

КОМПРЕССОРНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМПЛЕКСОВ ПЕРЕРАБОТКИ ТВЕРДЫХ ОРГАНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ

А. В. Бураков¹, А. А. Котлов¹, А. А. Левихин²

¹АО «Компрессор»,

Россия, 194044, г. Санкт-Петербург, Б. Сампсониевский пр., 64,

²Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова,
Россия, 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, д. 1

В статье описан опыт холдинга компаний «Компрессор» по созданию компрессорного оборудования для различных отраслей промышленности. Продемонстрировано использование компрессоров в составе комплексов по переработке органических отходов в рамках решения насущных экологических проблем. Исследован процесс сжатия синтез-газа для повышения эффективности процесса переработки. Для обеспечения стабильных параметров необходима надежная работа поршневых компрессоров синтез-газа в широких диапазонах режимных параметров. Обеспечение работоспособности компрессора в широких диапазонах изменения параметров требует многовариантных расчетов с целью поиска наилучших конструктивных параметров компрессора. Предложен компрессор для наиболее эффективной реализации задачи и выполнен расчет его характеристик.

Ключевые слова: переработка, органические отходы, синтез газ, поршневой компрессор, математическая модель.

Введение

Группа компаний завода «Компрессор», основанного в 1877 году, развивается, разрабатывает новые виды продукции, чутко реагируя на потребности рынка. Компания зарекомендовала себя на рынке как производитель качественного компрессорного и газового оборудования. Система менеджмента качества компании сертифицирована IQNET на соответствие ISO 9001-2015. Предприятие выпускает широкий ассортимент компрессорного оборудования для гражданского флота и военных ВМФ и блочно-модульных установок для подготовки газов с конечным давлением до 40,0 МПа. В связи с необходимостью решения насущных экологических проблем, а также в рамках расширения рынка гражданской продукции, разрабатываются комплексы для переработки различных отходов. Для реализации сложных наукоемких проектов в промышленности предприятие сотрудничает с ведущими научными организациями — БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова, что, благодаря конверсионным технологиям, позволяет создавать уникальные конкурентоспособные виды продукции.

В настоящее время в России эксплуатируется большое количество промышленных производств и предприятий, которые оказывают негативное влияние на окружающую среду. Разработка и внедрение новых методов утилизации отходов различного происхождения является одной из актуальнейших задач, требующих незамедлительного решения.

В энергетике и химической промышленности требуется переход на экологически чистые технологии и полное использование биоресурсов, внедрение комплексной переработки твердого топлива.

Даже в таких, на первый взгляд, экологически чистых процессах, как лесозаготовка, существуют отходы в виде древесной коры, которые при некачественной и неполной переработке на целлюлозно-бумажных комбинатах могут приводить к отрицательному воздействию на природу.

Для экологически чистой утилизации углеродсодержащих твердых органических отходов лесозаготовительной промышленности необходимо применять специализированные комплексы для их переработки и получения товарного продукта. Для расширения арсенала ресурсосберегающего оборудования был разработан комплекс для переработки твердых органических отходов [1]. Получаемый в процессе переработки сырья синтез-газ необходимо доводить до требуемого давления и температуры, для чего наиболее эффективным оборудованием являются поршневые компрессоры.

Критериями эффективной технологии переработки твердых органических отходов являются [2]:

а) высокая температура процесса (от 1200 до 2000 °С), гарантирующая, что органическая составляющая отходов конвертируется полностью в синтез-газ (преимущественно монооксид углерода — СО и водород — H₂) и при этом полное разрушение токсичных составляющих, таких как диоксины, фураны и их производных, в высокотемпературном реакторе;

б) отсутствие синтеза или ресинтеза вышеперечисленных токсичных составляющих после высокотемпературного реактора; для чего используется так называемая закалка — быстрое понижение температуры на выходе из реактора до такого уровня, в котором названные продукты уже заново не синтезируются;

в) отсутствие в газовых и жидких продуктах технологии переработки отходов различных составляющих, которые необходимо дополнительно разделять химическими или физическими методами и утилизировать;

г) отсутствие жидких сбросов в природную гидросеть;

д) соответствие газового выхлопа местным и международным экологическим требованиям.

Объект исследования

Объектом исследования является комплексная система переработки органических отходов, включающая в частности многоступенчатый поршневой компрессор, предназначенный для компремирования синтез-газа. Учитывая возможность прогнозирования работы многоступенчатого поршневого компрессора на различных режимах эксплуатации на базе математических моделей, приведенную для природного газа в [3], определимся с составом синтез-газа, который необходимо компремировать и факторы, которые влияют на состав, прежде всего это состав непосредственно отходов.

Кора деревьев, а именно отходы окорки — это частицы коры, луба, древесины, периферийной части ствола различной формы и размеров, образующиеся в результате окорки лесоматериалов, которая не имеет нормируемых параметров качества и промышленной области применения даже в виде топлива. Кора деревьев хвойных пород относится к отходам 4-го класса опасности [4].

В состав древесной коры входят следующие основные компоненты: целлюлоза — от 3,4 до 23,2%; лигнин — от 1,3 до 43,6%; пентозаны — от 1,1 до 20,2%; гексозаны — от 6,0 до 16,3%; суберин — от 0,0 до 38,7%. Элементный химический состав (укрупненно): углерод — 48,0%; кислород — 45,4%; водород — 6,4% [5].

При этом в состав коры также могут входить хлорсодержащие соединения, которые в процессе низкотемпературного сжигания могут приводить к образованию диоксинов [6].

Задачей комплекса является утилизация отходов деревообрабатывающей промышленности (коры деревьев) с минимизацией вредных выбросов в окружающую среду. Для этого комплекс должен содержать реактор с высокотемпературной (температура порядка 1600–2000 °С) плазмой, что обеспечивает разрушение всех вредных примесей (в том числе диоксинов) и использующего в качестве плазмобразующего газа водяной пар (не содержит азот, который содержится в атмосферном воздухе), благодаря чему в газообразных продуктах на выходе комплекса полностью отсутствуют вредные примеси на основе оксидов азота (NO , NO_2), характерные при сжигании топлива на ТЭЦ либо в выхлопных газах автомобильных двигателей.

Существуют другие установки для переработки отходов, например, полигенерирующий энерготехнологический комплекс [7], в котором имеется возможность получения синтез-газа с соотношением $\text{H}_2:\text{CO}$, близким к оптимальному (2:1) для производства синтетического жидкого топлива, получение электрической энергии осуществляется в паровой турбине, водяной пар для которой получается в установке Фишера–Тропша при производстве синтетического жидкого топлива, при этом имеются блок очистки синтез-газа, паровая турбина, используемая в качестве источника получения во-

дяного пара, который в дальнейшем используется для получения перегретого пара с температурой 1200–1400 °С.

Недостатком такого полигенерирующего энерготехнологического комплекса является низкая рабочая температура 1200–1400 °С, которая не гарантирует исключения образования негативных компонентов, таких как диоксины, фураны и их производные.

Известен также другой способ переработки органических отходов, включающий стадию газификации путем обработки органических отходов газифицирующим агентом с получением синтез-газа и твердых неорганических продуктов, стадию очистки и компремирования синтез-газа, стадию синтеза жидких углеводородов каталитической переработкой синтез-газа в двух реакционных зонах, при этом в первой реакционной зоне расположен катализатор, оксидная часть которого и кислотный компонент находятся в смешанной или отдельной комбинации, а во второй реакционной зоне расположен кислотный катализатор, содержащий цеолит со структурой ZSM-5 или ZSM-11, стадию сепарации жидких углеводородов до моторного топлива, стадию утилизации сепарированных продуктов, при этом каталитическую переработку синтез-газа проводят в первой реакционной зоне при температуре 160–420 °С и давлении 2–100 атм, а во второй реакционной зоне при температуре 300–500 °С и давлении 2–100 атм, в которой в качестве органических отходов используют отходы лесозаготовок и деревообрабатывающих предприятий, стадию газификации отходов ведут в прямоточном режиме путем пиролиза, окисления и восстановления с получением генераторного газа, в качестве газифицирующего агента используют пиролизные газы, образующиеся в результате кондуктивного нагрева органических отходов генераторным газом, а также газы сдувок после сепарации продуктов реакций, окисление осуществляют воздухом, обогащенным кислородом, в восстановительную зону дополнительно вводят древесный уголь с температурой 500–550 °С, содержащий селективный катализатор, твердые органические отходы после газификации сепарируют на золу и рециркулирующий селективный катализатор, а физическое тепло отходящего генераторного газа рекуперировать для предварительной сушки отходов лесозаготовок до влагосодержания 25–30% [8].

К недостаткам известного способа переработки органических отходов относятся его сложность и необходимость применения дорогостоящих катализаторов для синтеза жидких углеводородов путем переработки синтез-газа в двух реакционных зонах, активация и регенерация этих катализаторов; применение воздуха в качестве окислителя приводит к появлению окислов азота, в то время как газообразный синтез-газ можно использовать в виде топлива, а получение жидкого топлива товарного качества из синтез-газа технически и экономически нецелесообразно.

Предлагаемый комплекс для переработки твердых органических отходов посредством их паровой плазменной газификации с получением синтез-газа включает блок предварительной подготовки и подачи сырья, блок плазменной обработки, блок теплообменного оборудования, блоки генерации тепловой и электрической энергии, блок управления, при этом блок предварительной подготовки и подачи сырья содержит устройства для предваритель-

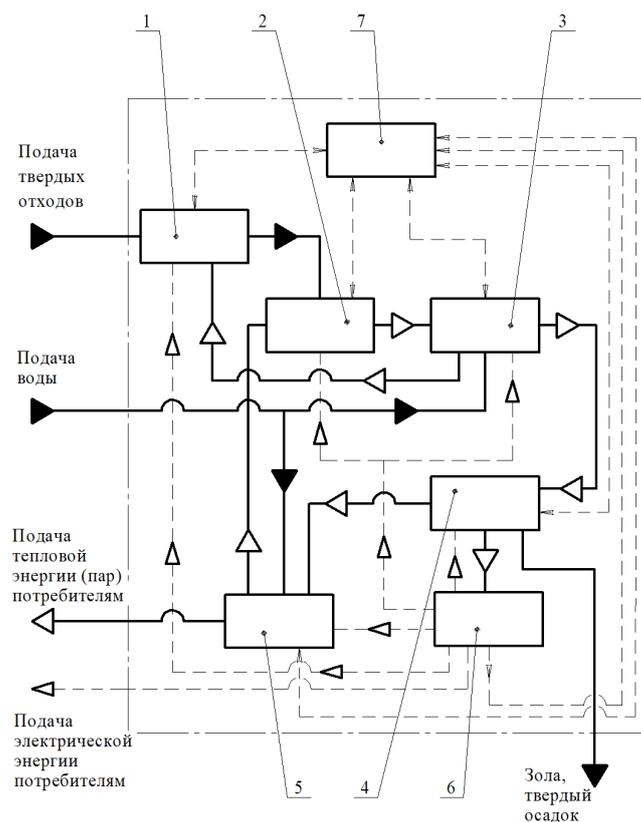


Рис. 1. Схема комплексной системы переработки органических отходов:

- 1 — блок предварительной подготовки и подачи отходов;
 2 — блок плазменной обработки отходов;
 3 — блок теплообменного оборудования;
 4 — блок подготовки синтез-газа; 5 — блок генерации тепловой энергии;
 6 — блок генерации электрической энергии; 7 — блок управления
- Fig. 1. Scheme of an integrated system for processing organic waste:
 1 — waste pretreatment and supply unit; 2 — waste plasma processing unit;
 3 — unit of heat exchange equipment; 4 — synthesis gas treatment unit;
 5 — thermal energy generation unit; 6 — power generation unit; 7 — control unit

ной осушки, измельчения и дозированной подачи сырья с размером частиц 10–20 мм, блок плазменной обработки содержит плазменный реактор газификации сырья, в котором имеется электрохимический источник высокотемпературной плазмы и реакционная зона для проведения химической реакции образования синтез-газа при температуре 1600–2000 °С, блок теплообменного оборудования содержит колонну, обеспечивающую охлаждение синтез-газа за счет контактного теплообмена с теплоносителем, и систему теплообменников рекуперации тепла для осуществления возможности осушки сырья в блоке предварительной подготовки и подачи сырья, блок подготовки синтез-газа содержит сепаратор для отделения конденсированного шлака, смолы, растворов оксидов щелочных металлов и части кислотных газов от образованного синтез-газа, а также узел фильтров, обеспечивающих очистку и осушку синтез-газа, блок генерации тепловой энергии включает работающие на синтез-газе газовые котлы, блок генерации электроэнергии включает работающие на синтез-газе поршневые электрогенераторы, а блок управления выполнен с возможностью автоматизированного управления алгоритмами запуска, вывода на режим, регулиро-

вания, выключения комплекса, а также противопожарного и экологического мониторинга.

На рис. 1 приведен вариант схемы комплексной системы переработки органических отходов. Блоки, входящие в комплекс, содержат функциональное оборудование, размещены на промышленной площадке и соединены коммуникациями.

Твердые отходы лесозаготовки (древесная кора) привозятся на площадку транспортом и подаются в блок предварительной подготовки и подачи сырья 1, где происходит их сортировка, измельчение до размера частиц 10–20 мм, предварительный подогрев и осушка коры до влагосодержания не более 40% мас. паром, подаваемым от расположенного в блоке 3 системы теплообменников рекуперации тепла, далее кора дозированно подается в блок 2 плазменной обработки, где происходит ее газификация в реакционной зоне плазменного реактора, содержащего электрохимический источник высокотемпературной плазмы, при температуре 1600–2000 °С с получением синтез-газа. Благодаря высокой температуре органическая составляющая отходов конвертируется полностью в синтез-газ (преимущественно монооксид углерода, СО и водород, H₂), полностью разрушаются токсичные со-

ставляющие, такие как диоксины, фураны и их производные. Электроэнергия на электрохимический источник высокотемпературной плазмы поступает от блока 6, а плазмообразующий газ — водяной пар, подается от блока 5. Далее синтез-газ поступает в блок теплообменного оборудования 3, где происходит его охлаждение в колонне за счет контактного теплообмена с теплоносителем — водой, подаваемой в блок 3. Применяемый режим охлаждения — так называемая закалка — быстрое понижение температуры на выходе из реактора до такого уровня, в котором токсичные составляющие, такие как диоксины, фураны и их производные, заново не синтезируются. Полученный охлажденный синтез-газ поступает в сепаратор блока 4, где от него отделяются шлаки, смолы, растворы оксидов щелочных металлов и части кислотных газов, и далее синтез-газ проходит очистку и осушку в узле фильтров блока 4. Подготовленный до требований топливного газа синтез-газ подается в качестве топлива в блок генерации тепловой энергии 5 в газовые паровые котлы, а также подается в блок генерации электрической энергии 6 в работающие на синтез-газе поршневые или турбинные электрогенераторы. Блок управления 7 обеспечивает дистанционное без присутствия персонала управление работой комплекса. Оснащение комплекса блоком управления 7 с диагностическим оборудованием позволяет автоматизировать управления процессом газификации, собирать всю информацию для противопожарного и экологического мониторинга, а также для последующего анализа с целью оптимизации режимов работы. Образующийся в блоке 4 синтез-газ представляет собой смесь водорода H_2 (55–65%) и оксид углерода CO (35–45%). Давление в реакторе не более 1,0 МПа.

Существуют промышленные методы получения метанола при малотоннажном производстве из оксида углерода и водорода. Равновесный выход метанола, степень и скорость конверсии оксидов углерода зависят от режимов работы катализаторов и состава газовой смеси, идущей на синтез метанола: давления, температуры, отношения H_2/CO , содержания CO_2 , водяного пара, инертных компонентов, отношения CO/CO_2 . Номинальные режимы работы наиболее распространенных типов катализаторов Katalco-51-9 Johnson Matthey (ICI), Великобритания, C79-7GL Zud-Chemie AG, Германия, МК-121 Haldor Topsoe, Дания таковы: диапазон давлений синтез-газа 4–10 МПа, температурный интервал эксплуатации 200–280 °С [9].

На основании предположительных исходных данных подберем компрессор для решения задачи компримирования синтез-газа. Производительность компрессорной установки принимаем от 1000 $nm^3/час$. Расчет компрессора выполняется по специально разработанной программе на основе методов математического моделирования. Конкретные значения параметров выбираются из условий энергоэффективности.

Математическая модель

Для анализа работы компрессора на стадии проектирования всех возможных режимов эксплуатации может применяться математическая модель [10]. Математическая модель (ММ) включает в себя: уравнение первого начала термодинамики в дифференциальной форме, уравнения массовых расходов, уравнение состояния, calorические уравнения,

уравнение динамики механизма движения и уравнение динамики клапана. Уравнение термодинамики тела переменной массы записывается в энергетической форме, т.е. в качестве основного выбрано уравнение изменения внутренней энергии, при этом, значения давления и температуры находятся из уравнения состояния газа.

Исходная система уравнений для описания свойств газа в рассматриваемой полости выглядит следующим образом [11–15]

$$\frac{dU}{dt} = \alpha F_{ct}(T_{ct} - T) - \frac{PdV}{dt} + \sum_j i_j \bar{m}_j - \sum_l i_l \bar{m}_l;$$

$$\frac{dM}{dt} = \sum_j \bar{m}_j - \sum_l \bar{m}_l;$$

$$\rho = M/V;$$

$$u = U/M;$$

$$T = (k-1)u/R;$$

$$p = \rho RT;$$

$$i = k/(k-1)RT,$$

где U — внутренняя энергия, Дж; t — время, с; α — коэффициент теплоотдачи, Дж/м²/К; F_{ct} — площадь теплообменной поверхности, м²; T_{ct} — температура стенок, К; T — температура, К; P — давление, Па; V — объем полости, м³; i_j, i_l — удельная энтальпия притекающего и утекающего газа, Дж/кг; \bar{m}_j, \bar{m}_l — массовый расход притекающего и утекающего газа, кг/с; M — масса газа, кг; ρ — плотность, кг/м³; u — удельная внутренняя энергия, Дж/кг; z — коэффициент сжимаемости; R — газовая постоянная, Дж/(кг·К).

Уравнение движения запорного органа клапана в зависимости от времени имеет следующий вид [11–15]

$$m_{np} \frac{d^2h}{dt^2} = \xi_p F_c \Delta P - c(h + h_0) - \eta \frac{dh}{dt} + m_{np} g \cos \beta,$$

где m_{np} — приведенная масса подвижных элементов клапана, кг; h — перемещение запорного органа клапана, м; ξ_p — коэффициент давления; F_c — площадь проходного сечения в седле клапана, м²; ΔP — перепад давления на клапане, Па; c — жесткость упругих элементов клапана, Н/м; h_0 — предварительное поджатие упругих элементов клапана, м; η — коэффициент демпфирования; g — ускорение свободного падения, м/с²; β — угол между осью движения и направлением силы тяжести, рад.

Для расчета промежуточного давления между ступенями проводится моделирование рабочего процесса в промежуточной полости. Разработанная математическая модель основана на упрощенном описании состояния газа в промежуточной полости компрессора. Основные допущения следующие: газовая среда непрерывна и гомогенна; объем промежуточных коммуникаций много больше объема предыдущей ступени; пульсации параметров газа отсутствуют; параметры газа по всему объему рабочей полости изменяются мгновенно; изменение потенциальной и кинетической энергий газа пренебрежимо мало; параметры теплообмена описыва-

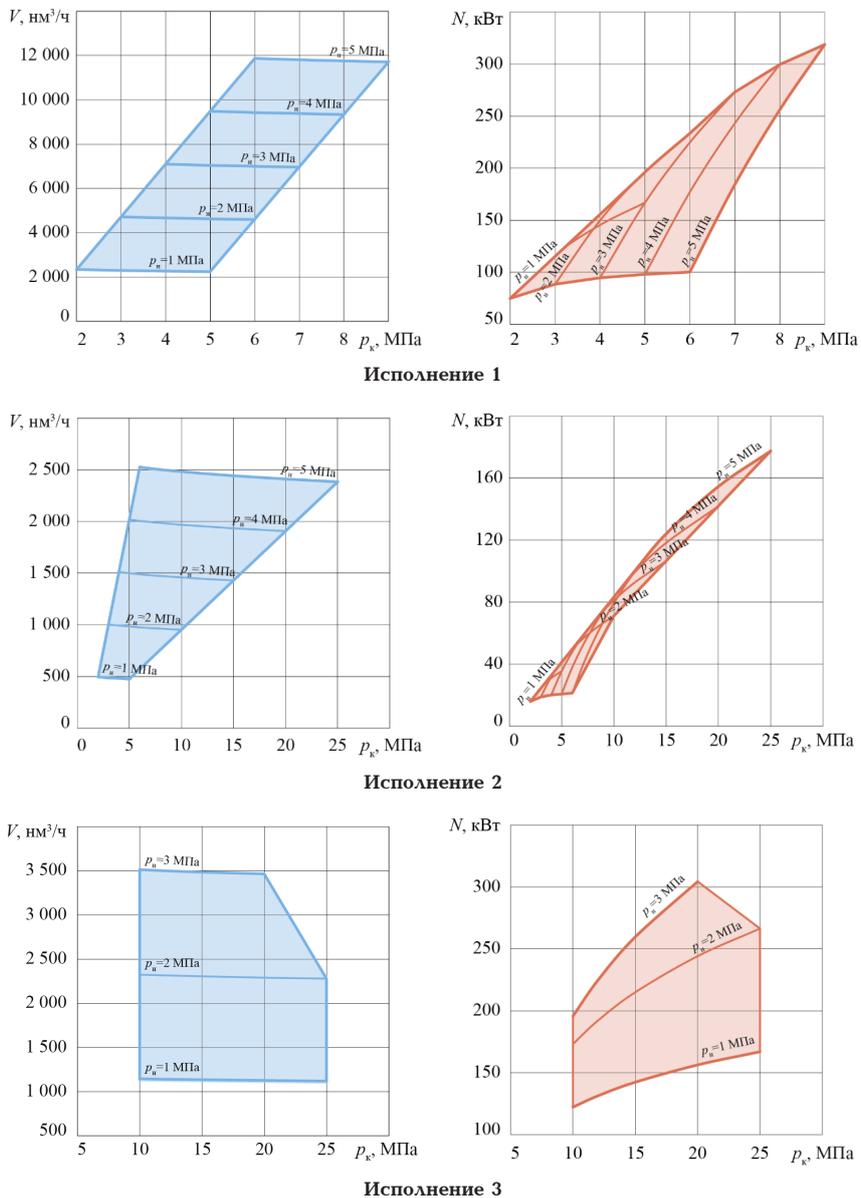


Рис. 2. Зона работы компрессора
Fig. 2. Compressor operation area

ются уравнением Ньютона; средний коэффициент теплоотдачи берется на основании теплового расчета теплообменного аппарата.

Система уравнений для описания параметров газа в промежуточной полости записывается в следующем виде:

$$\frac{dU}{dt} = \frac{dQ}{dt} + i_{k-1} \dot{m}_{k-1} - i_k \dot{m}_k - i_{отб} \dot{m}_{отб},$$

$$k = 2 \dots z;$$

$$\frac{dM}{dt} = m_{i-1} - m_i - m_{отб};$$

$$\rho = M / V;$$

$$u = U / M,$$

где z — число ступеней, шт.; $m_{отб}$ — масса газа, отводимого из промежуточной полости, кг.

При допущении, что коэффициент теплопередачи по всей поверхности теплообмена постоянный, расчет теплообмена можно выполнить по формуле

$$Q = kF\Delta t,$$

где k — коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·К); F — площадь поверхности теплообмена, м²; Δt — средний температурный напор, К.

Результаты расчетов

Проведем анализ работы компрессора на различных режимах эксплуатации. Рассматриваемый компрессор может использовать в диапазоне изменения конечного давления от 4 до 25 МПа, в зависимости от применяемого способа утилизации синтез-газа. Так, при синтезе метанола на цинк-хромовых катализаторах необходимо давление 20—35 МПа при температуре 370—420 °С, при синтезе метанола на цинк-медь-алюминиевых или цинк-медь-хромовых катализаторах необходимо давление 5—10 МПа при температуре 250—300 °С. Необходимо определить характеристики компрессора в диапазоне возможных рабочих параметров в зависимости от конечного давления.

На рис. 2 приведены возможные зоны работы компрессора для трех вариантов конструктивного исполнения. В исполнении 1 компрессор имеет два одинаковых цилиндра двойного действия диаметром 130 мм. При этом компрессор является одноступенчатым. Начальное давление может изменяться от 1 до 5 МПа, конечное давление ограничивается исходя из допустимой нагрузки на механизм движения. В исполнении 1 компрессор обеспечивает высокую производительность при низком конечном давлении. В исполнении 2 компрессор также является одноступенчатым и имеет два одинаковых цилиндра двойного действия, но диаметром 65 мм. Это позволяет получить более высокие конечные давления, но с меньшей производительностью компрессора. В исполнении 3 компрессор является двухступенчатым и имеет первый цилиндр двойного действия диаметром 130 мм, в второй цилиндр диаметром 65 мм. В исполнении 3 компрессор позволяет обеспечивать более высокую степень сжатия.

Спроектированный компрессор представляет собой двухрядный поршневой оппозитный компрессор [16].

Компрессор отличается тем, что коленчатый вал выполнен с углом смещения колен 180° и содержит три шатунные шейки — центральную и две боковые соосно расположенные шейки, при этом на двух боковых шейках установлены два одинаковых шатуна первого ряда, соединенных с крейцкопфом первого ряда, а на центральной шейке установлен шатун второго ряда, соединенный с крейцкопфом второго ряда, при этом масса вращающихся и поступательно движущихся элементов первого ряда равна массе вращающихся и поступательно движущихся элементов второго ряда.

Предлагаемая конструкция поршневого оппозитного компрессора обеспечивает движение поршней в цилиндрах, расположенных с противоположных сторон от коленчатого вала, вдоль одной оси, что позволяет полностью исключить инерционные моменты, которые присутствуют в оппозитных компрессорах традиционной конструкции. В предложенной конструкции исключается воздействие изгибающих моментов на коленчатый вал и шатуны, благодаря чему обеспечивается равномерность распределения масляной пленки в коренных и шатунных подшипниках и увеличивается ресурс работы трущихся частей, полностью исключаются вибрации, тем самым отсутствуют возмущения, передаваемые на фундамент и газовые коммуникации.

Предлагаемая конструкция за счет исключения неуравновешенных моментов инерции обеспечивает возможность повышения частоты вращения коленчатого вала компрессора до 1500 об/мин, что позволяет повысить производительность компрессора и снизить его массогабаритные характеристики.

Таким образом, благодаря использованию единой базы (блок картера) и введению унифицированного ряда цилиндров, АО «Компрессор» имеет возможность в кратчайшие сроки поставлять готовый компрессор под конкретные параметры, требуемые заказчику.

Заключение

В работе предложен перспективный комплекс для переработки твердых органических отходов посредством их паровой плазменной газификации с получением метанола. Для сжатия синтез-га-

за спроектирован поршневой компрессор ДКУ-3, работающий в широком диапазоне начального и конечного давления от 4 до 25 МПа. Компрессор может поставляться в трех различных вариантах конструктивного исполнения в зависимости от конкретных режимов эксплуатации. Спроектированный компрессор также может применяться для сжатия других газов, например, для природного газа в составе АГНКС [17]. Разработанная математическая модель позволила еще на стадии проектирования провести параметрический анализ компрессора на всех режимах эксплуатации.

Список источников

1. Пат. 2741004 Российская Федерация, МПК С 10 J 3/00, С 10 J 3/06, С 10 J 3/14, С 10 J 3/20. Комплекс для переработки твердых органических отходов / Кузнецов Л. Г., Кузнецов Ю. Л., Бураков А. В., Перминов А. С., Шарифова С. Э. № 2020114875; заявл. 20.04.20; опубл. 21.01.21, Бюл. № 3.
2. Туманов Ю. Н. Электротехнологии нового поколения в производстве неорганических материалов: экология, энергосбережение, качество: моногр. Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2013. С. 742–743. ISBN 978-5-9221-1516-2.
3. Котлов А. А., Попова Е. Ю., Кузнецов Л. Г., Бураков А. В. Прогнозирование работы многоступенчатого поршневого компрессора на различных режимах эксплуатации // Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства: материалы X Междунар. науч.-техн. конф. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2020. С. 120–121. ISBN 978-5-8149-2977-8.
4. ГОСТ Р 56070-2014. Отходы древесные. Технические условия. Введ. 2015–01–01. Москва: Стандартинформ, 2014. 8 с.
5. Уголев Б. Н. Древесиноведение с основами лесного товароведения. Изд. 2-е перераб. и доп. Москва: Лесная промышленность, 1986. 370 с.
6. Коновалов В. Н., Зарубина Л. В. Влияние хлорсодержащих удобрений на метаболизм ели и сосны в северотаежных фитоценозах // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2017. № 3 (357). С. 100–113. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.3.100.
7. Пат. 2591075 Российская Федерация, МПК F 22 В 33/18, F 23 G 5/027. Полигенерирующий энерготехнологический комплекс / Шевырев С. А., Богомолов А. Р. № 2015117873/06; заявл. 12.05.15; опубл. 10.07.16, Бюл. № 19.
8. Пат. 2489475 Российская Федерация, МПК С 10 J 3/16, F 23 G 5/027. Способ переработки органических отходов / Тимербаев Н. Ф., Сафин Р. Г., Зиатдинова Д. Ф. [и др.]. № 2011151356/05; заявл. 15.12.11; опубл. 10.08.13, Бюл. № 22.
9. Загашвили Ю. В., Кузьмин А. М. Оптимизация состава синтез-газа для малотоннажного производства метанола // НефтеГазХимия. 2018. № 3. С. 39–43. DOI: 10.24411/2310-8266-2018-10303.
10. Котлов А. А. Математический анализ работы двухступенчатого дожимающего компрессора, предназначенного для сжатия метана // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24, № 4. С. 51–60. DOI: 10.18721/JEST.24405.
11. Mistry H., Bhakta A., Dhar S. [et al.]. Capturing valve dynamics in reciprocating compressors through computational fluid dynamics // In 21st International Compressor Engineering Conference at Purdue. 2017. 1210.
12. Isakov V. P., Chrustalev B. S. Automatic valves of piston compressors for various ranges of application // Chemical and Petroleum Engineering. 1995. Vol. 31. P. 669–672. DOI: 10.1007/BF01155754.
13. Ignatiev K. M., Chrustalev B. S., Perevozchikov M. M., Zdaslinsky V. B. Simulation and parametric analysis of the suction valve and muffler off small reciprocating compressor // International Compressor Engineering Conference. 1996. 1107. P. 205–209.

14. Mistry H., Bhakta A., Dhar S. [et al.]. Capturing valve dynamics in reciprocating compressors through computational fluid dynamics // 21st International Compressor Engineering Conference at Purdue, West Lafayette-IN, EUA. 2012. 1210.

15. Kotlov A. A. Calculation and Selection of Parameters of the Ring Valve of Reciprocating Compressor // AIP Conference Proceedings. 2019. Vol. 2141. 030020. DOI: 10.1063/1.5122070

16. Пат. 165141 Российская Федерация, МПК F 04 В 27/02. Двухрядный поршневой оппозитный компрессор / Кузнецов Л. Г., Кузнецов Ю. Л., Бураков А. В., Пономарев А. Ю., Лапина А. А. № 2016115838/06; заявл. 25.04.16; опубл. 10.10.16.

17. Котлов А. А., Кузнецов Ю. Л., Бураков А. В. Анализ работы поршневого компрессора, работающего в составе автомобильной газонаполнительной компрессорной станции // Компрессорная техника и пневматика. 2019. № 2. С. 27–32.

БУРАКОВ Александр Васильевич, начальник центрального конструкторского бюро, АО «Компрессор», г. Санкт-Петербург.

SPIN-код: 8501-1234

AuthorID (РИНЦ): 994917

AuthorID (SCOPUS): 57210981312

Адрес для переписки: burakovs@mail.ru

КОТЛОВ Андрей Аркадьевич, кандидат технических наук, ведущий инженер АО «Компрессор», г. Санкт-Петербург.

SPIN-код: 7304-7079

AuthorID (РИНЦ): 653245

AuthorID (SCOPUS): 57203586344

Адрес для переписки: kotlov_andrej@mail.ru

ЛЕВИХИН Артем Алексеевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), заведующий кафедрой «Двигатели и энергоустановки летательных аппаратов» Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург.

SPIN-код: 3891-7890

AuthorID (РИНЦ): 874433

Адрес для переписки: komdep@bstu.spb.su

Для цитирования

Бураков А. В., Котлов А. А., Левихин А. А. Компрессорное оборудование для повышения эффективности комплексов переработки твердых органических отходов // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2021. Т. 5, № 3. С. 54–62. DOI: 10.25206/2588-0373-2021-5-3-54-62.

Статья поступила в редакцию 31.05.2021 г.

© А. В. Бураков, А. А. Котлов, А. А. Левихин

COMPRESSOR EQUIPMENT FOR ENHANCING EFFICIENCY OF SOLID ORGANIC WASTE PROCESSING PLANTS

A. V. Burakov¹, A. A. Kotlov¹, A. A. Levikhin²

¹JSC «Compressor»,
Russia, Saint Petersburg, Bolshoy Sampsonievsky Ave., 64, 194044
²Baltic State Technical University «VOENMEH» named after D. F. Ustinov,
Russia, Saint Petersburg, 1st Krasnoarmeiskaya St., 1, 190005

The article describes the experience of the Compressor holding company in the creation of compressor equipment for various industries. The use of compressors as part of complexes for the processing of organic waste in the framework of solving urgent environmental problems has been demonstrated. The process of compression of synthesis gas to increase the efficiency of the processing process has been investigated. To ensure stable parameters, reliable operation of syngas reciprocating compressors is required in wide ranges of operating parameters. Ensuring the operability of the compressor in wide ranges of parameter variation requires multivariate calculations in order to find the best design parameters of the compressor. A compressor is proposed for the most efficient implementation of the task and its characteristics are calculated.

Keywords: recycling, organic waste, synthesis gas, piston compressor, mathematical model.

References

1. Patent 2741004 Russian Federation, IPC C 10 J 3/00, C 10 J 3/06, C 10 J 3/14, C 10 J 3/20. Kompleks dlya pererabotki tverdykh organicheskikh otkhodov [Complex for processing solid organic wastes] / Kuznetsov L. G., Kuznetsov Yu. L., Burakov A. V., Perminov A. S., Sharifova S. E. No. 2020114875. (In Russ.).
2. Tumanov Yu. N. Elektrotehnologii novogo pokoleniya v proizvodstve neorganicheskikh materialov: ekologiya, energosberezheniye, kachestvo [New generation electrical technologies in the production of inorganic materials: ecology, energy saving, quality]. Moscow, 2013. P. 742–743. ISBN 978-5-9221-1516-2. (In Russ.).
3. Kotlov A. A., Popova E. Yu., Kuznetsov L. G., Burakov A. V. Prognozirovaniye raboty mnogostupenchatogo porshnevogo kompressora na razlichnykh rezhimakh ekspluatatsii [Predicting the operation of a multistage reciprocating compressor in various operating modes] // Tekhnika i tekhnologiya neftekhimicheskogo i neftegazovogo proizvodstva. *Oil and Gas Engineering (OGE-2020)*. Omsk, 2020. P. 120–121. ISBN 978-5-8149-2977-8. (In Russ.).
4. GOST P 56070-2014. Otkhody drevesnyye. Tekhnicheskiye usloviya [Woodwaste. Technical conditions]. Moscow, 2014. 8 p. (In Russ.).
5. Ugolev B. N. Drevesinovedeniye s osnovami lesnogo tovarovedeniya [Wood science with the basics of forest commodity science]. 2nd ed. Moscow, 1986. 370 p. (In Russ.).
6. Konovalov V. N., Zarubina L. V. Vliyaniye khlorosoderzhashchikh udobreniy na metabolizm eli i sosny v severotayezhnykh fitotsenozakh [The influence of chlorine-containing fertilizers on metabolism of spruce and pine in the north taiga plant communities] // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal. *Russian Forestry Journal*. 2017. No. 3 (357). P. 100–113. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.3.100. (In Russ.).
7. Patent 2591075 Russian Federation, IPC F 22 B 33/18, F 23 G 5/027. Poligeneriruyushchiy energotekhnologicheskii kompleks [Poly-generating energy system] / Shevryev S. A., Bogomolov A. R. No. 2015117873/06. (In Russ.).
8. Patent 2489475 Russian Federation, IPC C 10 J 3/16, F 23 G 5/027. Sposob pererabotki organicheskikh otkhodov [Method of treating organic wastes] / Timerbayev N. F., Safin R. G., Ziatdinova D. F. [et al.]. No. 2011151356/05. (In Russ.).
9. Zagashvili Yu. V., Kuz'min A. M. Optimizatsiya sostava sintez-gaza dlya malotonnazhnogo proizvodstva metanola [Optimization of the composition of the synthesis gas for small-tonnage reduction of methanol] // *NefteGazoKhimiya. Oil & Gas Chemistry*. 2018. No. P. C. 39–43. DOI: 10.24411/2310-8266-2018-10303. (In Russ.).
10. Kotlov A. A. Matematicheskiy analiz raboty dvukhstupenchatogo dozhimayushchego kompressora, prednaznachenogo dlya szhatiya metana [Mathematical analysis of operation of a two-stage pressurized compressor designed to compress methane] // Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbPU. Estestvennyye i inzhenernyye nauki. *St. Petersburg Polytechnic University Journal of Engineering Science and Technology*. 2018. Vol. 24, no. 4. P. 51–60. DOI: 10.18721/JEST.24405. (In Russ.).
11. Mistry H., Bhakta A., Dhar S. [et al.]. Capturing valve dynamics in reciprocating compressors through computational fluid dynamics // International Compressor Engineering Conference at Purdue. 2017. 1210. (In Engl.).
12. Isakov V. P., Chrustalev B. S. Automatic valves of piston compressors for various ranges of application // *Chemical and Petroleum Engineering*. 1995. Vol. 31. P. 669–672. DOI: 10.1007/BF01155754. (In Engl.).
13. Ignatiev K. M., Chrustalev B. S., Perevozchikov M. M., Zdaslinsky V. B. Simulation and parametric analysis of the suction valve and muffler off small reciprocating compressor // International Compressor Engineering Conference. 1996. 1107. P. 205–209. (In Engl.).
14. Mistry H., Bhakta A., Dhar S. [et al.]. Capturing valve dynamics in reciprocating compressors through computational fluid dynamics // 21st International Compressor Engineering Conference at Purdue, West Lafayette-IN, EUA. 2012. 1210. (In Engl.).
15. Kotlov A. A. Calculation and Selection of Parameters of the Ring Valve of Reciprocating Compressor // AIP Conference Proceedings. 2019. Vol. 2141. 030020. DOI: 10.1063/1.5122070. (In Engl.).
16. Patent. 165141 Russian Federation, IPC F 04 B 27/02. Dvukhryadnyy porshnevyy oppozitnyy kompressor [Double

row reciprocating compressor] / Kuznetsov L. G., Kuznetsov Yu. L., Burakov A. V., Ponomarev A. Yu., Lapina A. A. No. 2016115838/06. (In Russ.).

17. Kotlov A. A., Kuznetsov Yu. L., Burakov A. V. Analiz raboty porshneвого kompressora, rabotayushchego v sostave avtomobil'noy gazonapolnitel'noy kompressornoй stantsii [The analysis of the operation of a piston compressor working as a part of automobile gas-filling compressor stations] // *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika. Compressors and Pneumatics*. 2019. No. 2. P. 27 – 32. (In Russ.).

BURAKOV Aleksandr Vasiliyevich, Head of Central Design Bureau, JSC «Compressor», Saint Petersburg.

SPIN-code: 8501-1234

AuthorID (RSCI): 994917

AuthorID (SCOPUS): 57210981312

Correspondence address: burakovs@mail.ru

KOTLOV Andrey Arkadyevich, Candidate of Technical Sciences, Leading Engineer, JSC «Compressor», Saint Petersburg.

SPIN-code: 7304-7079

AuthorID (RSCI): 653245

Correspondence address: kotlov_andrej@mail.ru

LEVIKHIN Artem Alekseyevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Engines and Power Plants of Aircraft Department, Baltic State Technical University «VOENMEH» named after D. F. Ustinov, Saint Petersburg.

SPIN-code: 3891-7890

AuthorID (RSCI): 874433

Correspondence address: komdep@bstu.spb.su

For citations

Burakov A. V., Kotlov A. A., Levikhin A. A. Compressor equipment for enhancing efficiency of solid organic waste processing plants // *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2021. Vol. 5, no. 3. P. 54–62. DOI: 10.25206/2588-0373-2021-5-3-54-62.

Received May 31, 2021.

© A. V. Burakov, A. A. Kotlov, A. A. Levikhin