное разделение, энергоноситель*

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАЗДЕЛЕНИЯ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОЙ УТИЛИЗАЦИИ ОТХОДОВ

**С. А. Вамболь**

Доктор технических наук,  
профессор, заведующий кафедрой  
Кафедра прикладной механики  
Национальный университет гражданской защиты Украины  
ул. Чернышевская, 94, г. Харьков, Украина, 61000  
E-mail: sergvambol@gmail.com

**Ю. В. Шахов**

Старший научный сотрудник\*  
E-mail: k205@mail.ru

**В. В. Вамболь**

Кандидат технических наук, доцент\*\*  
E-mail: violavambol@gmail.com

**И. И. Петухов**

Кандидат технических наук, доцент\*  
E-mail: ilya2950@gmail.com

\*Кафедра аэрокосмической теплотехники\*\*\*

\*\*Кафедра химии, экологии и  
экспертных технологий\*\*\*

\*\*\*Национальный аэрокосмический университет  
им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт»  
ул. Чкалова, 17, г. Харьков, Украина, 61070

## 1. Введение

Появление новых технологий и материалов, рост населения и сферы потребления приводит к появлению и быстрому увеличению объемов отходов, опасных для окружающей природной среды. Проблема отходов сопровождает не только Украину, она актуальна для всего мира.

В окружающей среде отходы являются, с одной стороны, загрязнением, занимающим в ней (окружающей среде) определенное пространство и оказывающим негативное воздействие на другие живые и неживые объекты и субстанции, а с другой стороны – вторичными материальными и энергетическими ресурсами для возможной утилизации или рекуперации непосредственно вслед за образованием или после соответствующей переработки. При этом под переработкой отходов понимается осуществление любых техно-

логических операций, связанных с изменением физических, химических или биологических свойств отходов в целях подготовки их к экологически безопасному хранению, перевозке, утилизации или удалению.

Под утилизацией отходов понимаем их использование в качестве вторичных материальных или энергетических ресурсов.

Решение проблемы накопления отходов заключается в создании экологически безопасных и экономически эффективных технологий их утилизации.

Для утилизации отходов часто применяют термические методы, среди которых наиболее полное разложение материалов отходов на простые вещества обеспечивает газификация с применением генераторов плазмы. Этот процесс отличается значительной сложностью и предполагает затраты, сопоставимые со стоимостью производства первичной продукции, а в отдельных случаях – существенно превышает ее. Сни-

зять эти затраты позволяет реализация экологически безопасной технологии утилизации отходов, описанной в работах [1–3]. Данная технология исключает образование высокотоксичных соединений и обеспечивает полное извлечение углерода из материала отходов, в то время как при сжигании отходов в твердом остатке остается до 30 % углерода. Технологический комплекс, реализующий данную технологию, позволяет утилизировать опасные отходы и наряду с производством тепловой и электрической энергии получать газообразные или сжиженные топливные продукты, которые могут быть подвергнуты хранению и транспортировке. Схематически технологический процесс такой утилизации показан на рис. 1.

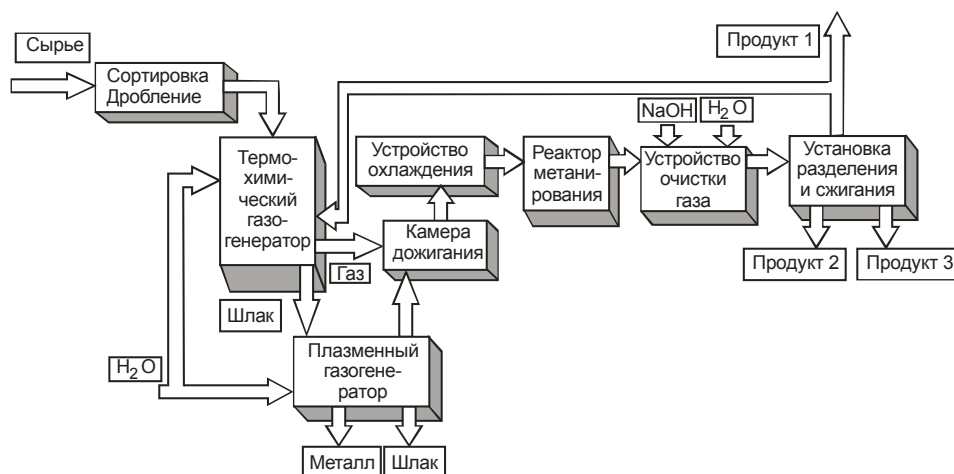


Рис. 1. Схема технологического процесса утилизации опасных отходов

Одним из компонентов данного технологического комплекса является энерготехнологическая установка (ЭТУ) для низкотемпературного разделения полученных многокомпонентных газовых смесей (МГС) в целях выделения топливных продуктов.

## 2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Во всем мире ученые уделяют большое внимание вопросам использования отходов как вторичных энергетических ресурсов. В исследовании [4] авторы показали процесс формирования диоксинов при тепловой обработке отходов, научно обосновали эффективность борьбы с ними при оснащении установки утилизации разработанной системой очистки и экспериментально подтвердили это работе [5]. На основе анализа современных технологий переработки отходов, авторами научной статьи [6] наиболее эффективным признан термический высокотемпературный метод, так как под действием высоких температур органические составляющие опасных отходов разлагаются и окисляются до безвредных продуктов горения. Перспективы применения плазменных технологий для уничтожения и переработки отходов с одновременным обеспечением экологической безопасности представлены в работе [7]. Анализ и обобщение опыта использования генераторов плазмы для высокотемпературной переработки и обезвреживания различных видов отходов показал

основные варианты их применения [8]. Несмотря на то, что плазменные технологии на современном этапе хорошо изучены и освоены, широкого применения для утилизации бытовых отходов они не получили. Авторы статьи [9] констатируют, что при большом количестве преимуществ плазменной газификации отходов имеется и недостаток – большое потребление энергии генераторами плазмы. При этом предлагается полученный синтез-газ использовать для выработки тепла, электроэнергии или в качестве химического сырья. Перечень действующих плазменных установок представлен в коммерческом предложении [10], из которого видно, что в настоящее время в эксплуатации находятся всего четыре установки производительностью более 100 т/сут, использующие генераторы плазмы.

Наиболее часто решаются задачи разработки перерабатывающего комплекса для многотоннажной утилизации отходов.

Проведение процесса газификации при температуре более 1200 °С, которая обеспечивается применением плазменных генераторов, позволяет избежать появления в синтез-газе жидких фракций (смола). Высокая температура процесса обеспечивает разрушение токсичных органических составляющих отходов, и, при наличии в

отходах хлорсодержащих примесей, исключает вторичное образование токсичных веществ [11]. Экспериментальные исследования ученых показали, что синтез-газ, полученный при плазменной технологии утилизации, более калорийный, чем при традиционной газификации [12]. Учеными получены параметры паровой газификации в демо-реакторе, при которых генерируется максимально количество синтез-газа [13]. Однако содержание в нем метана недостаточно для получения топливного продукта, который соответствовал бы требованиям нормативных актов, например по топливу для заправки автотранспорта. Поэтому в соответствии с технологией [2] предлагается синтез-газ обогащать метаном в реакторе метанирования. Исследования работы [14] показывают преимущества обогащения синтез-газа метаном, а описание процессов в разработанном для экспериментальных исследований метанаторе представлены в работе [15].

После обогащения метаном газ подается в ЭТУ для низкотемпературного разделения полученных многокомпонентных газовых смесей [16]. В результате процесса разделения образуется сжиженный метан, сжиженный метан-содержащий газ и топливный газ для отопления, получения электроэнергии или поддержания процесса газификации в термохимическом газогенераторе.

Базовая схема блока низкотемпературного разделения газовой смеси с повышенным содержанием метана показана на рис. 2.

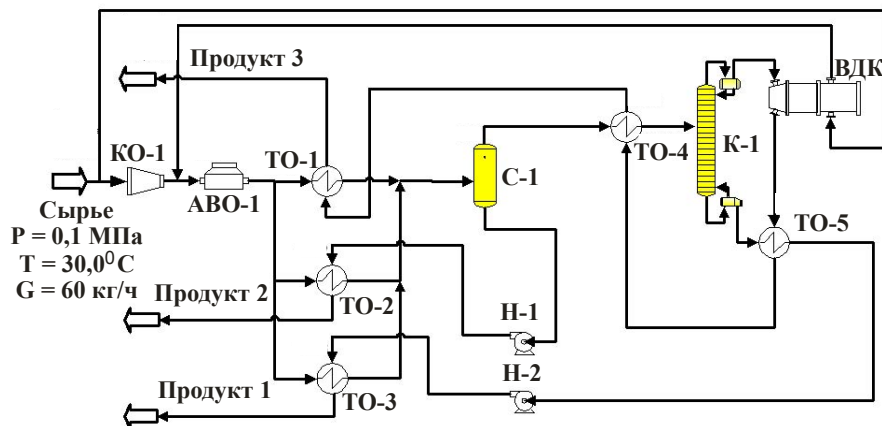


Рис. 2. Базовая схема ЭТУ для разделения многокомпонентных газовых смесей:  
 КО-1 – компрессор; АВО-1 – аппарат воздушного охлаждения; ТО-1, ТО-2, ТО-3,  
 ТО-4, ТО-5 – теплообменник; Н-1, Н-2 – насос; С-1 – сепаратор;  
 К-1 – ректификационная колонна; ВДК – волновой детандер-компрессор

Общая технологическая схема процесса получения полезного продукта в виде топлива может быть описана следующей последовательностью.

Газ после очистки от вредных примесей и сероводорода осушивается в блоке адсорбционной осушки (на схеме не показан). Далее происходит процесс сжатия в компрессоре КО-1 с последующим охлаждением в аппарате воздушного охлаждения АВО-1 до температуры окружающей среды. В последующем газ разделяется на три потока и направляется в теплообменники ТО-1, ТО-2, ТО-3 для охлаждения обратными потоками продуктов.

После объединения всех трех потоков газ поступает в сепаратор С-1, где отделяется жидкая фаза (продукт № 2). Затем давление полученного жидкого продукта в насосе Н-1 поднимается до 22 МПа. Газообразная фаза из сепаратора С-1 охлаждается в теплообменнике ТО-4 и поступает на ректификационную колонну К-1. Из конденсатора колонны в верхней части отбирается газообразный продукт № 1, представляющий собой смесь  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$  и  $\text{N}_2$ . Этот газ, проходя через детандерную часть волнового детандер-компрессора (ВДК), совершает работу расширения, которая используется для сжатия части исходного газа параллельно компрессору КО-1. В обратном потоке этот газ проходит через теплообменники ТО-5, ТО-4 и ТО-1, охлаждая последовательно продукт № 3 и прямой поток входящего газа. Из ребойлера ректификационной колонны К-1 отбирается продукт № 3, обогащенный метаном, который сжимается насосом до давления 22 МПа и подогревается в теплообменнике ТО-3, после чего в виде компримированного газа может использоваться, например, для заправки автомобилей.

Для достоверного расчета параметров блока низкотемпературного разделения требуется разработка математических моделей отдельных функциональных элементов. В работе [17], которая является началом данного исследования, описаны исходные данные и принятые допущения для математического описания процессов в ЭТУ для достоверного расчета ее параметров. В этой работе также разработаны математические модели турбодетандера, рекуперативного теплообменника и насоса.

### 3. Цель и задачи исследования

Целью исследования является разработка математических моделей расчета теплообменника-охладителя и ректификационной колонны для получения достоверного и приемлемого с технической точки зрения значения площади теплообменника, а так же компонентного состава исходного продукта, входящего в ректификационную колонну, и компонентных составов исходящих из нее конечных продуктов.

Для достижения цели исследования были поставлены и решены следующие задачи:

- разработка математической модели расчета теплообменника-охладителя как функционального элемента ЭТУ разделения потоков МГС;
- разработка математической модели расчета ректификационной колонны как функционального элемента ЭТУ разделения потоков МГС.

### 4. Математическая модель теплового расчета теплообменника-охладителя (аппарата воздушного охлаждения)

При разработке математической модели расчета аппарата воздушного охлаждения (АВО) предполагается, что прямой поток охлаждаемого теплоносителя может быть в паровом, двухфазном и жидком состояниях. Однако обратный поток охлаждающего воздуха не меняет свое фазовое состояние, оставаясь в газообразном состоянии. Для расчета АВО при принятых ранее допущениях [17] производится его условное расчленение на три секции: в первой секции прямой поток теплоносителя охлаждается до температуры насыщения (температуры в пинч-точке), во второй секции происходит конденсация теплоносителя, в третьей секции – дальнейшее переохлаждение жидкой фазы теплоносителя. В обратном потоке охлаждающего воздуха происходит его нагрев без изменения фазового состояния. Дополнительные сложности связаны со свойствами многокомпонентных сред. В частности, температура конденсации однокомпонентного рабочего тела при постоянном давлении является величиной постоянной, тогда как для многокомпонентной смеси в ходе испарения или конденсации происходит изменение температуры процесса. Таким образом, при расчете АВО обязательным является нахождение положения пинч-точки, определяемое температурой и давлением каждого из теплоносителей на входе в АВО, а также расходом теплоносителей.

Для каждой из частей записывается система уравнений.

Для первой секции:

$$Q_{\text{АВО1}} = M_{\text{ТП}} \cdot (i_{\text{ТП}}(T_{\text{ТП\_IN}}) - i_{\text{ТП}}(T_{\text{ТП\_PP}})), \quad (1)$$

$$Q_{ABO1} = M_{ВОЗД} \cdot (i_{ВОЗД}(T_{ВОЗД\_EX}) - i_{ВОЗД}(T_{ВОЗД\_PP})), \quad (2)$$

$$Q_{ABO1} = k_{ABO1} \cdot F_{ABO1} \cdot \overline{\Delta T_{ABO1}}, \quad (3)$$

где  $T_{ТП\_PP}$ ,  $T_{ВОЗД\_PP}$  – температуры теплоносителя и охлаждающего воздуха в пинч-точке соответственно;  $T_{ТП\_IN}$  – температура потока теплоносителя на входе в АВО;  $T_{ВОЗД\_EX}$  – температура охлаждающего воздуха на выходе из АВО;  $M_{ТП}$ ,  $M_{ВОЗД}$  – массовые расходы теплоносителя и охлаждающего воздуха соответственно;  $F$  – площадь теплообменной поверхности секции АВО;  $k$  – средний коэффициент теплопередачи секции АВО (берется из литературных источников);  $i_{ТП}$  – удельная энтальпия теплоносителя прямого потока при заданной температуре  $T$ ;  $i_{ВОЗД}$  – удельная энтальпия охлаждающего воздуха заданной температуры  $T$ ;  $\Delta T_{ABO1}$  – среднее значение температурного напора в секции АВО, при этом индекс 1 обозначает секцию АВО, в которой осуществляется охлаждение теплоносителя до температуры насыщения.

Поскольку в данном расчете не задаются геометрические параметры теплообменников, площадь  $F$  уточняется в процессе итераций при заданном среднем коэффициенте теплопередачи секции  $k$ .

Температура прямого потока теплоносителя в пинч-точке определяется как температура насыщения при известном давлении прямого потока  $P_{ТП}$  (или как температура начала процесса конденсации для многокомпонентного потока):

$$T_{ТП\_PP} = T_{COND\_BEGIN}(P_{ТП}). \quad (4)$$

Соответственно температура обратного потока в пинч-точке определяется таким образом:

$$T_{ВОЗД\_PP} = T_{ТП\_PP} - \Delta T_{MIN}. \quad (5)$$

Для нахождения величины среднего значения температурного напора первой секции АВО используется следующее соотношение:

$$\overline{\Delta T_{ABO1}} = \frac{(T_{ТП\_IN} - T_{ВОЗД\_EX}) - (T_{ТП\_PP} - T_{ВОЗД\_PP})}{\ln \left( \frac{(T_{ТП\_IN} - T_{ВОЗД\_EX})}{(T_{ТП\_PP} - T_{ВОЗД\_PP})} \right)}. \quad (6)$$

Система уравнений для второй секции имеет аналогичный вид:

$$Q_{ABO2} = M_{ТП} \cdot (i_{ТП}(T_{ТП\_PP}) - i_{ТП}(T_{ТП\_CS})), \quad (7)$$

$$Q_{ABO2} = M_{ВОЗД} \cdot (i_{ВОЗД}(T_{ВОЗД\_PP}) - i_{ВОЗД}(T_{ВОЗД\_CS})), \quad (8)$$

$$Q_{ABO2} = k_{ABO2} \cdot F_{ABO2} \cdot \overline{\Delta T_{ABO2}}, \quad (9)$$

где  $T_{ТП\_CS}$  – температура потока теплоносителя на выходе из второй секции (температура, соответствующая завершению процесса конденсации при давлении

потока теплоносителя);  $T_{ВОЗД\_CS}$  – температура потока охлаждающего воздуха на входе во вторую секцию.

Индекс АВО2 обозначает секцию АВО, в которой осуществляется конденсация теплоносителя.

Для нахождения величины среднего значения температурного напора второй секции АВО используется следующее соотношение:

$$\overline{\Delta T_{ABO2}} = \frac{(T_{ТП\_CS} - T_{ВОЗД\_CS}) - (T_{ТП\_PP} - T_{ВОЗД\_PP})}{\ln \left( \frac{(T_{ТП\_CS} - T_{ВОЗД\_CS})}{(T_{ТП\_PP} - T_{ВОЗД\_PP})} \right)}. \quad (10)$$

Система уравнений для третьей секции будет иметь вид

$$Q_{ABO3} = M_{ТП} \cdot (i_{ТП}(T_{ТП\_CS}) - i_{ТП}(T_{ТП\_EX})), \quad (11)$$

$$Q_{ABO3} = M_{ВОЗД} \cdot (i_{ВОЗД}(T_{ВОЗД\_CS}) - i_{ВОЗД}(T_{ВОЗД\_IN})), \quad (12)$$

$$Q_{ABO3} = k_{ABO3} \cdot F_{ABO3} \cdot \overline{\Delta T_{ABO3}}, \quad (13)$$

где  $T_{ТП\_EX}$  – температура потока теплоносителя на выходе из АВО;  $T_{ВОЗД\_IN}$  – температура потока охлаждающего воздуха на входе в АВО.

Индекс АВО3 обозначает секцию АВО, в которой осуществляется переохлаждение теплоносителя.

Для нахождения величины среднего значения температурного напора третьей секции АВО используется выражение

$$\overline{\Delta T_{ABO3}} = \frac{(T_{ТП\_CS} - T_{ВОЗД\_CS}) - (T_{ТП\_EX} - T_{ВОЗД\_IN})}{\ln \left( \frac{(T_{ТП\_CS} - T_{ВОЗД\_CS})}{(T_{ТП\_EX} - T_{ВОЗД\_IN})} \right)}. \quad (14)$$

Решение системы уравнений (1)–(14) позволяет определить температуры теплоносителя  $T_{ТП\_EX}$  и охлаждающего воздуха  $T_{ВОЗД\_EX}$  на выходе из АВО при заданном соотношении массовых расходов теплоносителя и воздуха.

### 5. Математическая модель процесса разделения многокомпонентных углеводородных смесей в ректификационной колонне

Разделение многокомпонентных углеводородных смесей с получением заданной доли какого-либо компонента может быть осуществлено в ректификационной колонне, включающей в себя тарельчатую секцию, ребойлер и конденсатор [18]. При этом исследуется заданный рекуперативный теплообменник с поперечным обтеканием охлаждающим воздухом одно- или многоходового (с поворотными коллекторами) горизонтального шахматного или коридорного пучка круглых гладких или оребренных труб и заданными параметрами на входе. Следова-



тельно, анализ рабочего процесса рекуперативного теплообменника осуществляется в постановке прямой задачи [19, 20].

При расчете параметров многофазных многокомпонентных потоков используется комплект подпрограмм расчетов коэффициентов теплофизических свойств рабочих тел, базирующийся на уравнении состояния Пенга-Робинсона [21–24].

Сложность процессов, происходящих в ректификационной колонне, не позволяет создать детальную и при этом относительно простую математическую модель расчета ректификационной колонны. Поэтому для описания функционирования ректификационной колонны используется модель черного ящика.

На входе в ректификационную колонну задается многокомпонентный двухфазный поток с известными температурой  $T_{PK\_IN}$ , давлением  $P_{PK\_IN}$  и расходом  $G_{IN}$ . При известном компонентном составе потока комплект подпрограмм расчета коэффициентов теплофизических свойств рабочих тел позволяет получить массовый и мольный состав паровой и жидкой фаз подводимого потока на входе в ректификационную колонну, а также удельную энтальпию входящего многокомпонентного двухфазного потока.

Для математической модели ректификационной колонны используются ранее принятые допущения [17]:

- величина гидравлических потерь в ректификационной колонне принимается равной нулю;
- теплообменом конструктивных элементов ректификационной колонны (тарельчатой секции, ребойлера и конденсатора) пренебрегаем;
- давление в кубе колонны принимается больше, чем давление в конденсаторе;
- величина давления подачи продукта к ректификационной колонне находится между этими двумя величинами;
- для регулирования компонентного состава отводимых продуктов осуществляется подвод теплоты в ребойлере, отвод теплоты в конденсаторе.

Для ректификационной колонны записывается следующая система уравнений:

$$G_{IN} = G_{L\_EX} + G_{V\_EX},$$

$$G_{IN} \cdot i_m(P_{PK\_IN}, T_{PK\_IN}) = G_{L\_EX} \cdot i_m(P_{L\_EX}, T_{L\_EX}) +$$

$$+ Q_{PB} + G_{V\_EX} \cdot i_m(P_{V\_EX}, T_{V\_EX}) - Q_{KOND}, \quad (15)$$

где  $G_{L\_EX}$ ,  $G_{V\_EX}$  – расходы однофазных жидкого и газообразного продуктов на выходе из ректификационной колонны;  $i_m$  – удельная энтальпия многокомпонентной смеси, определяемая с помощью комплекта подпрограмм расчета коэффициентов теплофизических свойств рабочих тел для заданного компонентного состава смеси;  $T_{L\_EX}$ ,  $P_{L\_EX}$  – соответственно температура и давление жидкого продукта на выходе из ребойлера;  $T_{V\_EX}$ ,  $P_{V\_EX}$  – соответственно температура и давление газообразного продукта на выходе из конденсатора;  $Q_{PB}$  – теплота, подведенная к ребойлеру,  $Q_{KOND}$  – теплота, отведенная из конденсатора.

Компонентный состав входящего и исходящих продуктов связан следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} G_{IN} \cdot g_{IN\_1} = G_{L\_EX} \cdot g_{L\_EX\_1} + G_{V\_EX} \cdot g_{V\_EX\_1}, \\ G_{IN} \cdot g_{IN\_2} = G_{L\_EX} \cdot g_{L\_EX\_2} + G_{V\_EX} \cdot g_{V\_EX\_2}, \\ G_{IN} \cdot g_{IN\_3} = G_{L\_EX} \cdot g_{L\_EX\_3} + G_{V\_EX} \cdot g_{V\_EX\_3}, \\ \dots \\ G_{IN} \cdot g_{IN\_n} = G_{L\_EX} \cdot g_{L\_EX\_n} + G_{V\_EX} \cdot g_{V\_EX\_n}, \end{cases} \quad (16)$$

где  $g_{IN\_i}$ ,  $g_{L\_EX\_i}$ ,  $g_{V\_EX\_i}$  – массовые доли  $i$ -го компонента на входе в ректификационную колонну, на выходе из ребойлера и конденсатора соответственно.

Расчет ректификационной колонны осуществляется методом последовательных приближений. В зависимости от необходимого значения массового содержания компонента выполняется ряд итераций комплекта подпрограмм расчета коэффициентов теплофизических свойств рабочих тел при заданном давлении в ребойлере и конденсаторе. Начальное значение массового содержания паровой и жидкостной фаз определяется по параметрам на входе в ректификационную колонну. Затем в ходе итераций значения массовых содержаний на входе в конденсатор и ребойлер пересчитывается система уравнений (16) при варьировании температур  $T_{L\_EX}$ ,  $T_{V\_EX}$  в ребойлере и конденсаторе. Расчет завершается при достижении заданного значения массового содержания определенного компонента с требуемой точностью. После этого производится расчет теплотпотоков в ребойлере  $Q_{PB}$  и конденсаторе  $Q_{KOND}$ , а также массовых расходов жидкой и газовой фаз. На этом процесс расчета ректификационной колонны можно считать завершённым.

Результаты расчета ректификационной колонны К-1 в составе блока низкотемпературного разделения газовой смеси с повышенным содержанием метана (рис. 2) приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры ректификационной колонны при работе в составе блока низкотемпературного разделения газовой смеси

Параметры	Исходный продукт	Продукт 1	Продукт 3
Давление, МПа	0,6	0,6	0,596
Температура, К	117,15	127,07	94,73
Расход, кг/ч	54,92	22,18	32,75
Степень сухости масс.	0,779	0,0	1,0
Состав, мольн. состав:			
CH <sub>4</sub>	0,3819	0,0	0,892
H <sub>2</sub>	0,1947	0,3405	0,0
CO	0,2998	0,4509	0,098
H <sub>2</sub> O	0,1236	0,2086	0,010
Тепловая мощность ребойлера, кВт	–	1,123	–
Тепловая мощность конденсатора, кВт	–	–	2,569

Из табл. 1 видно, что на выходе из ректификационной колонны Продукт 3 представляет собой газовую смесь с содержанием метана 89,2 %, а, следовательно, имеет ценность как моторное топливо для автотранспорта или топливо коммунально-бытового назначения. Учитывая большое содержание водорода

в Продукте 1 (примерно 34 %), данный поток газовой смеси может быть использован как энергоноситель для поддержания процесса газификации отходов при их утилизации.

---

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

---

Разработанная математическая модель процесса разделения многокомпонентных углеводородных смесей в ректификационной колонне и математические модели других функциональных элементов, обслуживающих процесс разделения, позволяют путем численного моделирования осуществлять проектирование ЭТУ с последующей оптимизацией параметров потоков с целью обеспечения высокой эффективности процесса разделения газовой смеси за счет снижения энергопотребления. При математическом описании процессов были использованы общепринятые соотношения технической термодинамики. Параметры ректификационной колонны, рассчитанные с использованием предложенной математической модели, подтверждают возможность практической реализации предложенной схемы ЭТУ. Результатом внедрения установки низкотемпературного разделения газовых смесей, полученных при высокотемпературной утилизации отходов, является формирование потока с высоким содержанием метана, который может быть использован как сжатое углеводородное горючее, и потока горючей смеси, пригодной для поддержания процесса газификации отходов при их утилизации.

Данное исследование представляет собой часть научного исследования по созданию экономически эффективного технологического процесса утилизации отходов. Началом исследования по разработке и созданию установки низкотемпературного разделения газовых смесей, является работа [17]. В ней предложена методика расчета сложных энерготехнологических схем, описаны исходные параметры и допущения и

разработаны математические модели расчета насоса, детандера и рекуперативного теплообменника. Наряду с этим планируются 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.

---

#### 7. Выводы

---

1. Используя общепринятые соотношения термодинамики и тепломассообмена, 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 – аппарата воздушного охлаждения и ректификационной колонны. Данные модели представляют собой системы уравнений, которые позволяют определить температуры теплоносителя и охлаждающего воздуха на выходе из теплообменника при заданном соотношении массовых расходов теплоносителя и воздуха, а так же компонентный состав входящего в ректификационную колонну продукта и исходящих из нее конечных продуктов.

2. Математическое описание функциональных элементов, применяемых в ЭТУ, представленное в данном исследовании и в ранее проведенных, например [17], при установлении связи между ними позволяет создать систему уравнений для всей установки в целом. Такая система уравнений описывает взаимосвязи между функциональными элементами по принципу «выход из элемента А – вход в элемент Б», а ее решение проводят методом последовательных приближений. Математическое описание всей системы и выбор приемлемого с технической точки зрения варианта компоновки ЭТУ в целях ее практической реализации являются темой дальнейшего исследования.

---

#### 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. – 2014. – № 11-2 (30). – С. 8–10.
2. Патент № 96684 Украина, МПК F23G 5/027 (2006.01). Спосіб твердих відходів виробництва [Текст] / Кривцов В. С., Нечипорук М. В., Вамболь В. В. та ін. – Заявник і патентоволодар Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут». – № a201008094; заявл. 29.06.2010; опубл. 25.11.2011, Бюл. № 22. – 3.
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 // Екологічна безпека. – 2014. – Вып. 2(18). – С. 25–30.
4. 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. – P. 302.
5. Park, H.-S. Medical Waste Treatment Using Plasma [Text] / H.-S. Park, B.-J. Lee, S.-J. Kim // Industrial & Engineering Chemistry. – 2005. – Vol. 11, Issue 3. – P. 353–360.
6. Бернадинер, И. М. Обезвреживание опасных отходов: выбор оптимальной технологии [Текст] / И. М. Бернадинер // Твердые бытовые отходы. – 2010. – № 9. – С. 18–26.
7. 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.

8. Бернадинер, М. Н. Высокотемпературная обработка отходов. Плазменные источники энергии [Текст] / М. Н. Бернадинер, И. М. Бернадинер // Твёрдые бытовые отходы. – 2011. – № 4. – С. 1–19.
9. 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.
10. Livits J., McKenna A., Seif F. 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.
11. Братцев, А. Н. Установка для плазменной газификации различных видов отходов [Текст] / А. Н. Братцев, В. Е. Попов, А. Ф. Рутберг, С. В. Штенгель // Теплофизика высоких температур. – 2006. – Т. 44, № 6. – С. 832–837.
12. 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 Manage. – 2007. – Vol. 27, Issue 11. – P. 1562–1569. doi: 10.1016/j.wasman.2006.07.027
13. 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.
14. Вамболь, В. В. Экологически чистая переработка отходов с последующим метанированием продуктов плазменной газификации [Текст]: матер. III Междунар. науч.-практ. конф. / В. В. Вамболь, А. С. Чубенко // Проблемы техносферной безопасности. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2014. – С. 230–232.
15. Чубенко, А. С. Экологически чистая утилизация отходов жизнедеятельности [Текст] / А. С. Чубенко, В. Н. Кобрин, В. В. Вамболь // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – 2013. – Вып. 62. – С. 98–102.
16. Нечипорук, Н. В. Утилизация летательных аппаратов [Текст]: монография / Н. В. Нечипорук, В. Н. Кобрин, В. В. Вамболь, Е. А. Полищук. – Национальный аэрокосмический университет «Харьковский авиационный институт», 2014. – 304 с.
17. 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 «ХПИ». Сер. Математичне моделювання в техніці та технологіях. – 2015. – № 41 (1150). – С. 134–139.
18. Александров, И. А. Ректификационные и абсорбционные аппараты [Текст] / И. А. Александров. – М.: Химия, 1971. – 296 с.
19. Parafeinik, V. P. Thermodynamic analysis of the efficiency of air coolers in a petroleum gas compressor installation [Text] / V. P. Parafeinik, I. I. Petukhov, V. N. Syryi, Yu. V. Shakhov // Chemical and Petroleum Engineering. – 2004. – Vol. 40, Issue 7-8. – P. 467–474. doi: 10.1023/b:cape.0000047668.47609.31
20. Parafeinik, V. P. Thermodynamic analysis of efficiency of air cooling unit in compressor plant of oil gas [Text] / V. P. Parafeinik, I. I. Petukhov, V. N. Syryi, Yu. V. Shakhov // Khimicheskoe i Neftegazovoe Mashinostroenie. – 2004. – Vol. 8. – P. 23–27.
21. Исаченко, В. П. Теплопередача [Текст]: учеб. для вузов / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.
22. Хьюитт, Дж. Кольцевые двухфазные течения [Текст] / Дж. Хьюитт, Н. Холл-Тэйлор; пер. с англ. – М.: Энергия, 1974. – 408 с.
23. Теплопередача в двухфазном потоке [Текст] / под ред. Д. Баттерворса, Дж. Хьюитта; пер. с англ. – М.: Энергия, 1980. – 328 с.
24. Relap5/MOD3 Cod Manual Nureg/CR-5535 (INEL - 95/0174), Vol. I-V [Text]. – Idaho National Engineering Laboratory, Idaho Falls, Idaho, 1995.