

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГИДРОТЕРМАЛЬНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ОРГАНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ В РЕАКТОРЕ ПОЛНОГО СМЕШЕНИЯ ПРОТОЧНОГО ТИПА

А.В. Федотов — ГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ»,
Москва, Россия. ORCID 0000-0002-2968-1888. Эл. почта: fedotov48@list.ru

©2021 г. Поступила в редакцию 02.12.2020 г. Прошла рецензирование 20.12.2020 г.
Принята к публикации 20.12.2020 г.

Показана эффективность переработки органических жидких и твердых отходов агропромышленного комплекса (АПК) в процессе окисления в сверхкритических условиях (СК-условиях), конверсия составляет не менее 99,7 %. Установлена зависимость между объемом реактора непрерывного действия и содержанием органических веществ. Высокие скорости окисления отходов в СК-условиях позволяют достичь производительности около 100 кг отходов в час при объеме реактора 100–140 л. Теплонапряженность реактора может составлять 730 кВт/м³.

Ключевые слова: биомасса, отходы АПК, сверхкритические условия, реактор идеального смешения, экология, энергия.

ВВЕДЕНИЕ

Отрицательное воздействие предприятий АПК на окружающую среду обусловлено возрастающим потреблением природных ресурсов и образованием большого количества отходов, приводящих к ее антропогенному загрязнению. В РФ ежегодно генерируется более 770 млн т отходов [1]. В среднем около 300 тыс. т загрязняющих веществ выбрасывается в атмосферу предприятиями перерабатывающего подкомплекса АПК. Отходы являются преимущественно органосодержащими материалами, и их переработка в качестве возобновляемых источников энергии (ВИЭ) позволяет получать дополнительную энергию и решать актуальные экологические проблемы [2, 3]. Вклад вторичных ВИЭ на основе биомассы в мировое производство энергии составляет 1,8 %; в России производство электроэнергии и тепла из биомассы пока ничтожно мало (0,15 %). По сравнению с другими видами топлива биомасса считается одним из перспективных видов, учитывая такие свойства, как возобновляемость, практически повсеместная доступность, а также незначительное влияние на баланс содержания углекислого газа в атмосфере.

Таким образом, проблема утилизации отходов АПК является актуальной и имеет важное экологическое, экономическое и энергосберегающее значение. Среди различных методов переработки биомассы гидротермальная технология в СК-условиях является экономически и экологически эффективным методом конверсии органических отходов с целью получения тепловой энергии и горючих газов [4–6].

Цель работы — оценка эффективности переработки органических отходов окислением в сверхкритической воде в лабораторных и промышленных условиях, а также получение предварительных данных о зависимости объема

реактора от его производительности, необходимых для проектирования оборудования.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Исходные материалы — твердые и жидкие органосодержащие отходы сельского хозяйства и перерабатывающих предприятий АПК: сток свинофермы, молочная творожная сыворотка, спиртовая барда, гречневая лузга, а также торф, древесная мука и композиции твердых отходов в жидких. Твердые отходы предварительно измельчали и далее отсеивали фракцию размером, менее 200 мкм. Жидкие отходы и суспензии обрабатывали в аппарате роторно-пульсационного типа для обеспечения гомогенизации и седиментационной устойчивости смеси.

Концентрацию органических соединений и степень их деструкции оценивали по значению химического потребления кислорода (ХПК), который определяли титриметрическим методом путем окисления органических соединений бихроматом калия в кислой среде [7].

Состав газовых смесей определяли хроматографическим методом на хроматографе «Кристалл-5000» по гостированным методикам [8, 9].

Переработку биомассы проводили в реакторе экспериментального стенда в периодическом режиме, характеристики которого представлены в табл. 1. После нагрева реактора и достижения СК-условий (температура 500 °С, давление 25 МПа) в него одновременное вводили суспензии отходов и окислитель в количестве, превышающем стехиометрическое на 15 %. В качестве окислителя использовали кислород воздуха или 50 %-ный водный раствор пероксида водорода. Стехиометрическое количество m 50 %-ного H_2O_2 или воздуха (г) в 1 л водной смеси рассчитывали, исходя из значения ХПК по формулам (1) и (2), соответственно:

$$m_{H_2O} = 4,25 \cdot XPK_{исх}, \quad (1)$$

$$m_{возд} = 4,31 \cdot XPK_{исх}, \quad (2)$$

где $XPK_{исх}$ — исходное значение ХПК смеси, г O_2 /л.

Таблица 1

Технические характеристики экспериментального стенда

Характеристика	Значение
Вес установки, кг	950
Максимальная температура эксплуатации, °С	600
Объем реактора, л	4,8
Максимальное давление в реакторе, МПа	30
Производительность, т/сутки	1,0
Габаритные размеры, м	2,5×1,4×2,1
Уровень шума не более, дБ	60
Обслуживающий персонал — оператор	1 человек

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Окисление органических соединений является экзотермической реакцией, общее тепловыделение которой определяется концентрацией органических веществ в смеси отходов и их теплотворной способностью. Следовательно, для расчета общей теплотворной способности процесса необходимо знать эти значения для каждого компонента и их концентрацию в смеси отходов, что зачастую оказывается неизвестным. Однако оказалось, что прослеживается линейная зависимость между величиной ХПК смеси (г O_2 /л) и теплотворной способностью органических соединений (Q , МДж/кг) при их содержании 1 г в 1 л (рис. 1), которая подчиняется уравнению

$$Q = 13,8 \cdot \text{ХПК}. \quad (3)$$

Рисунок 1 построен на основании литературных данных о теплотворной способности индивидуальных веществ и рассчитанных значений ХПК при их содержании 1 г в 1 л по химической реакции окисления вещества кислородом. По-видимому, можно экспериментально получить зависимость и между теплотворной способностью смеси и ее значением ХПК, и в дальнейшем по этой зависимости судить о тепловыделении при переработке отходов неизвестного состава, что требует экспериментальной проверки.

Как было показано, ХПК отходов различается в широких пределах (табл. 2). Высокие значения ХПК и, соответственно, теплотворной способности соответствуют суспензиям, в которых в качестве дисперсионной среды используется раствор жидких отходов, а в качестве дисперсной фазы — измельченные твердые отходы.

Величина ХПК после сверхкритического водного окисления не превышает 200 мг O_2 /л, что меньше допустимого значения ХПК для сброса в канализацию (500 мг O_2 /л) [10]. Степень переработки составляет более 99,7%. По данным хроматографического анализа конечными продуктами переработки являются вода, углекислый газ и азот. Благодаря сравнительно низкой температуре процесса деструкции и замкнутости системы, в ней не образуются

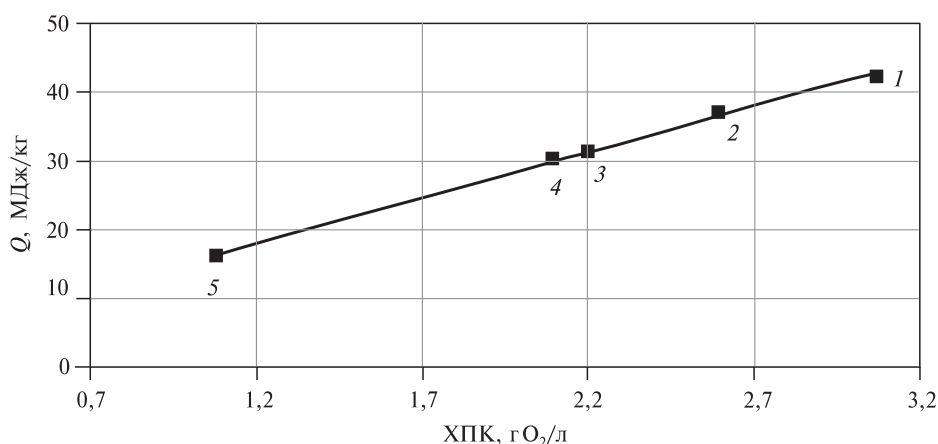


Рис. 1. Зависимость теплоты сгорания индивидуальных соединений от значения ХПК раствора при их содержании 1 г в 1 л:

1 — бензол, 2 — бутанол, 3 — ацетон, 4 — этанол, 5 — глюкоза

Таблица 2

Результаты гидротермальной обработки в сверхкритических условиях

Наименование отходов	ХПК _{исх} , мг O ₂ /л	ХПК _{кон} , мг O ₂ /л	Время обработки, с
Стоки свиноводческие	34 500	50	80
Молочная сыворотка	68 000	150	120
Гречневая лузга	77 500	170	150
Гречневая лузга в свиноводческих стоках	180 000	150	190
Гречневая лузга в молочной сыворотке	240 000	200	180
Спиртовая барда	85 000	140	110
Мука древесная в молочной сыворотке	155 000	140	200
Торф 10 %-ный	48 000	120	150

оксиды NO_x и SO₂ и, как следствие, нежелательные выбросы в атмосферу отсутствуют.

Окисление органических веществ является необратимой экзотермической реакцией, обычно протекающей в гетерофазной системе. В СК-условиях растворимость органических соединений и газов неограниченно возрастает, скорость диффузии, в том числе скорости подвода окислителя к поверхности и отвода газообразных продуктов, велики, и эти стадии не являются лимитирующими. Таким образом, использование СК-условий позволяет избежать диффузионных затруднений [11]. В результате время деструкции не превышает 200 с (табл. 2).

С учетом СК-условий реактор экспериментального стенда приближается к типу идеального реактора полного смешения, для которого любой элемент объема реагирующей смеси мгновенно перемешивается со всей средой, содержащейся в реакторе. При этом концентрация любого компонента равномерно распределена по всему реакционному объему и уравнение материального баланса можно записать для всего объема реактора так же, как и для элемента объема.

Для производственных целей важно оценить необходимый объем реактора при заданных значениях ХПК и производительности. Расчет проведен для непрерывного режима работы реактора полного смешения проточного типа, температурный режим и состав среды которого во всех точках объема реактора одинаковы. Для режима полного окисления достаточным является температура 500 °С, давление 25 МПа и время 200 с. При производительности установки по жидкому отходу G_{отх} (кг/ч) с конкретным значением ХПК (г O₂/л) и плотностью (ρ, кг/л) общий массовый расход пероксида водорода и отходов (G_{общ}, кг/ч), поступающих в реактор, можно рассчитать по уравнению (4), в котором, конечно, необходимо учитывать плотность отходов при расчете количества пероксида водорода. Однако плотность отходов не существенно отличается от единицы (например, плотность молочной сыворотки не превышает 1,03 г/см³) и поэтому в дальнейших расчетах плотность не учитывается:

$$G_{\text{общ}} = G_{\text{отх}} + 0,00425 \cdot \text{ХПК} \cdot G_{\text{отх}} \quad (4)$$

Для осуществления процесса окисления эту массу необходимо сжать под давлением 25 МПа и нагреть до 500 °С. Рассчитать объем реактора можно, зная объем продуктов реакции. В результате реакции разложения H_2O_2 образуется вода с массой, равной $0,00225 \cdot \text{ХПК} \cdot G_{\text{отх}}$, и кислород с массой $0,002 \cdot \text{ХПК} \cdot G_{\text{отх}}$. Кислород с органическими отходами образует углекислый газ и воду. Определить их содержание в результате окисления не представляется возможным без знания элементного состава отходов. Однако необходимо учесть, что содержание углерода меняется примерно от 40 % в углеводах, до 50–55 % в белках и до 85 % в жирах. Поэтому расчет массы и объема продуктов реакции окисления проводили по двум вариантам. В первом варианте предполагали, что органическое вещество состоит только из углерода, а во втором — полностью из водорода. В соответствии с уравнением химической реакции окисления углерода до углекислого газа его масса превышает массу кислорода в 1,375 раз, а масса углерода меньше массы кислорода в 2,667 раз. С учетом сказанного, массовый состав продуктов реакции в первом варианте можно представить уравнением (5):

$$G_{\text{общ}} = G_{\text{отх}} - 0,002 \cdot \text{ХПК} \cdot G_{\text{отх}} / 2,667 + 0,00225 \cdot \text{ХПК} \cdot G_{\text{отх}} + 1,375 \cdot 0,002 \cdot \text{ХПК} \cdot G_{\text{отх}}, \quad (5)$$

где $0,002 \cdot \text{ХПК} \cdot G_{\text{отх}} / 2,667$ — масса органического вещества или углерода при расчете по первому варианту, кг/ч; $0,00225 \cdot \text{ХПК} \cdot G_{\text{отх}}$ — масса воды, образующейся при разложении H_2O_2 ; $1,375 \cdot 0,002 \cdot \text{ХПК} \cdot G_{\text{отх}}$ — масса углекислого газа, кг/ч.

После преобразования уравнения (5) получаем уравнение (6):

$$G_{\text{общ}} = G_{\text{отх}} \cdot (1 + 0,00150 \cdot \text{ХПК} + 0,00275 \cdot \text{ХПК}). \quad (6)$$

Последнее слагаемое в уравнении (6) определяет массу углекислого газа. В соответствии с законом сохранения массы, исходное количество отходов и пероксида водорода, рассчитанные по уравнению (4), и конечное количество воды и углекислого газа, рассчитанные по уравнению (6), равны. Однако объем продуктов химической реакции меняется, поскольку изменяются компонентный состав и термодинамические условия.

Объем продуктов химической реакции (V , м^3) можно определить как сумму приведенных объемов компонентов смеси в соответствии с законом Амага, т. е. как сумму произведений масс компонентов на их удельный объем в СК-условиях. Удельный объем воды ($\gamma_{\text{H}_2\text{O}}$) в условиях реакции составляет $11,143 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$ [12]. Удельный объем углекислого газа для условий протекания химической реакции найти не удалось. Известно, что при 500 °С и давлении 9,807 МПа плотность углекислого газа составляет 66,45 $\text{кг}/\text{м}^3$. Тогда при увеличении давления до 25 МПа плотность должна примерно пропорционально увеличиться и составить 169,39 $\text{кг}/\text{м}^3$, а удельный объем (γ_{CO_2}) — $5,903 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$. Произведение полученной суммы приведенных объемов воды и углекислого газа на время химической реакции (200 с или 0,0556 ч) и даст по уравнению (7) объем реактора, через который за время процесса должны пройти продукты реакции:

$$V = G_{\text{отх}} \cdot (1 \cdot \gamma_{\text{H}_2\text{O}} + 0,00150 \cdot \text{ХПК} \cdot \gamma_{\text{H}_2\text{O}} + 0,00274 \cdot \text{ХПК} \cdot \gamma_{\text{CO}_2}) \cdot 0,0556. \quad (7)$$

После подстановки соответствующих значений получим значение объема в литрах:

$$V = (0,6196 + 0,002234 \cdot \text{ХПК}) \cdot G_{\text{отх}}. \quad (8)$$

Рассчитанные зависимости объема реактора при окислении отходов пероксидом водорода для разных величин ХПК и их расхода представлены на рис. 2а.

Подобный расчет был проведен также для варианта окисления воздухом. Полученная зависимость, уравнение (9), представлена на рис. 2б.

$$V = (0,6196 + 0,001988 \cdot \text{ХПК}) \cdot G_{\text{отх}} \quad (9)$$

Как видно из коэффициентов уравнений (8) и (9), а также из данных рис. 2, объемы реакторов имеют примерно одну и ту же величину, но если учитывать экономические факторы, предпочтение следует отдать процессу окисления кислородом воздуха.

По второму варианту, т.е. предполагая, что органическое вещество состоит только из водорода, расчет проводили аналогичным образом. Разница в объеме реакторов по сравнению с первым вариантом не превышала 5%.

Для оценки энергетической эффективности работы реактора важно оценить его теплонапряженность, которая определяется составом парогазовой смеси и теплосодержанием его компонентов. По первому варианту, предполагая, что органическое вещество состоит только из углерода, по уравнению (6) можно рассчитать состав продуктов горения. Для значения ХПК отходов 100, 200 и 300 г O₂/л содержание углекислого газа составит соответственно 19,3; 29,7 и 36,3%. Молекулы воды и углекислого газа содержат три атома, и поэтому в СК-условиях их теплоемкости могут не сильно отличаться. Учитывая это, а также то, что для воды известны термодинамические характеристики в условиях реакции, расчет теплонапряженности реактора проводили для второго варианта, предполагая, что органическое вещество состоит только из водорода. Тогда конечный состав продуктов реакции представлен только водой. Энтальпия пара при температуре 500 °С и давлении 25 МПа составляет 3166 кДж/кг [12]. Теплонапряженность реактора (W , кВт/м³) можно рассчитать по уравнению

$$W = J \cdot G_{\text{общ}}/V, \quad (10)$$

где W и J — теплонапряженность и энтальпия пара; $G_{\text{общ}}$ — общая масса продуктов реакции, рассчитанная по уравнению (4).

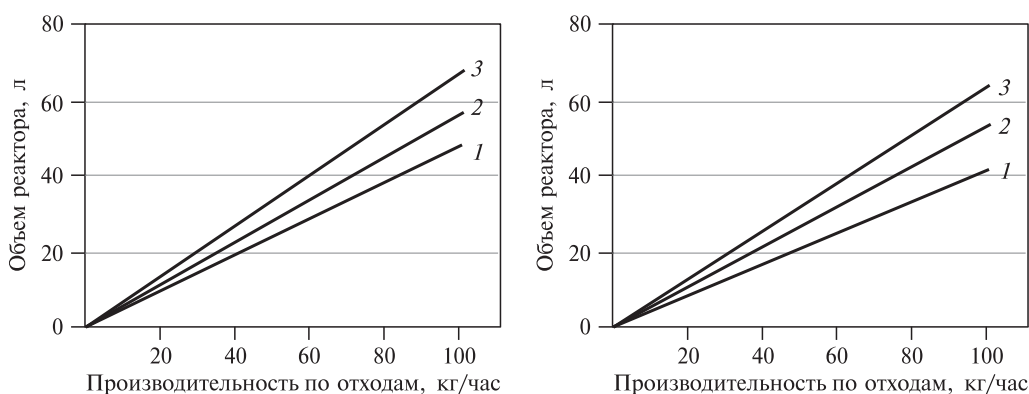


Рис. 2. Зависимость необходимого объема реактора от его производительности при использовании для окисления пероксида водорода (а) или воздуха (б) при различных значениях ХПК, г O₂/л:
1 — 100; 2 — 200; 3 — 300

Для производительности реактора по отходам 100 кг/ч со значением ХПК 200 г O₂/л и объема реактора 120 л рассчитанная теплонапряженность единицы объема реактора (топочного пространства) составит около 732,8 кВт/м³, что в 2—3 раза превышает теплонапряженность многих современных топок паровых котлов. Например, для слоевых топок с неподвижной решеткой и ручной подачей топлива теплонапряженность составляет 290—350 кВт/м³, для слоевых механизированных топок — 290—465 кВт/м³, для камерных топок при сжигании угольной пыли — 145—230 кВт/м³, а при сжигании в них газа или мазута — 230—460 кВт/м³.

Расчет теплонапряженности единицы объема реактора проводили для температуры 500 °С и давления 25 МПа. Для уточнения расчета необходимо учесть результаты определения теплового баланса. Проведенный ранее расчет показал, что тепловыделение отходов при ХПК порядка 200 г O₂/л может составить около 3000 МДж/ч или 840 кВт/м³ [13]. Высокие значения теплонапряженности (около 1 МВт/м³) получены и другими авторами при исследовании окисления бурого угля, непрерывно подаваемого в составе водо-угольной суспензии во встречный поток сверхкритического водоокислородного флюида [14].

В процессе окисления в реакторе образуется высокоэнтальпийная парогазовая смесь с параметрами, подходящими для работы паровых турбин (температура 500 °С и давление до 25 МПа). Основным преимуществом паровых машин, как двигателей внешнего сгорания, является техническая возможность отделения котла от паровой машины, в результате чего можно использовать практически любой вид топлива (источник тепла). Это отличает их от двигателей внутреннего сгорания, каждый тип которых требует использования определенного вида топлива. Полное сжигание отходов в окислительных условиях показывает возможность образования теплоносителя со сверхкритическими параметрами в реакторе, объединяющем в себе функции топочного устройства и котла (как в двигателе внутреннего сгорания). При этом в качестве топлива могут использоваться различные органосодержащие материалы, как и для паровой машины. Этим, а также уменьшением тепловых потерь и металлоемкости конструкции обеспечивается высокая энергетическая эффективность процесса, что отмечают и другие авторы [15]. Окисление топлива непосредственно в теплоносителе минимизирует тепловые потери. Достоинство способа определяется высокой скоростью гетерогенного и гомогенного горения органических отходов в сверхкритических условиях. Исключаются проблемы теплопередачи, поскольку отсутствуют все отрицательные факторы, обусловленные высокими градиентами температуры между теплоносителем (водой) и источником тепла в традиционных схемах. Продукты горения (H₂O и CO₂) становятся частью рабочего тела, что увеличивает КПД генерации электрической энергии. Использование тепла продуктов сгорания в когенерационных схемах позволяет увеличить общий КПД до 90 %.

Технологии утилизации отходов решают задачу уменьшения антропогенного воздействия на окружающую среду, и поэтому в некоторых случаях экономическая эффективность не играет значительной роли. Тем не менее, в зависимости от условий переработки образуются высокоэнтальпийная парогазовая смесь или горючие газы, которые обладают рыночным потенциалом и могут быть использованы по различным когенерационным схемам с получением электрической и тепловой энергии. Расчет экономической эффективности процесса утилизации отходов проводили для участка сверхкритического водного

окисления производительностью 1000 кг/час концентрированной суспензии, содержащей 15 % твердых отходов в 20 %-ном растворе жидких отходов. При этом оценивали экономическую эффективность реализации когенерационной схемы с использованием паровой микротурбины, производящей электроэнергию. Энерговыведение суспензии составляет 4 748 МДж/ч, из которых 3 210 МДж/ч расходуется на нагрев воды, твердых отходов и воздуха, а также на потери тепла через стенки реактора. Остальное тепло преобразуется в электроэнергию для возмещения, в основном, затрат на заработную плату, работу вспомогательного оборудования (18 кВт) и амортизацию (10 %). Прибыль составляет 2856,36 тыс. руб/год. В АПК ежегодно генерируется более 770 млн т отходов и при переработке только 1 млн т отходов прибыль составит около 286 млн руб.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Органические вещества твердых и жидких отходов АПК в сверхкритических условиях превращаются в экологически безопасные продукты — воду, углекислый газ и азот. Степень превращения составляет не менее 99,7 %. Реализация сверхкритического водного окисления отходов приводит к получению высокоэнтальпийной парогазовой смеси с избыточным давлением до 25 МПа и температурой до 500 °С, пригодной в качестве рабочего тела паровых турбин для выработки электроэнергии с утилизацией тепла отходящих газов. Установлена линейная зависимость между значением ХПК раствора, а также эмульсии индивидуальных веществ и их теплотой сгорания. Высокие скорости окисления органосодержащих отходов в сверхкритических условиях позволяют минимизировать объем реактора (до 100—140 л в зависимости от содержания органических веществ) при производительности до 100 кг отходов в час. Теплонапряженность реактора при этой производительности со значением ХПК 200 г O₂/л достигает 730 кВт/м³. Технологии утилизации отходов в СК-условиях позволяют уменьшить антропогенное воздействие на окружающую среду и получить прибыль при реализации когенерационной схемы с получением электрической и тепловой энергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голубев И.Г., Шванская И.А., Коноваленко Л.Ю., Лопатников М.В. Рециклинг отходов в АПК. Справочник. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2011. 296 с.
2. Биоэнергетика: Мировой опыт и прогноз развития. Научное издание. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2008. 404 с.
3. Панцхава Е.С., Пожарнов В.А., Кошкин Н.Л. // Энергия. 2002. № 9. С. 21.
4. Rozen A.E., Roshchin A.V., Zverovshchikov A.E., Grachyov V.A., Grigor'ev V.S., Vorob'ev E.V., Kolmakov K.M., Epinat'ev I.D., Raevskaya E.G. // Russ. J. Phys. Chem. B. 2015. V. 9. P. 481.
5. Yoshida Y. // Biomass and Bioenergy. 2003. Vol. 25. P. 257.
6. Табитов И.Р. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Казань, Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2018. 18 с.
7. ПНД Ф 14.1:2.100-97 «Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений химического потребления кислорода в пробах природных и очищенных сточных вод титриметрических методом. М., 2004. 16 с.
8. ГОСТ 23781-71 «Газы горючие природные. Хроматографический метод определения компонентного состава». М.: Стандартинформ, 1993. 11 с.
9. ГОСТ 13320-81 «Газоанализаторы промышленные автоматические. Общие технические условия». М.: Стандартинформ, 1988. 33 с.

Эффективность гидротермальной переработки органических отходов в реакторе полного смешения проточного типа

10. Постановление Правительства РФ от 29.07.2013 N 644 «Об утверждении Правил холодного водоснабжения и водоотведения и о внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации».
 11. Галкин А.А., Лунин В.В. // Успехи химии. 2005. Т. 74. № 1. С. 24.
 12. Александров А.А., Григорьев Б.А. Таблицы стандартных справочных данных ГСССД 187-99. Вода. Удельный объем и энтальпия при температурах 0...100 °С и давлениях 0,001 ... 1000 МПа. М.: Всеросс. научн.-иссл. центр стандартизации, информации и сертификации сырья, материалов и веществ Госстандарта РФ. 1999. 39 с.
 13. Федотов А.В., Ковалев А.А., Григорьев В.С., Лобачевский Я.П., Ценч Ю.С. // Вестник аграрной науки Дона. 2018. № 4 (44). С. 5.
 14. Востриков А.А., Дубов Д.Ю., Сокол М.Я., Федяева О.Н. // Сверхкритические Флюиды: Теория и Практика. 2016. Т. 11. № 1. С. 72.
 15. Vostrikov A.A., Psarov S.A. // Technical Physics Letters. 2002. Vol. 28. No 9. P. 776.
-

EFFICIENCY OF HYDROTHERMAL PROCESSING OF ORGANIC WASTE IN A FULL MIXED FLOW TYPE REACTOR

A.V. Fedotov — Federal Scientific Agroengineering Center WIM, Moscow, Russian Federation.
ORCID 0000-0002-2968-1888. E-mail: fedotov48@list.ru

The efficiency of processing organic liquid and solid wastes of the agro-industrial complex in supercritical conditions is shown. The conversion is at least 99,7 %. The dependence of the volume of a continuous reactor on the content of organic substances has been established. High rates of oxidation of waste in supercritical conditions make it possible to reduce the volume of the reactor (up to 100—140 l) with a capacity of up to 100 kg of waste per hour. The heat density of the reactor can reach 730 kW/m³.

Key words: biomass, agricultural waste, supercritical conditions, ideal mixing reactor, ecology, energy.

REFERENCES

1. Golubev I. G., Shvanskaya I. A., Konovalenko L. Yu., Lopatnikov M. V. Recycling of waste in the agro-industrial complex: handbook. Moscow: FGBNU «Rosinformagrotech», 2011. 296 p.
2. Bioenergetics: World experience and development forecast. Scientific edition. Moscow: FGBNU «Rosinformagrotech», 2008. 404 p.
3. Pantskhava E.S., Pozharnov V.A., Koshkin N.L. Energy, 2002. No. 9. P. 21.
4. Rozen A.E., Roshchin A.V., Zverovshchikov A.E., Grachyov V.A., Grigor'ev V.S., Vorob'ev E.V., Kolmakov K.M., Epinat'ev I.D., Raevskaya E.G. // Russ. J. Phys. Chem. B. 2015. V. 9. P. 481.
5. Yoshida Y. // Biomass and Bioenergy, 2003. 25. P. 257.
6. Gabitov I. R. Abstract of the dis. of the cand. of tech. sciences. Kazan, 2018. 18 p.
7. PND F 14.1: 2.100-97 «Quantitative chemical analysis of waters. Methods for measuring the chemical oxygen consumption in samples of natural and treated wastewater by titrimetric method». М., 2004. 16 p.
8. GOST 23781-71 «Combustible natural gases. Chromatographic method for determining the component composition». М.: Standartinform, 1993. 11 p.
9. GOST 13320-81 « Industrial automatic gas analyzers. General technical conditions». М.: Standartinform, 1988. 33 p.
10. Resolution of the Government of the Russian Federation of 29.07.2013 N 644 «On approval of the Rules of cold water supply and sanitation and on amendments to some acts of the Government of the Russian Federation».

11. *Galkin A.A., Lunin V.V.* // *Advances in chemistry*. 2005. Vol. 74 (1). P. 24.
 12. *Aleksandrov A.A., Grigoriev B.A.* Tables of standard reference data GSSSD 187-99. Water. Specific volume and enthalpy at temperatures 0, .. 1000 C and pressures 0.001..1000 MPa. All-Russian. scientific. - research. center for standardization, information and certification of raw materials, materials and substances of the State Standard of the Russian Federation. Moscow: 1999. 39 p.
 13. *Fedotov A.V., Kovalev A. A., Grigoriev V. S., Lobachevsky Ya. P., Tsench Yu.S.* // *Bulletin of agrarian Science of the Don*. 2018. No 4 (44). P. 5.
 14. *Vostrikov A.A., Dubov D.Yu., Sokol M.Ya., Fedyayeva O.N.* // *Russ. J. Phys. Chem. B*. 2016. V. 10. P. 1256.
 15. *Vostrikov A.A., Psarov S.A.* // *Technical Physics Letters* 28. 2002. 776.
-
-