

*Лоншаков Никита Андреевич,*

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант, старший преподаватель кафедры атомных электрических станций, e-mail: nik-lon@mail.ru

*Lonshakov Nikita Andreyevich,*

Ivanovo State Power Engineering University, Post-graduate student, Senior Lecturer of the Nuclear Power Plants Department, e-mail: nik-lon@mail.ru

*Алексеев Илья Викторович,*

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», студент кафедры атомных электрических станций, e-mail: ilya.cockroach@yandex.ru

*Alekseyev Ilya Viktorovich,*

Ivanovo State Power Engineering University, Student of the Nuclear Power Plants Department, e-mail: ilya.cockroach@yandex.ru

*Мечтаева Мария Николаевна,*

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», ассистент кафедры атомных электрических станций, e-mail: maria.mechtaeva@mail.ru

*Mechtayeva Maria Nikolayevna,*

Ivanovo State Power Engineering University, Assistant of the Nuclear Power Plants Department, e-mail: maria.mechtaeva@mail.ru

УДК 62.932.2

## РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ПЕЧИ ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ ТВЕРДЫХ ОТХОДОВ И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ЕЕ РАБОТЫ

Р.Н. ГАБИТОВ, О.Б. КОЛИБАБА, А.И. СОКОЛЬСКИЙ, А.В. ГРОШЕВА

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина»,  
г. Иваново, Российская Федерация

E-mail: tevp@tvp.ispu.ru

### Авторское резюме

**Состояние вопроса.** Практическая реализация процесса термической утилизации отходов, в том числе коммунальных, и эффективность переработки в значительной мере зависят от конструкции установки и режимов ее работы. В работах Р. Basu, Сафина Р.Г., Шантарина В.Д. и др. предложены конструкции установок для переработки углеродосодержащих отходов, основным недостатком которых является использование только определенного вида отходов (древесины, биомассы, пластика). Установки работают при малой влажности сырья, что вызывает ухудшение качества получаемого газа. В связи с этим актуальным является разработка новой конструкции установки для утилизации различных по составу отходов в широком диапазоне их влажности и оценка эффективности ее работы.

**Материалы и методы.** Для определения эффективности работы печи для термической утилизации отходов использован метод материального и теплового баланса, позволяющий определить коэффициент полезного действия установки и выбрать режим ее работы с максимальным его значением.

**Результаты.** Предложено конструктивное оформление двухкамерного термического реактора для утилизации отходов совмещенным методом сушки и окислительного пиролиза. Конструктивная особенность установки позволяет организовать процесс окислительного пиролиза сырья в реакторе и разделить потоки пиролизного газа потребителю и на собственные нужды. Приведен алгоритм материального и теплового расчета по зонам сушки и пиролиза. Проведен анализ работы термического реактора производительностью 500 кг/ч при разных режимах окислительного пиролиза в зависимости от влажности исходного сырья.

**Выводы.** Предложенная установка окислительного пиролиза позволяет вести процесс утилизации твердых коммунальных отходов при их относительной влажности от 4 до 50 % с коэффициентом полезного действия от 0,6 до 0,9 путем изменения количества вводимого кислорода с 1 до 10 %.

**Ключевые слова:** термическая переработка, тепловой баланс, утилизация отходов, метод сушки, окислительный пиролиз, энергоэффективность

## DEVELOPMENT OF THE FURNACE DESIGN FOR SOLID WASTE UTILIZATION AND EVALUATION OF ITS OPERATION EFFICIENCY

R.N. GABITOV, O.B. KOLIBABA, A.I. SOKOLSKY, A.V. GROSHEVA  
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation  
E-mail: tevp@tvp.ispu.ru

### Abstract

**Background.** Practical implementation of the process of thermal utilization of waste, including municipal waste, and processing efficiency largely depend on the plant design and operation modes. In their works, P. Basu, Safin R.G., Shantaran V.D. and others propose designs of plants for processing carbon-containing waste. The main disadvantage of such plants is the use of only one waste type (wood, biomass or plastic). Such plants operate at low humidity of the raw material, which lowers the quality of the produced gas. All this makes it an urgent task to develop a new plant design for disposing of waste of various compositions in a wide humidity range and to evaluate its performance efficiency.

**Materials and methods.** To evaluate the efficiency of the furnace for thermal waste utilization, we used the material and heat balance method that allows determining the plant efficiency and selecting the operation mode with the maximum efficiency value.

**Results.** This paper proposes a design of a two-chamber thermal reactor for waste utilization based on the combined method of drying and oxidative pyrolysis. The plant design allows you to organize the process of oxidative pyrolysis of raw materials in the reactor and to separate the flow of pyrolysis gas to the consumer from that for their own needs. The paper describes the algorithm of material and thermal calculation for drying and pyrolysis zones. It also presents an analysis of the thermal reactor with a capacity of 500 kg/h in different modes of oxidative pyrolysis depending on the moisture content of the feedstock.

**Conclusions.** The developed plant design allows utilizing solid waste at its relative humidity from 4 to 50 % and reaching efficiency from 0,6 to 0,9 by changing the amount of oxygen fed into the system from 1 to 10 %.

**Key words:** thermal processing, thermal balance, waste utilization, drying method, oxidative pyrolysis, energy efficiency

**DOI:** 10.17588/2072-2672.2019.5.023-030

**Введение.** Жизнедеятельность человека характеризуется образованием большого количества различных по составу и фракциям отходов, ликвидация которых представляет собой серьезную проблему, решению которой уделяется большое внимание во всем мире. Захоронение отходов на полигоне не решает проблем, связанных с выделением полезных земель под свалки, выбросами газов в атмосферу. Переход к термической переработке позволяет не только ликвидировать отходы, но и получить в процессе утилизации тепловую энергию. Термические методы утилизации отходов с получением горючего газа являются наиболее распространенными в большинстве стран мира [1, 2]. В технологии переработки отходов в качестве основного оборудования используются шахтные установки [3], в которых процесс термического разложения сырья сопровождается небольшими подсосами окислителя [4, 5].

Наиболее известной в мире является технология *Torrax* [6], при использовании

которой пирогаз, выполняющий роль сушильного агента и предназначенный для последующего использования, выводится из зоны сушки. При таком способе получения целевого продукта происходит увеличение влагосодержания газа со снижением его качества. Для совершенствования технологического процесса предложено отводить часть газа из зоны пиролиза потребителю, а другую часть газа направлять в зону сушки для обезвоживания исходного сырья. Процесс и эффективность обработки твердых коммунальных отходов (ТКО) в значительной степени зависят от конструктивного исполнения установки и режима ее работы.

При разработке конструкции установки необходимо соблюдать ряд требований: обеспечение высокой производительности и экономичности в работе; соблюдение заданных технологических параметров процесса и высокого качества целевого продукта, простоты конструкции; удобство монтажа и доступность ремонта; соответ-

ствии требованиям охраны труда и окружающей среды.

Каждое требование достигается определенными приемами и методами. Высокая производительность определяется, прежде всего, интенсивными теплообменными процессами, происходящими в рабочем пространстве печи, и поддержанием оптимального режима ее работы. Экономичность работы может быть достигнута снижением затрат на предварительную подготовку ТКО, максимальной механизацией и автоматизацией процесса. Заданные технологические условия (температура, состав горючих газов, давление) и высокое качество готового продукта (пирогаза) обеспечиваются оптимальным распределением температур в зонах сушки, пиролиза и горения, скоростью перемещения отходов, непрерывностью процесса и удобством его регулирования. Компактность, простота конструкции печи и дешевизна ее изготовления достигается выбором стоимости материалов и применения оптимальной технологии изготовления основных деталей и узлов. Удобство монтажа и последующего ремонта, длительный срок службы и надежность в работе определяется в первую очередь удачной конструкцией установки, точностью расчетов, качеством изготовления и режимами эксплуатации.

Проектируемая печь для переработки твердых коммунальных отходов должна соответствовать современным требованиям науки и техники в области теории теплообмена и гидрогазодинамики и технической эстетики.

**Конструкция и принцип действия установки.** Конструкция установки для термической утилизации ТКО методом окислительного пиролиза, отвечающая выше приведенным требованиям, представлена на рис. 1.

Для описания принципа действия термического реактора работу установки необходимо разбить на два периода.

1. *Период пуска.* Отходы загружают в установку без предварительной подготовки. Затем производят загрузку твердого топлива в камеру сгорания 7 и осуществляют его розжиг. Образующиеся высокотемпературные продукты горения передают тепловую энергию через стенку реактора перерабатываемым отходам в камере пиролиза 14. Пусковой период продолжается до тех пор,

пока в зоне пиролиза 14 температура сырья не достигнет температуры начала процесса пиролиза. Выделяющиеся пирогазы с высокой температурой поступают в зону сушки, обезвоживая исходное сырье, и выводятся через узел отбора 3. Состав и качество влажного пирогаза определяются с помощью газоанализатора.

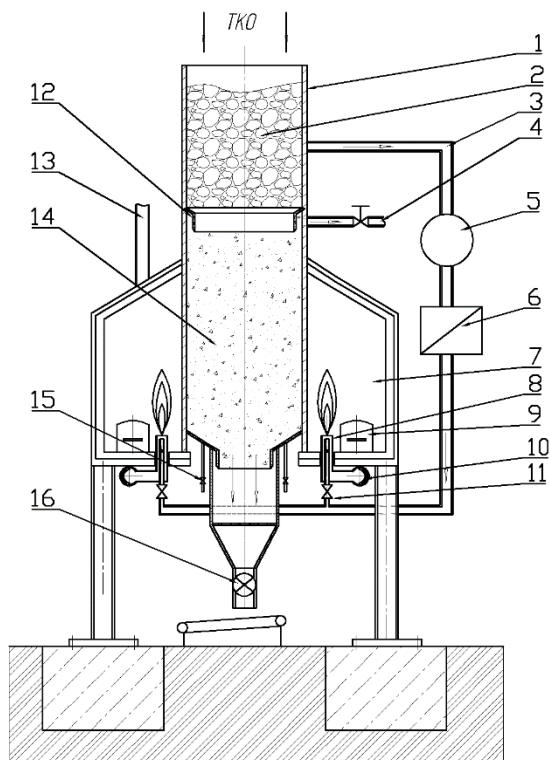


Рис. 1. Принципиальная схема печи для утилизации отходов

2. *Период стационарной работы.* Из зоны сушки влажный пирогаз с помощью нагнетателя 5 направляется в конденсатор 6, а затем в газовые горелки 8, где его используют как основное топливо для поддержания теплового режима в зоне пиролиза. Таким образом реактор переходит в стационарный режим работы и начинается отбор пирогаза потребителю через патрубок 4. Регулирование процесса окислительного пиролиза осуществляют при помощи регулировочной арматуры 15, через которую подают некоторое количество окислителя. Углеродистый остаток и зола выводятся из реактора шлюзовым затвором 16.

Для определения режимных параметров работы реактора и оценки его эффективности выполнены материальный и тепловой расчеты аппарата производительностью 500 кг/ч по исходному матери-

алу при различных режимах окислительно-го пиролиза. При расчете теплового баланса приняты следующие допущения: образование зольно-углеродистого остатка не превышает 15 % [7] и в камеру сгорания установки поступает сухой пирогаз.

Тепловой расчет установки выполнен на основе ранее полученных экспериментальных данных [8, 9], при условии, что исходное сырье нагревается и высушивается потоком газа, поступающего из зоны пиролиза. Высушенные отходы направляются в зону пиролиза, а влажный газ удаляется из зоны сушки.

На рис. 2, 3 показаны схемы материальных и тепловых потоков реактора для переработки отходов.

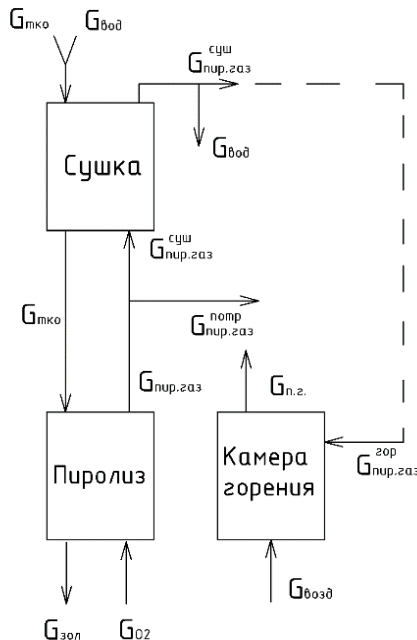


Рис. 2. Схема материальных потоков реактора

**Методика расчета.** Расчет теплового баланса зоны сушки выполнен при допущении, что влажные отходы высушиваются потоком пирогаза ( $G_{\text{пир.газ}}^{\text{суш}}$ ) из пиролизной зоны. Сухие отходы перемещаются в зону пиролиза, а влажный пирогаз ( $G_{\text{пир.газ}}^{\text{суш}} + G_{\text{вод}}$ ) выводится из установки.

Приходные статьи теплового баланса для зоны сушки термического реактора имеют следующий вид:

- физическое тепло отходов, кВт,

$$Q_{\text{ТКО}}^{\text{вх}} = G_{\text{ТКО}} c_{\text{ТКО}}^{\text{вх}} t_{\text{нач}}; \quad (1)$$

- физическое тепло влаги отходов, кВт,

$$Q_{\text{Вод}}^{\text{вх}} = G_{\text{Вод}} c_{\text{Вод}}^{\text{вх}} t_{\text{нач}}; \quad (2)$$

- физическое тепло пирогаза, кВт,

$$Q_{\text{пир.газ}}^{\text{вх}} = G_{\text{пир.газ}}^{\text{суш}} c_{\text{пир.газ}}^{\text{вх}} t_{\text{пир.газ}}^{\text{вх}}; \quad (3)$$

где  $G_{\text{ТКО}}$ ,  $G_{\text{вод}}$ ,  $G_{\text{пир.газ}}^{\text{суш}}$  – расходы сухих отходов, влаги, содержащейся в отходах, и пирогаза на сушку соответственно, кг/с;  $c_{\text{ТКО}}^{\text{вх}}$ ,  $c_{\text{вод}}$ ,  $c_{\text{пир.газ}}^{\text{вх}}$  – средние удельные теплоемкости сухих отходов, влаги и пирогаза, кДж/(кг·°C);  $t_{\text{нач}}$  – начальная температура отходов, °C;  $t_{\text{пир.газ}}^{\text{вх}}$  – температура пирогаза на входе в зону сушки, °C.

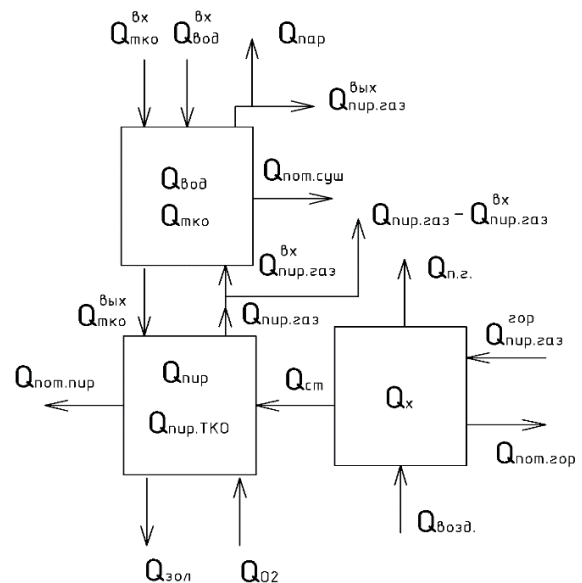


Рис. 3. Схема тепловых потоков реактора

Расходные статьи теплового баланса для зоны сушки установки имеют следующий вид:

- физическое тепло сухих отходов, кВт,

$$Q_{\text{ТКО}}^{\text{вых}} = G_{\text{ТКО}} c_{\text{ТКО}}^{\text{вых}} t_{\text{суш}}; \quad (4)$$

- физическое тепло пирогаза на выходе из зоны сушки, кВт,

$$Q_{\text{пир.газ}}^{\text{вых}} = G_{\text{пир.газ}}^{\text{суш}} c_{\text{пир.газ}}^{\text{вых}} t_{\text{пир.газ}}^{\text{вых}}; \quad (5)$$

- тепло влажного пара, отбираемого из зоны сушки, кВт,

$$Q_{\text{пар}} = G_{\text{вод}} c_{\text{пар}} t_{\text{ух.пар}}; \quad (6)$$

- тепло, израсходованное на нагрев, испарение воды и нагрев водяного пара до температуры отбора из зоны сушки, кВт,

$$Q_{\text{вод}} = G_{\text{вод}} c_{\text{вод}} (t_{\text{пар}} - t_{\text{нач}}) + G_{\text{вод}} r + G_{\text{вод}} c_{\text{пар}} (t_{\text{ух.пар}} - t_{\text{пар}}); \quad (7)$$

- тепло, затраченное на нагрев сухих отходов до температуры выхода из зоны сушки, кВт,

$$Q_{\text{ТКО}} = G_{\text{ТКО}} c_{\text{ТКО}}^{\text{ВЫХ}} (t_{\text{суш}} - t_{\text{нач}}); \quad (8)$$

• потери теплоты в окружающую среду в зоне сушки приняты в количестве 5 % от суммы затрат теплоты, рассчитанных по формулам (4)–(8), кВт,

$$Q_{\text{пот.суш}} = 0,05 (Q_{\text{ТКО}}^{\text{ВЫХ}} + Q_{\text{пир.газ}}^{\text{ВЫХ}} + Q_{\text{пар}} + Q_{\text{вод}} + Q_{\text{ТКО}}), \quad (9)$$

где  $c_{\text{ТКО}}^{\text{ВЫХ}}$ ,  $c_{\text{пир.газ}}^{\text{ВЫХ}}$ ,  $c_{\text{пар}}$  – средние удельные теплоемкости сухих отходов на выходе, пирогаза и водяных паров соответственно кДж/(кг $^{\circ}$ С);  $t_{\text{суш}}$ ,  $t_{\text{пир.газ}}^{\text{ВЫХ}}$ ,  $t_{\text{ух.пар}}$  – температуры отходов, пирогаза и водяного пара на выходе из зоны сушки,  $^{\circ}$ С;  $t_{\text{пар}}$  – температура парообразования,  $^{\circ}$ С;  $r$  – скрытая теплота парообразования, кДж/кг.

Уравнение баланса для зоны сушки имеет вид

$$Q_{\text{ТКО}}^{\text{ВХ}} + Q_{\text{вод}}^{\text{ВХ}} + Q_{\text{пир.газ}}^{\text{ВХ}} = \quad (10)$$

$$= Q_{\text{ТКО}}^{\text{ВЫХ}} + Q_{\text{пир.газ}}^{\text{ВЫХ}} + Q_{\text{пар}} + Q_{\text{вод}} + Q_{\text{ТКО}} + Q_{\text{пот.суш}}.$$

Расчет теплового баланса пиролизной зоны осуществляется на основе схемы, иллюстрированной на рис. 3. В процессе окислительного пиролиза сухие ТКО разлагаются на пирогаз ( $G_{\text{пир.газ}}$ ) и зольный остаток ( $G_{\text{зол}}$ ).

Приходные статьи баланса для пиролизной зоны термического реактора имеют следующий вид:

• физическое тепло отходов, поступающих в пиролизную зону, кВт,

$$Q_{\text{ТКО}}^{\text{ВЫХ}} = G_{\text{ТКО}} c_{\text{ТКО}} t_{\text{суш}}; \quad (11)$$

• физическое тепло кислорода, кВт,

$$Q_{\text{O}_2} = G_{\text{O}_2} c_{\text{O}_2} t_{\text{O}_2}; \quad (12)$$

• теплота химических реакций в процессе «чистого» пиролиза и окисления отходов, кВт,

$$Q_{\text{пир}} = G_{\text{ТКО}} q_{\text{пир}}; \quad (13)$$

• тепло, переданное через стенку камеры сгорания в зону пиролиза,  $Q_{\text{ст}}$ , кВт, где  $G_{\text{O}_2}$  – расход кислорода на процесс термического разложения, кг/с;  $c_{\text{O}_2}$  – средняя удельная теплоемкость кислорода, кДж/(кг $^{\circ}$ С);  $t_{\text{O}_2}$  – температура кислорода,  $^{\circ}$ С;  $q_{\text{пир}}$  – тепловой эффект пиролиза и окисления, кДж/кг [7].

Для пиролизной зоны расходные статьи теплового баланса имеют следующий вид:

• физическое тепло пирогаза, отбираемого на сушку и потребителю, кВт,

$$Q_{\text{пир.газ}} = G_{\text{пир.газ}} c_{\text{пир.газ}} t_{\text{пир.газ}}; \quad (14)$$

• физическое тепло зольного остатка, удаляемого из зоны пиролиза, кВт,

$$Q_{\text{зол}} = G_{\text{зол}} c_{\text{зол}} t; \quad (15)$$

• тепло, затраченное на нагрев отходов, пирогаза и зольного остатка в процессе пиролиза, кВт,

$$Q_{\text{пир.ТКО}} = G_{\text{ТКО}} c_{\text{пир.ТКО}} (t_{\text{пир.кон}} - t_{\text{пир.нач}}) + G_{\text{пир.газ}} c_{\text{пир.газ}} (t_{\text{пир.кон}} - t_{\text{пир.нач}}) + G_{\text{зол}} c_{\text{зол}} (t_{\text{пир.кон}} - t_{\text{пир.нач}}); \quad (16)$$

• потери теплоты в окружающую среду зоны пиролиза приняты в размере 5 % от суммы затрат теплоты, рассчитанных по формулам (14)–(16), кВт:

$$Q_{\text{пот.пир}} = 0,05 (Q_{\text{пир.газ}} + Q_{\text{зол}} + Q_{\text{пир.ТКО}}), \quad (17)$$

где  $c_{\text{пир.газ}}$ ,  $c_{\text{зол}}$ ,  $c_{\text{пир.ТКО}}$  – средние удельные теплоемкости пирогаза, зольного остатка и отходов, кДж/(кг $^{\circ}$ С);  $t_{\text{пир.газ}}$  – температура пирогаза,  $^{\circ}$ С;  $t_{\text{пир.кон}}$ ,  $t_{\text{пир.нач}}$  – температуры окончания и начала процесса пиролиза,  $^{\circ}$ С.

Уравнение теплового баланса для пиролизной зоны реактора имеет вид

$$Q_{\text{ТКО}}^{\text{ВЫХ}} + Q_{\text{O}_2} + Q_{\text{пир}} + Q_{\text{ст}} = Q_{\text{пир.газ}} + Q_{\text{зол}} + Q_{\text{пир.ТКО}} + Q_{\text{пот.пир}}. \quad (18)$$

Расчет теплового баланса камеры сгорания проведен с учетом того, что в камеру сгорания поступает обезвоженный пирогаз ( $G_{\text{пир.газ}}^{\text{гор}}$ ) и воздух ( $G_{\text{возд}}$ ). Продукты сгорания ( $G_{\text{пг}}$ ) передают свое тепло в пиролизную зону и отводятся в атмосферу.

Для камеры сгорания приходные статьи теплового баланса имеют следующий вид:

• физическое тепло пирогаза, кВт,

$$Q_{\text{пир.газ}}^{\text{гор}} = G_{\text{пир.газ}}^{\text{гор}} c_{\text{пир.газ}} t_{\text{пир.газ}}^{\text{гор}}; \quad (19)$$

• физическое тепло воздуха на горение, кВт,

$$Q_{\text{возд}} = G_{\text{возд}} c_{\text{возд}} t_{\text{возд}}; \quad (20)$$

• химическая теплота сжигаемого пирогаза, кВт,

$$Q_{\text{x}} = G_{\text{пир.газ}}^{\text{гор}} Q_{\text{н}}^{\text{р}}, \quad (21)$$

где  $G_{\text{пир.газ}}^{\text{гор}}$ ,  $G_{\text{возд}}$  – расходы пирогаза и воздуха, соответственно (находится расчетом), кг/с;  $c_{\text{пир.газ}}$ ,  $c_{\text{возд}}$  – средние удельные теплоемкости пирогаза и воздуха, кДж/(кг $^{\circ}$ С);  $t_{\text{пир.газ}}^{\text{гор}}$ ,  $t_{\text{возд}}$  – температуры пирогаза и воздуха,  $^{\circ}$ С;  $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$  – теплота сгорания пирогаза, кДж/кг.

Для камеры сгорания расходные статьи теплового баланса имеют вид:

• потери тепла с продуктами сгорания, кВт,

$$Q_{\text{ПГ}} = G_{\text{ПГ}} c_{\text{ПГ}} t_{\text{ПГ}}; \quad (22)$$

• потери тепла через обмуровку печи принимаем в размере 5 % от суммы затрат теплоты, рассчитанных по формулам (19)–(22), кВт:

$$Q_{\text{пот.пир}} = 0,05(Q_{\text{пир.газ}} + Q_{\text{зол}} + Q_{\text{пир.ТБО}}); \quad (23)$$

• тепло, переданное из камеры сгорания в пиролизную зону, кВт,

$$Q_{\text{ст}} = Q_{\text{пир.газ}}^{\text{гор}} + Q_{\text{возд}} + Q_{\text{х}} - Q_{\text{ПГ}} - Q_{\text{пот.гор}}, \quad (24)$$

где  $c_{\text{ПГ}}$  – средняя удельная теплоемкость продуктов сгорания, кДж/(кг·°С);  $t_{\text{ПГ}}$  – температура продуктов сгорания, °С;  $G_{\text{ПГ}}$  – выход продуктов сгорания, кг/с.

Уравнение теплового баланса камеры сгорания имеет вид

$$Q_{\text{пир.газ}}^{\text{гор}} + Q_{\text{возд}} + Q_{\text{х}} = Q_{\text{ПГ}} + Q_{\text{ст}} + Q_{\text{пот.гор}}. \quad (25)$$

Коэффициент полезного действия печи пиролиза рассчитан по формуле [10]

$$\eta = 1 - \frac{\sum Q_{\text{пот.ТКО}}}{Q_{\text{х}} + Q_{\text{пир}} + Q_{\text{возд}} + Q_{\text{O}_2}}, \quad (26)$$

где  $\sum Q_{\text{пот.ТКО}}$  – тепловые потери в процессе утилизации отходов, кВт:

$$\sum Q_{\text{пот.ТКО}} = Q_{\text{ПГ}} + Q_{\text{зол}} + Q_{\text{пир.газ}} + Q_{\text{пар}} + Q_{\text{пот.суш}} + Q_{\text{пот.пир}} + Q_{\text{пот.гор}}. \quad (27)$$

**Основные результаты.** С использованием приведенной выше методики был выполнен расчет теплового баланса рабочего пространства печи производительностью 500 кг/ч при влажности исходного сырья  $W$  5–50 %, работающей для трех режимов окислительного пиролиза. Результаты расчета удельных потоков энергии зоны пиролиза и ее передачи в зону сушки и к потребителю при влажности отходов приведены на рис. 4.

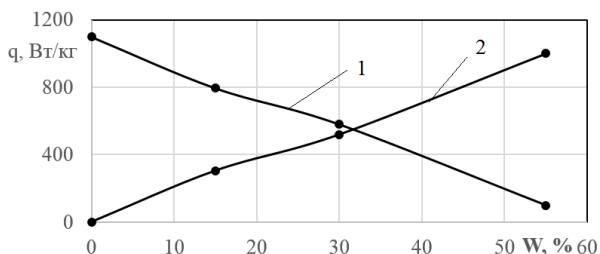


Рис. 4. Зависимость удельных потоков энергии от влажности ТКО: 1 – к потребителю; 2 – на сушку

Анализ полученных результатов (рис. 4) позволяет сделать выводы о том,

что увеличение влажности сырья с 0 до 55 % приводит к уменьшению количества энергии, переданной внешнему потребителю  $q_{\text{внеш}}$ , более чем в 10 раз и увеличению количества тепла на высушивание исходного сырья  $q_{\text{суш}}$  по линейному закону.

Зависимость коэффициента полезного действия установки от влажности ТКО для четырех режимов работы установки представлена на рис. 5.

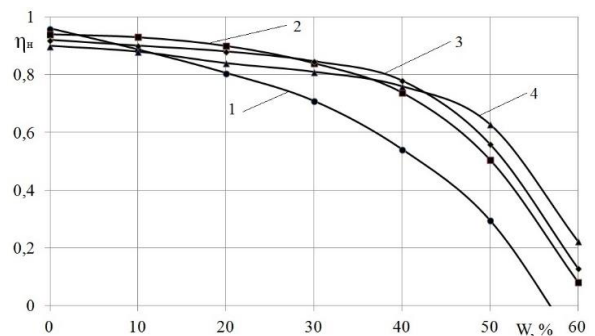


Рис. 5. Зависимость КПД установки от влажности ТКО при различных режимах работы установки: 1 – «сухой» пиролиз; 2, 3, 4 – окислительный пиролиз с содержанием кислорода в атмосфере 1, 5 и 10 % соответственно

Анализ полученных зависимостей (рис. 5) показывает, что функционирование установки с максимальным коэффициентом полезного действия в режиме «чистого» пиролиза допустимо в интервале изменения влажности отходов от 0 до 4 % [9]. В интервале изменения влажности от 4 до 28 % наиболее оптимальным является режим окислительного пиролиза с содержанием кислорода в атмосфере 1 %. Возрастание влажности от 28 до 43 % приводит к тому, что работа печи с максимальным коэффициентом полезного действия возможна при содержании кислорода в атмосфере 5 %, а при влажности сырья от 43 до 50 % – при окислительном пиролизе с содержанием кислорода в рабочем объеме печи – 10 %. При влажности более 50 % возникает резкое снижение коэффициента полезного действия, т.е. функционирование установки становится нецелесообразным [11].

Рис. 6 иллюстрирует влияние влажности ТКО на количество пирогаза, отдаваемого потребителю (кривые 1–4), и количество газа, необходимое для высушивания отходов в зоне сушки (кривые 1а–4а), при различных режимах пиролиза: кривые 1 и 1а – окислительный пиролиз с содер-



жанием кислорода 10 %; кривые 2 и 2а – окислительный пиролиз с содержанием кислорода 5 %; кривые 3 и 3а – окислительный пиролиз с содержанием кислорода 1 %; кривые 4 и 4а – «сухой» пиролиз.

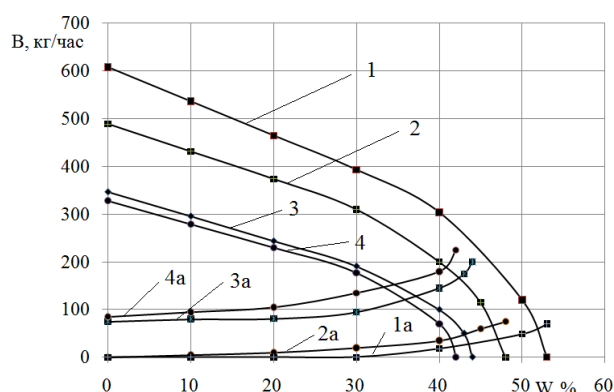


Рис. 6. Зависимости выработки количества пирогаза от влажности ТКО: 1–4 – отдаваемое потребителю, 1а–4а – на сушку ТКО с возвратом в камеру горения при различных режимах пиролиза

Анализ полученных зависимостей (рис. 6) показывает, что в режиме «сухого» пиролиза отвод газа потребителю прекращается при влажности ТКО около 41 %. При этом весь образующийся в процессе пиролиза газ будет затрачиваться на высушивание отходов, т.е. на собственные нужды печи для поддержания процесса пиролиза (установка будет работать «сама на себя»). Для режимов окислительного пиролиза с содержанием кислорода в атмосфере 1, 5 и 10 % значения влажности, при которой прекращается выход газа потребителю, составляют 44, 48, 53 % соответственно.

**Выводы.** Предложенная установка окислительного пиролиза позволяет вести процесс утилизации ТКО при их относительной влажности от 4 до 50 % с коэффициентом полезного действия от 0,6 до 0,9 путем изменения количества вводимого кислорода с 1 до 10 %. Конструкция установки предусматривает отвод пиролизного газа потребителю до зоны сушки, повышая, таким образом, его калорийность за счет снижения влагосодержания.

Разработанная методика расчета установки окислительного пиролиза основана на тепловом и материальном балансах рабочей зоны и применима для проектирования печей данного класса.

## Список литературы

1. **Алексашина В.В., Карташова К.К.** Коммунальные отходы мегаполиса: проблемы захоронения // Экология урбанизированных территорий. – 2015. – № 4. – С. 51–59.
2. **Серова Е.Ю.** Технологии и проблемы переработки твердых отходов в современных условиях // Академический журнал Западной Сибири. – 2016. – № 12. – С. 45–46.
3. **Чучмарева А.С.** Применение новых проектов и технологий в сфере обращения с отходами в Московской области // Отходы и ресурсы. – 2017. – № 3 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.15862/08RRO317>
4. **Oxidative pyrolysis of oil shale in tubular flow reactors with external heating / Y.Y. Pechenegov, V.F. Simonov, B.A. Semenov et al. // J.Solid Fuel Chemistry. – 2017. – Т. 51, № 1. – Р. 40–43.**
5. **Шишкин Ю.Л.** Окислительный пиролиз как метод структурно-группового анализа органического вещества и его применение для оценки углеводородного, газового и коксового генерационных потенциалов осадочных пород и пиролизного сырья // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2009. – № 6. – С.16–28.
6. **Mark S.D.** The Andco-Torrax System // Sofer S.S., Zaborsky O.R. Biomass Conversion Processes for Energy and Fuels. – Springer, Boston, MA, 1981. [https://doi.org/10.1007/978-1-4757-0301-6\\_7](https://doi.org/10.1007/978-1-4757-0301-6_7)
7. **Экспериментальное** исследование окислительного пиролиза твердых бытовых отходов / Р.Н. Габитов, О.Б. Колибаба, К.В. Аксенчик, В.А. Артемьева // Вестник ИГЭУ. – 2017. – Вып. 3. – С. 14–19. doi: 10.17588/2072-2672.2017.3.014-019.
8. **Kolibaba O.B., Sokolskiy A.I., Gabitov R.N.** Research of the pyrolysis of municipal solid waste aimed at improving the efficiency of thermal reactors // J. International Journal of Energy for a Clean Environment. – 2017. – Vol. 18, issue 2. – P. 147–160. doi: 10.1615/InterJEnerCleanEnv.2017020368.
9. **Kolibaba O.B., Sokolskiy A.I., Gabitov R.N.** Investigation of solid organic waste processing by oxidative pyrolysis // J. Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 891. – P. 1–5.
10. **Basu P.** Biomass Gasification and Pyrolysis: practical design and theory // Academic Press, 30 Corporate drive. – Burlington, USA, 2010. – 365 p.
11. **Габитов Р.Н., Колибаба О.Б., Грошева А.В.** Разработка конструкции установки для утилизации твердых коммунальных отходов методом окислительного пиролиза // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (Бенардосовские чтения): сб. науч. тр. XX Междунар. (Всерос.) науч.-техн. конф., 29–31 мая 2019 г., г. Иваново. – Иваново, 2019. – Т. 2. – С. 279–281.

## References

1. Aleksashina, V.V., Kartashova, K.K. Kommunal'nye otkhody megapolisa: problemy zakhoroneniya [Municipal waste of a megapolis: problems of burial]. *Ekologiya urbanizirovannykh territoriy*, 2015, no. 4, pp. 51–59.
2. Serova, E.Yu. Tekhnologii i problemy pererabotki tverdykh otkhodov v sovremennykh usloviyakh [Technologies and problems of processing solid waste in modern conditions]. *Akademicheskii zhurnal Zapadnoy Sibiri*, 2016, no. 12, pp. 45–46.
3. Chuchmareva, A.S. Primenenie novykh proektov i tekhnologiy v sfere obrashcheniya s otkhodami v Moskovskoy oblasti [Using new projects and technologies in the field of waste management in the Moscow region]. *Otkhody i resursy*, 2017, no. 3. Available at: <http://dx.doi.org/10.15862/08RRO317>
4. Pechenegov, Y.Y., Simonov, V.F., Semenov, B.A., Kosova, O.Y., Mrakin, A.N. Oxidative pyrolysis of oil shale in tubular flow reactors with external heating. *J. Solid Fuel Chemistry*, 2017, vol. 51, no. 1, pp. 40–43.
5. Shishkin, Yu.L. Okislitel'nyy piroliz kak metod strukturno-gruppovogo analiza organicheskogo veshchestva i ego primeneniye dlya otsenki uglevodorodnogo, gazovogo i koksovogo generatsionnykh potentsialov osadochnykh porod i piroliznogo syr'ya [Oxidative pyrolysis as a method of structural group analysis of organic matter and its use for the evaluation of hydrocarbon, gas and coke generation potentials of sedimentary rocks and pyrolysis raw materials]. *Oborudovanie i tekhnologii dlya neftegazovogo kompleksa*, 2009, no. 6, pp. 16–28.
6. Mark, S.D. The Andco-Torrax System. Sofer, S.S., Zaborsky, O.R. Biomass Conversion Processes for Energy and Fuels. Springer, Boston, MA, 1981. [https://doi.org/10.1007/978-1-4757-0301-6\\_7](https://doi.org/10.1007/978-1-4757-0301-6_7)
7. Gabitov, R.N., Kolibaba, O.B., Aksenchik, K.V., Artem'eva, V.A. Eksperimental'noe issledovanie okislitel'nogo piroliza tverdykh bytovykh otkhodov [Experimental study of oxidative pyrolysis of municipal solid waste]. *Vestnik IGEU*, 2017, issue 3, pp. 14–19. doi: 10.17588/2072-2672.2017.3.014-019.
8. Kolibaba, O.B., Sokolskiy, A.I., Gabitov, R.N. Research of the pyrolysis of municipal solid waste aimed at improving the efficiency of thermal reactors. *J. International Journal of Energy for a Clean Environment*, 2017, vol. 18, issue 2, pp. 147–160. doi: 10.1615/InterJEnerCleanEnv.2017020368.
9. Kolibaba, O.B., Sokolskiy, A.I., Gabitov, R.N. Investigation of solid organic waste processing by oxidative pyrolysis. *J. Journal of Physics: Conference Series*, 2017, vol. 891, pp. 1–5.
10. Basu, P. Biomass Gasification and Pyrolysis: practical design and theory. Academic Press, 30 Corporate drive, Burlington, USA, 2010. 365 p.
11. Gabitov, R.N., Kolibaba, O.B., Grosheva, A.V. Razrabotka konstruktsii ustanovki dlya utilizatsii tverdykh kommunal'nykh otkhodov metodom okislitel'nogo piroliza [Development of the plant design for utilization of solid municipal waste by the oxidative pyrolysis method]. *Sbornik nauchnykh trudov XX Mezhdunarodnoy (Vserossiyskoy) nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Sostoyanie i perspektivy razvitiya elektro- i teplotekhnologii» (Benardosovskie chteniya)*, 29–31 maya 2019 g. Ivanovo [A collection of scientific papers of the XX International All-Russian Scientific and Technical Conference «Status and Prospects for the Development of Electrical and Heat Technology» (Benardos readings), May 29–31, 2019, Ivanovo]. Ivanovo, 2019, vol. 2, pp. 279–281.

*Габитов Рамиль Наилевич,*

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры энергетики теплотехнологий и газоснабжения, e-mail: [Ramilgab@mail.ru](mailto:Ramilgab@mail.ru)

*Gabitov Ramil Nailevich,*

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Senior Lecturer of the Thermal Technologies and Gas Supply Department, e-mail: [Ramilgab@mail.ru](mailto:Ramilgab@mail.ru)

*Колібаба Ольга Борисовна,*

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, зав. кафедрой энергетики теплотехнологий и газоснабжения, e-mail: [tevp@tvp.ispu.ru](mailto:tevp@tvp.ispu.ru)

*Kolibaba Olga Borisovna,*

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Head of the Thermal Technologies and Gas Supply Department, e-mail: [tevp@tvp.ispu.ru](mailto:tevp@tvp.ispu.ru)

*Сокольский Анатолий Иванович,*

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры энергетики теплотехнологий и газоснабжения, e-mail: [tevp@tvp.ispu.ru](mailto:tevp@tvp.ispu.ru)

*Sokolsky Anatoly Ivanovich,*

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences (post-doctoral degree), Professor of the Thermal Technologies and Gas Supply Department, e-mail: [tevp@tvp.ispu.ru](mailto:tevp@tvp.ispu.ru)

*Грошева Анастасия Викторовна,*

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», магистрант 1 курса, e-mail: [tevp@tvp.ispu.ru](mailto:tevp@tvp.ispu.ru)

*Grosheva Anastasia Viktorovna,*

Ivanovo State Power Engineering University, 1<sup>st</sup> year Master course student, e-mail: [tevp@tvp.ispu.ru](mailto:tevp@tvp.ispu.ru)