
УДК 622.276.001

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СОВМЕСТНОЙ СЛОЕВОЙ ГАЗИФИКАЦИИ ДРЕВЕСНОЙ БИОМАССЫ И МУНИЦИПАЛЬНЫХ ОТХОДОВ

© 2021 г. И. Г. Донской*

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск, Россия

**e-mail: donskey.chem@mail.ru*

Поступила в редакцию 01.04.2021 г.

После доработки 23.04.2021 г.

Принята к публикации 26.04.2021 г.

Утилизация горючих отходов, таких как шламы сточных вод, может производиться с получением генераторного газа энергетического или технологического назначения. Целью данной работы является оценка эффективности совместной термохимической конверсии шламов с древесной биомассой с помощью математической модели, которая позволяет исследовать характеристики процесса газификации при различных условиях (удельный расход воздуха, состав топливной смеси, начальная влажность шлама). В работе рассматривается обращенный слоевой процесс газификации. Получены зависимости характеристик процесса газификации, проведено сравнение с опубликованными экспериментальными данными. Получены новые результаты о зависимости энергетической эффективности процесса от состава топлива, предложен метод выбора подходящего состава топливной смеси, основанный на требованиях к устойчивости слоя и качеству газа.

Ключевые слова: газификация, шламы сточных вод, древесина, математическое моделирование

DOI: 10.31857/S0002331021030055

ВВЕДЕНИЕ

Шлам очистки сточных вод — это один из видов бытовых и промышленных отходов. По некоторым оценкам, на каждого человека приходится порядка нескольких килограммов шлама в год [1, 2], поэтому во многих странах его уничтожение становится важной задачей. Основными проблемами переработки шлама являются: высокая влажность, нестабильность состава и механических свойств, особенности термического поведения, такие как образование смол, спекание органической массы и золы. Низкую теплотворную способность шлама обычно компенсируют за счет сжигания в смеси с качественными топливами, такими как углеводороды, биомасса и уголь [3].

Среди технологий переработки шлама основную долю занимает сжигание. Для предотвращения спекания при сжигании шлама часто используются вращающиеся печи, проталкивающие шнеки [4, 5], сжигание в кипящем слое [6]. При сжигании образуются летучие загрязняющие вещества, которые требуют специальной регулировки процесса горения и сложных систем очистки. Например, в работе [7] предложен эффективный способ газификации шлама в воде при сверхкритических условиях. Одним из перспективных способов конверсии шламов сточных вод является газификация, преимуществом которой является снижение летучести некоторых вредных компонентов. Эффективность процесса газификации обычно выражается в виде отноше-

ния теплоты сгорания горючих газов к теплоте сгорания исходного топлива, которое еще называют химическим КПД газификации (*cold gas efficiency, CGE*).

Температурные диапазоны пиролиза и окисления шлама сточных вод сильно размыты по сравнению с качественными топливами, а кинетика и состав продуктов совместной конверсии часто оказываются неаддитивными по отношению к исходным компонентам [8–10]. Газификация гранулированного шлама с влажностью 12% и зольностью 23% в обращенном реакторе проводилась в работе [11]. Авторам удалось добиться стационарных режимов с температурой в ядре горения порядка 1000–1100°C, однако содержание смол и пыли в сыром газе достигало 6–8 г/нм³ — такой уровень загрязнения требует дополнительной очистки газа перед сжиганием. В работе [12] были проведены эксперименты по газификации засыпок древесных пеллет и шлама сточных вод в реакторе периодического действия. Температурные измерения позволили обнаружить протекание волн химического превращения, связанных с выходом летучих и выгоранием твердого остатка. Брикетты из шлама горят с большей температурой, чем древесные пеллеты, но с меньшей удельной скоростью. Устойчивый режим достигается при больших значениях избытка окислителя (порядка 0.6–0.8).

Совместная газификация шлама с другими топливами позволяет повысить допустимую влажность перерабатываемого шлама. Например, в работах [13, 14] сообщается о газификации древесной биомассы и шлама с влажностью 20%. В работе [15] показано, что при переходе от шлама к смеси с содержанием древесных пеллет 30% химический КПД возрастает с 20–30% до 30–50%. Однако высокая доля шлама в смеси, помимо ухудшения характеристик газа и конверсии топлива, может привести к спеканию и снижению проницаемости слоя [3, 5]. Полученный газ содержит больше конденсата, поэтому требует дополнительной очистки. В работе [16] использовался реактор с двухступенчатым подводом дутья, что позволило добиться химического КПД на уровне 75–80% при содержании смолы в газе до 3 г/нм³.

Высокая влажность, однако, может быть благоприятным обстоятельством при авто-газификации шлама. При внешнем нагреве влага становится газифицирующим агентом [17, 18]. Такой способ газификации был экспериментально исследован в работе [19], в котором топливо (смесь шлама с древесной щепой) прогревалась в шнековом реакторе при температуре стенок 700–900°C. Проведенные авторами измерения показывают, что повышение доли шлама ухудшает характеристики горючего газа, однако способствуют более полной конверсии топливной смеси. Пирогазификация шлама во вращающемся реакторе (для устранения проблем со спеканием) проводилась в работе [5], авторы которой сообщают о достижении химического КПД 67% (однако за счет внешнего теплоподвода).

Результаты экспериментов по совместной газификации биомассы и шлама сточных вод на установке мощностью порядка 250 кВт показывают, что при организации подогрева дутья возможна устойчивая работа системы “газогенератор-газовый двигатель” с электрическим КПД порядка 20–23% [20]. Авторы также дают технико-экономический анализ тепловой станции на смесевом топливе, который показывает возможность совместной переработки при наложении штрафов на выбросы, хотя и при больших сроках окупаемости. Похожие результаты получены в работе [21] при рассмотрении крупной станции с совместной газификацией шлама с другими топливами.

Одностадийный процесс газификации шлама в реакторе кипящего слоя исследовался в работе [22]. Авторы предложили упрощенную кинетическую модель разложения шлама, которую применили для описания наблюдаемых эффектов. В работе [23] предложен способ газификации сухого (влажность 2–8%) шлама в двухстадийном реакторе кипящего слоя. Образующиеся на первой стадии смолистые продукты сорбируются и разлагаются на второй стадии в слое активного компонента (активированный уголь, доломит), благодаря чему удается получить достаточно чистый газ. В дру-

Таблица 1. Состав и свойства топлив

	Древесина	Шлам
W^r , %	8.3	10–40
A^d , %	6.2	28.4
V^{daf} , %	80	76
C^{daf} , %	47.0	47.3
H^{daf} , %	5.9	6.5
O^{daf} , %	45.2	36.9
N^{daf} , %	1.0	7.0
S^{daf} , %	0.8	2.3
Размер частиц, см	2.5	2.5
Q^d , МДж/кг	16.3	13.9

гой работе авторов [24] удалось добиться дополнительного снижения содержания смолы в газе за счет подогрева топлива в шнековом питателе (торрефикации).

Одной из проблем термической переработки шламов является поведение минеральной части [25–27]. Ее взаимодействие с другими минеральными компонентами (например, с золой угля и биомассы) может приводить к эффектам разнонаправленного изменения летучести и плавкости золы [28–31] и изменению реакционной способности [32].

При моделировании процессов газификации шлама часто используются равновесные термодинамические модели [22, 33]. В работах [14, 34] предложены нестационарные зональные и пространственно одномерные модели, с помощью которых авторы исследовали переходные режимы в слоевых газогенераторах. В [35] авторы использовали несколько разных математических моделей: термодинамическую модель (с ограничениями на образование смолы и степень равновесности некоторых реакций) и трехмерную CFD-модель физико-химических процессов в пористой среде. Как показало сравнение результатов, детализация модели мало влияет на интегральные характеристики процесса, хотя и позволяет проанализировать картину течения и распределение температур в слое.

В данной работе рассматривается обращенный слоевой процесс газификации, для которого характерно пониженное содержание смолистых продуктов в генераторном газе за счет их разложения в высокотемпературной окислительной зоне и фильтрации в восстановительной зоне.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Рассматривается однородный по сечению слой частиц топлива. Процесс считается стационарным. Высота реакционной зоны слоя составляет 0.25 м, внутренний диаметр реактора 0.2 м. Расход топлива равен 10 кг/ч, расход дутья (подогретый до 30°C воздух) ок. 3–4 м³/ч. В качестве топлива используются смеси частиц древесины (средний размер 2.5 см) и шлама (с тем же размером частиц), состав и свойства приведены в табл. 1. Примерный компонентный состав органической массы древесины: 48% целлюлозы, 28% гемицеллюлоз, 24% лигнина. Оценить компонентный состав шлама намного сложнее. В настоящей работе наиболее важной характеристикой шлама является его теплотворная способность, которая приближенно определяется по его элементному составу.

Уравнения, описывающие стационарный теплообмен в слое топлива, могут быть записаны следующим образом [36]:

$$\lambda^f \frac{d^2 T^f}{dz^2} - C_p^f J^f \frac{dT^f}{dz} + \alpha_1 S_1 (T^g - T^f) + Q^f(z) = 0,$$

$$\lambda^g \frac{d^2 T^g}{dz^2} - C_p^g J^g \frac{dT^g}{dz} - \alpha_1 S_1 (T^g - T^f) - \alpha_2 S_2 (T^g - T^w) + Q^g(z) = 0.$$

Здесь T – температура, К; C_p – теплоемкость, Дж/кг/К; λ – эффективная теплопроводность, Вт/(м К); α_1 – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м² К); J – массовый поток, кг/с; S_1 – площадь теплообмена между газом и топливом, м²; S_2 – площадь теплообмена между газом и стенкой, м²; Q – источник теплоты, Вт; z – пространственная координата (высота слоя), м; индексы f, g и w соответствуют топливу, газу и стенке.

На входе в слой для температур топлива и газа выполняются условия Данквертса [37] (для упрощения считаем, что химические реакции на входной границе не протекают), на выходе из слоя устанавливаются граничные условия второго рода.

$$C_p^g J_0^g (T_0^g - T^g(0)) - \lambda^g \frac{dT^g}{dz} \Big|_{z=0} = 0, \quad C_p^f J_0^f (T_0^f - T^f(0)) - \lambda^f \frac{dT^f}{dz} \Big|_{z=0} = 0,$$

$$\frac{dT^g}{dz} \Big|_{z=L} = 0; \quad \frac{dT^f}{dz} \Big|_{z=L} = 0.$$

Коэффициенты межфазного переноса в слое топлива оцениваются по формулам для стационарного зернистого слоя [38].

Для решения этой системы уравнений необходимо знать также функции источников теплоты $Q(z)$. Обычно эти функции определяются кинетикой химических реакций. В настоящей работе применяется кинетико-термодинамический подход для их расчета [39] и расщепление по физическим процессам для согласования температурного поля и нелинейных химических источников [40].

Для определения функции источника (или стока) теплоты $Q(z)$ необходимо знать изменение компонентного состава системы в малом объеме. Расчет изменения химического состава происходит в две стадии. Сначала рассматриваются гетерогенные процессы: сушка, пиролиз и реакции углеродистого остатка с O_2 , CO_2 и H_2O .

$$u_f \frac{dn_{H_2O}}{dz} = \beta S_1 \left(C_{H_2O}^{eq} - \frac{n_{H_2O}}{V_g} \right), \quad u_f \frac{dn_V}{dz} = -k_{pyr} n_V,$$

$$u_f \frac{dn_C}{dz} = -k_{O_2}^{eff} S_1 \frac{n_{O_2}}{V_g} - k_{CO_2}^{eff} S_1 \frac{n_{CO_2}}{V_g} - k_{H_2O}^{eff} S_1 \frac{n_{H_2O}}{V_g}.$$

Здесь u_f – линейная скорость продвижения топлива, м/с (J/ρ^f); V_g – порозный объем, м³; β – коэффициент массообмена, м/с; C^{eq} – равновесная концентрация паров воды, моль/м³; k_{pyr} – константа скорости пиролиза, с⁻¹; n_V – количество летучих веществ в топливе, моль; n_C – количество углерода топлива, моль; n_{O_2} , n_{CO_2} , n_{H_2O} – количество молей соответствующих веществ в порозном объеме, моль; S_1 – площадь реакционной поверхности топлива, м²; k^{eff} – эффективная константа скорости гетерогенной реакции, м/с (нижний индекс относится к газифицирующему агенту). Эффективная константа скорости гетерогенной реакции k^{eff} определяется из квазистационарного выражения:

$$k^{eff} = \frac{1}{\frac{1}{\beta} + \frac{1}{k_0 e^{-\frac{E}{RT}}}}.$$

Здесь k_0 – предэкспонент, м/с; E – энергия активации, Дж/моль; R – универсальная газовая постоянная, 8.314 Дж/моль/К. Процесс газификации разбивается на две стадии: пиролиз с образованием пирогаза и твердого углеродистого остатка, и газификация углеродистого остатка, реакционные свойства которого считаются не зависящими от степени превращения. Кинетические коэффициенты гетерогенных реакций приведены в табл. 2. Рассмотренный здесь список включает только гетерогенные ре-

Таблица 2. Кинетические характеристики древесины и шлама

Реакция	Древесина		Шлам	
	k_0	E_a , кДж/моль	k_0	E_a , кДж/моль
Пиролиз	$5.4 \times 10^4, \text{с}^{-1}$	96	$2.7 \times 10^6, \text{с}^{-1}$	120
$\text{C} + \text{O}_2$	$2.4 \times 10^6, \text{м/с}$	142	$1.6 \times 10^6, \text{м/с}$	99
$\text{C} + \text{CO}_2$	$1.32 \times 10^7, \text{м/с}$	259	$2.7 \times 10^6, \text{м/с}$	218
$\text{C} + \text{H}_2\text{O}$	$9.3 \times 10^5, \text{м/с}$	175	$2.1 \times 10^6, \text{м/с}$	158
Разложение смолы	$1 \times 10^6, \text{с}^{-1}$	150	$1 \times 10^4, \text{с}^{-1}$	90

акции, причем в наиболее простом варианте (в виде одностадийных брутто-превращений органической массы топлив). Такой подход является вынужденным упрощением: детальные механизмы реакций, протекающих при термохимическом разложении древесины и отходов, включают сотни и тысячи элементарных стадий [41, 42]. Однако при анализе влияния на процесс газификации большого числа параметров приходится использовать предельно редуцированные схемы превращений, аппроксимируя термическое поведение реальных топлив набором из четырех реакций.

Алгоритм численного решения этой задачи строится на основе расщепления по физическим процессам, а именно, выделении “тепловой подзадачи” (распределение температур) и “химической подзадачи” (распределение концентраций) [40]:

1) “Тепловая подзадача” заключается в решении задачи теплопроводности при постоянных расходах J_i и источниках Q_i :

$$\lambda_{i-1,i} S_{i-1,i} \frac{T_{i-1} - T_i}{h} + \lambda_{i,i+1} S_{i,i+1} \frac{T_{i+1} - T_i}{h} + C_p J_{i-1} T_{i-1} - C_p J_i T_i + Q_i = 0.$$

Условия Данквертса в разностной форме записываются следующим образом:

$$C_p J_0 T_0 - C_p J_1 T_1 - \lambda_{1,2} S_{1,2} \frac{T_1 - T_2}{h} = 0.$$

Здесь h – шаг разностной сетки; $S_{i,i+1}$ – поверхность переноса между соседними расчетными объемами. Система уравнений нелинейна, поскольку теплофизические коэффициенты (C_p , λ) зависят от температуры и состава. Однако эта зависимость не так существенна, как для скоростей химических превращений: как правило, в аппроксимациях теплопроводности и удельной теплостойкости значимы один-два первых температурных коэффициента в полиноме, а их зависимость от температуры имеет монотонный характер. Поэтому система решается методом простой итерации, причем на каждой итерации коэффициенты считаются постоянными, что позволяет использовать простые методы для решения линейных уравнений на T .

2) “Химическая подзадача”: поле температур позволяет рассчитать поля концентраций в исследуемой системе и уточнить распределение источников. В приближении реактора идеального вытеснения решается следующая задача:

$$(Jx_j)_{i-1} = (Jx_j)_i - \tau_i w_j.$$

Здесь x_j – концентрация j -го компонента; w_j – скорость ее изменения в химических реакциях; τ – характерное время пребывания вещества в расчетном объеме:

$$\tau_i = \frac{\Delta V_i}{\delta \frac{J_{i-1}}{\rho_{i-1}} + (1 - \delta) \frac{J_i}{\rho_i}}.$$

В зависимости от значения параметра δ можно получить разную степень аппроксимации (явное или неявное выражение для скорости потока). В расчетах использовалось значение $\delta = 1$.

Поскольку рассматривается небольшое число реакций, решение ищется следующим образом: сначала методом Эйлера оценивается изменение медленных переменных (участвующих в гетерогенных реакциях), а затем для оставшихся компонентов решается задача химического равновесия. Эта расчетная схема получается рекурсивной (решение в i -ом элементе зависит от состояния в элементе $i - 1$) и выглядит следующим образом:

$$\mathbf{n}_i = \arg \min G(\mathbf{n}, T_i), \quad \mathbf{A}\mathbf{n}_i = \mathbf{A}\mathbf{n}_{i-1}, \quad n_i^C = n_{i-1}^C - \tau_i \sum_q k_q(T_i) n_{i-1}^q.$$

На каждом шаге можно оценить значение функции источника в i -ом элементе по разности энтальпий входящего и выходящего потока:

$$Q_i = \frac{\sum_j h^j(T_{i-1}) n_{i-1}^j - \sum_j h^j(T_i) n_i^j}{\tau_i}.$$

Здесь h_j – мольная энтальпия j -го компонента, Дж/моль; n_j – количество j -го компонента, моль; τ – время контакта, с; индекс *in* относится к входящему потоку, *out* – к выходящему. Найденные значения Q_i подставляются в первую задачу для уточнения температурного поля. Изменение состава приводит к изменению средней плотности потока, которая также пересчитывается на каждом шаге.

Таким образом, для решения задачи в целом производится решение множества оптимизационных подзадач для расчетных элементов, причем решение для каждого элемента является начальным условием для следующего по порядку в расчетной схеме. Параметры расчетных элементов (температура, состав, время пребывания) уточняются за счет итерационного согласования решений теплообменной и химической подзадач.

Результаты одного расчета (доля шлама в смеси 20%, коэффициент избытка воздуха 0.3) представлены на рис. 1. Модель предсказывает образование зоны горения (*flaming pyrolysis zone*) вблизи входа дутья в слой топлива: здесь происходит резкое увеличение температуры и выгорание топлива. При этом образуется вторичный газифицирующий агент, смесь CO_2 и H_2O , которые восстанавливаются до CO и H_2 на поверхности коксозольного остатка.

Для валидации модели были проведены расчеты режимов совместной газификации древесины и шлама из работы [14]. Результаты расчетов приведены в табл. 3: сравнение расчетных и экспериментальных значений показывает удовлетворительное совпадение. Отклонения наблюдаются главным образом для концентрации кислорода на выходе из реактора. Экспериментальное содержание кислорода в газах доходит до нескольких процентов. Возможно, что это является результатом подсосов воздуха или образования инертной зоны в небольшой области около стенок (что не учитывается в модели).

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ОБРАЩЕННОЙ ГАЗИФИКАЦИИ СМЕСЕЙ ДРЕВЕСИНЫ И ШЛАМА С РАЗНОЙ ВЛАЖНОСТЬЮ

С помощью разработанной модели были проведены вариантные расчеты процесса совместной газификации древесины и шлама в обращенном газогенераторе мощностью порядка 200 кВт(т). Высота реакционной зоны слоя составляет 0.25 м, внутренний диаметр реактора 0.2 м. Расход топлива равен 10 кг/ч, расход дутья (воздух при температуре 27°C) порядка нескольких $\text{nm}^3/\text{ч}$. В качестве топлива используются смеси частиц древесины (средний размер 2.5 см) и шлама (с тем же размером частиц). Диа-

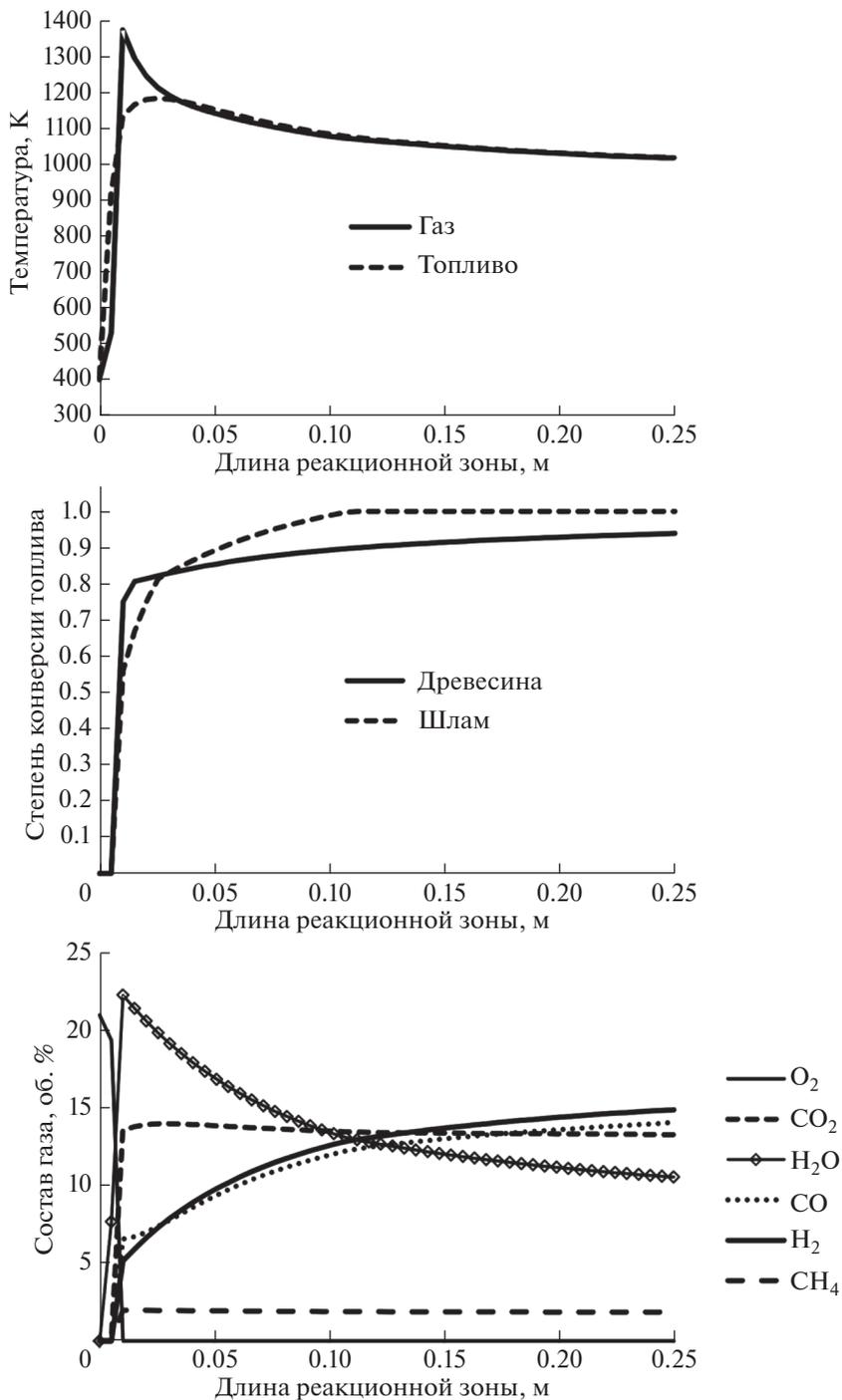


Рис. 1. Профили температур, степени выгорания и состава газа по высоте слоя.

Таблица 3. Сравнение результатов моделирования и экспериментальных данных [14]: сверху в ячейках – измеренное значение, снизу – расчетное

Характеристики сухого газа	Содержание шлама в смеси, % масс.			
	0	10	20	33
CO, % об.	17.1	15.9	15.6	12
	16.9	16.1	15.7	15.5
H ₂ , % об.	17.3	17.1	16.8	13.4
	18.2	17.0	16.6	10.6
CH ₄ , % об.	1.7	2	2.1	1.8
	2.1	2.1	2.1	1.8
CO ₂ , % об.	11.9	12.2	12.7	12.5
	14.9	14.9	14.8	13.5
O ₂ , % об.	1.3	1.7	1	3.4
	0.0	0.0	0.0	0.0
Q, МДж/нм ³	4.7	4.6	4.5	3.6
	4.8	4.6	4.5	3.7

пазон условий: доля шлама в смеси с древесиной от 0 до 100 мас. % (с шагом 10%); коэффициент избытка окислителя 0.1–0.8 (с шагом 0.05); начальная влажность шлама 10–40% на рабочую массу (с шагом 10%). Результаты расчетов приведены ниже в виде диаграмм, на которых изображены зависимости характеристик процесса от удельного расхода дутья и состава топлива (рис. 2). Поверхности химического КПД имеют экстремальный характер: при увеличении коэффициента избытка окислителя КПД сначала возрастает за счет окисления топлива с образованием горючих газов, затем достигает максимума (который близок к точке полной конверсии топливного углерода), после чего падает из-за окисления горючих газов [43].

Газификация древесины без добавок шлама происходит достаточно эффективно, с максимальным КПД ок. 70% (при коэффициенте избытка окислителя порядка 0.35). Сухой шлам (с влажностью 10%) также эффективно конвертируется даже без добавок древесины, однако с ростом влажности изолинии КПД приобретают все больший наклон. Шлам с влажностью 40% скорее тлеет, чем горит: максимальная эффективность его конверсии составляет ок. 30%.

Минимальное значение коэффициента избытка окислителя, при котором начинается газификация, определяет границу термической устойчивости процесса. Как видно из рис. 2, для древесины и сухого шлама эта величина составляет ок. 0.15. С увеличением влажности газификация становится возможной при больших удельных расходах воздуха: при влажности шлама 30% и 40% минимальный коэффициент избытка окислителя составляет ок. 0.3. Для газификации такого влажного топлива требуются большие затраты теплоты. Максимум химического КПД при этом смещается в сторону больших коэффициентов избытка окислителя, поскольку дожигание огарка при невысоких температурах требует окисления значительной части горючих газов.

Ограничиваясь минимальным значением химического КПД в 50–60%, можно установить максимальную долю шлама в смеси для разных уровней влажности. Эти значения приведены в табл. 4.

В ряде случаев результаты математического моделирования показывают возможность газификации шлама без добавок древесины, но при влажности шлама 40% его максимальная доля в смеси с древесиной не должна превышать 30–40%. Эти значения выше, чем известные опубликованные данные по конверсии влажного шлама. Одна-

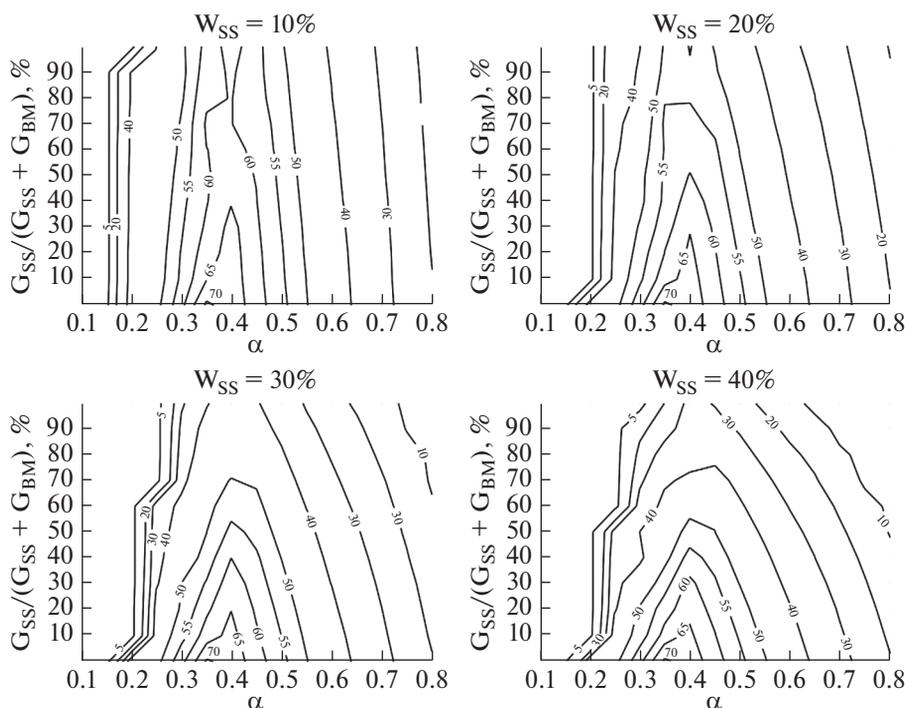


Рис. 2. Зависимость химического КПД процесса газификации (%) от коэффициента избытка окислителя (α), доли шлама в смеси с древесиной и его начальной влажности.

ко, в математической модели не учитывается агломерация. В работе [14] авторами были получены агломераты размером до 7–8 см, которые могут приводить к закупориванию слоя. Образование агломератов связано, скорее всего, с термомеханическими превращениями органической и минеральной массы [29, 44]. Образование агломератов особенно характерно для влажного топлива, поэтому границы эффективных режимов будут отличаться от полученных в данной работе. Если провести такую границу на уровне 20–30% (т.е. принять, что при такой доле шлама образующиеся агломераты не мешают работе газогенератора), можно оценить максимальный химический КПД для шламов разной влажности в смесях с древесиной: эти оценки приведены в табл. 5.

Таблица 4. Допустимая доля шлама в смеси с биомассой при разной начальной влажности

Минимальный химический КПД, %	Начальная влажность шлама, %	Допустимая доля шлама в смеси, %
60	10	100
	20	50
	30	40
	40	30
50	10	100
	20	100
	30	70
	40	40

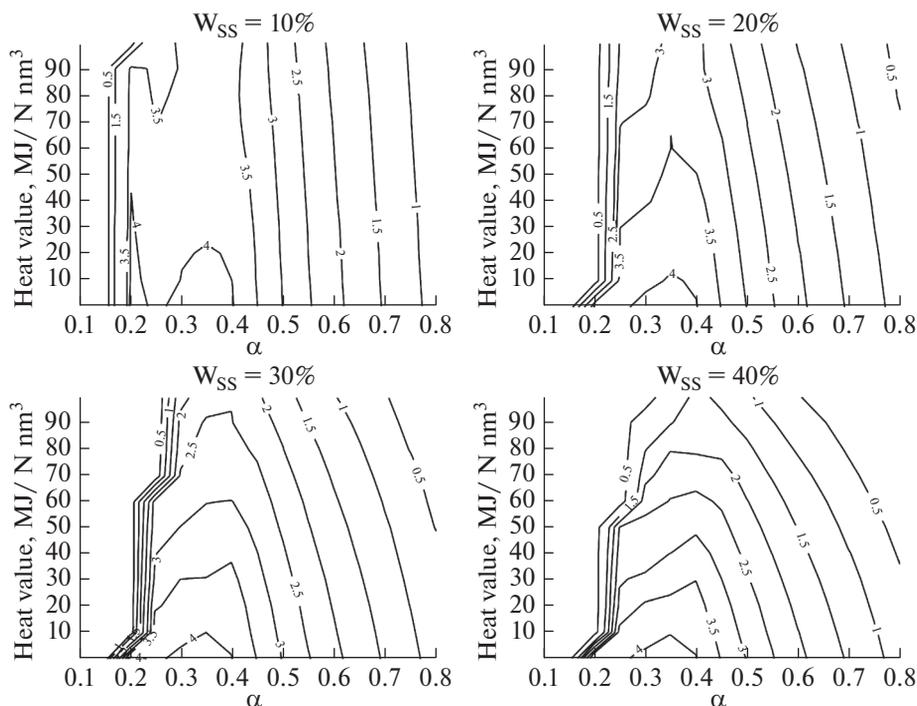


Рис. 3. Зависимость теплотворной способности генераторного газа ($\text{МДж}/\text{нм}^3$) от коэффициента избытка окислителя (α), доли шлама в смеси с древесиной и его начальной влажности.

Расчеты показывают, что теплота сгорания генераторного газа уменьшается с увеличением доли шлама (рис. 3). Для древесины эта величина составляет ок. $4 \text{ МДж}/\text{нм}^3$, для сухого шлама ок. $3.5 \text{ МДж}/\text{нм}^3$, для влажного шлама – менее $1 \text{ МДж}/\text{нм}^3$. Для сухого шлама при изменении коэффициента избытка окислителя наблюдается два экстремума теплотворной способности: при малых избытках окислителя (образуется пирогаз с высоким содержанием водорода, рис. 4) и вблизи точки полной конверсии углерода (образуется генераторный газ с высоким содержанием CO , рис. 5). Пиролиз влажного

Таблица 5. Химический КПД процесса совместной газификации при ограничении на долю шлама в смеси

Максимальная доля шлама в смеси, %	Начальная влажность шлама, %	Предельный химический КПД, %
20	10	67.1
	20	66.0
	30	64.9
	40	63.8
30	10	67.0
	20	64.6
	30	62.8
	40	61.2

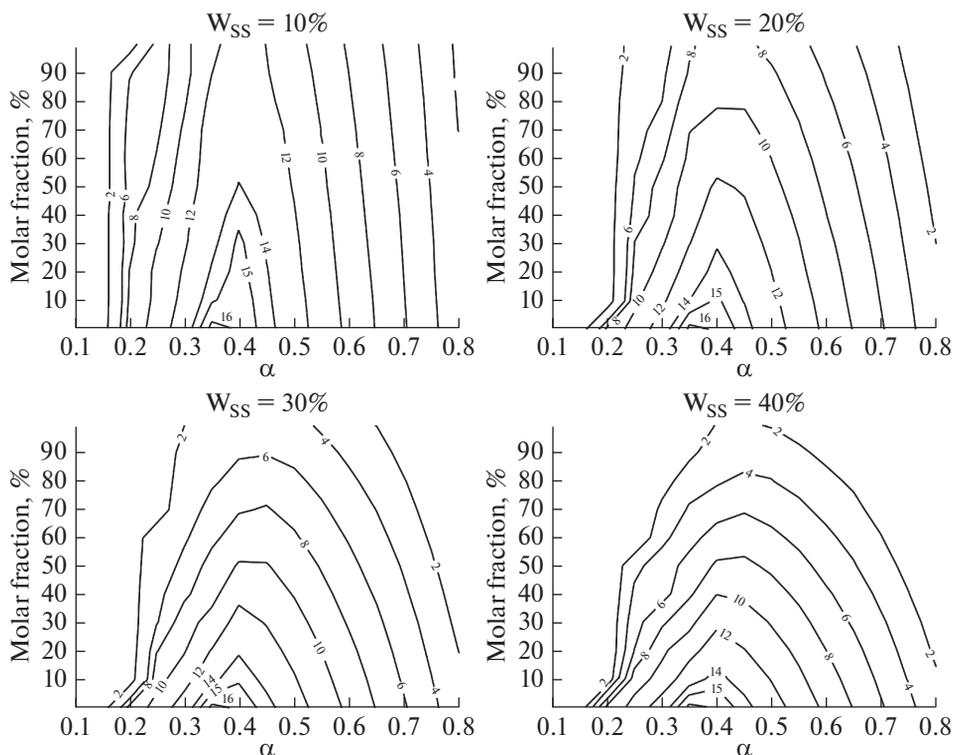


Рис. 4. Зависимость содержания СО в генераторном газе (об. %) от коэффициента избытка окислителя (α), доли шлама в смеси с древесиной и его начальной влажности.

шлама термически неустойчив, поэтому для влажности 20–40% наблюдается единственный экстремум теплотворной способности.

Газогенераторы такой мощности (порядка 50 кВт(т)) могут использоваться для производства горючего газа из смеси древесных частиц и муниципальных отходов, который после очистки и охлаждения сжигается в газовом двигателе с получением электрической энергии. Газогенераторные мини-электростанции могут использоваться для снабжения потребителей в автономных и распределенных энергосистемах. Подобные схемы рассматриваются, например, в работах [45, 46]. Опубликованные данные позволяют оценить КПД газовых двигателей при работе на генераторном газе (около 30%). Тогда тепловой КПД газогенераторной станции на отходах при оптимальном составе смеси древесины и шлама будет составлять 18–20%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведено расчетное исследование процесса совместной конверсии древесины и шлама сточных вод в обращенном газогенераторе. Для расчетов использована стационарная одномерная модель теплообмена в плотном слое с химическими реакциями. Анализ результатов математического моделирования показывает следующее:

1) При условии сохранения устойчивости слоя возможна эффективная газификация шлама с влажностью 10–20% без добавок древесины. Для шлама с влажностью 30–40% конверсия без добавления древесины протекает с низким химическим КПД.

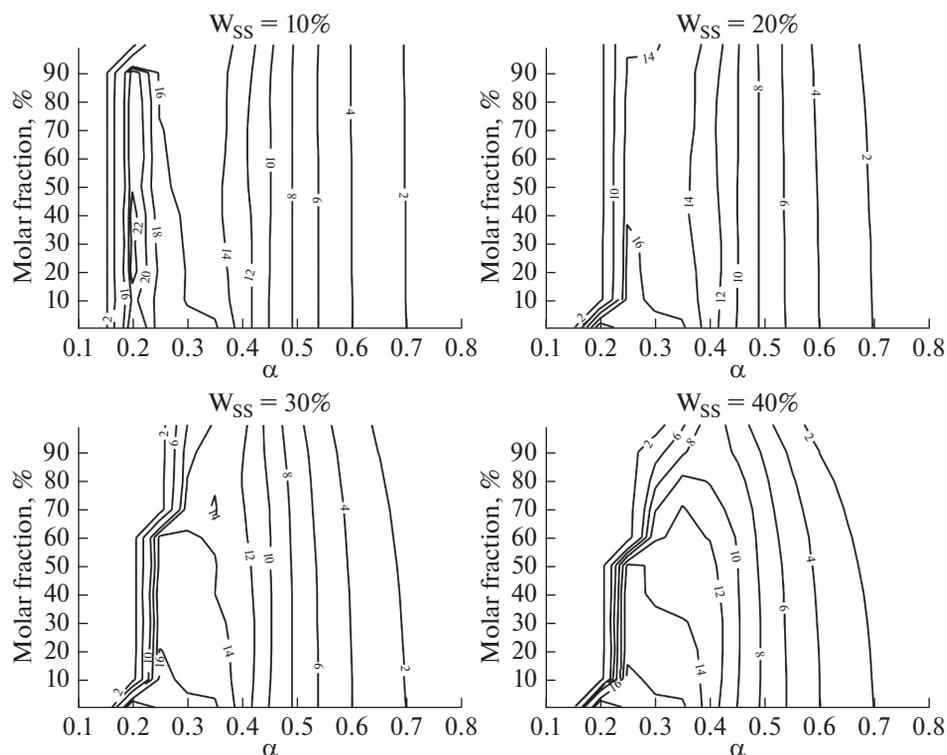


Рис. 5. Зависимость содержания N_2 в генераторном газе (об. %) от коэффициента избытка окислителя (α), доли шлама в смеси с древесиной и его начальной влажности.

Доля шлама в смеси зависит от требуемого химического КПД и влажности: для достижения химического КПД на уровне 50–60% максимальная доля шлама влажностью 40% в смеси с древесиной составляет 30–40%. Эти значения выше опубликованных экспериментальных данных, поэтому модель требует уточнения. Можно предположить, что, если учесть спекание слоя, допустимая доля шлама снизится.

2) Ограничивая долю шлама в смеси с древесиной до 20–30%, можно оценить максимальный химический КПД совместной газификации. Химический КПД составляет ок. 60–70% и уменьшается с ростом влажности шлама. Теплотворная способность сырого генераторного газа при этом составляет 3–4 МДж/нм³ (4–4.5 МДж/нм³ для сухого), т.е. примерно той же величины, что и для древесины без добавок шлама.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-08-00744) с использованием оборудования ЦКП “Высокотемпературный контур” (ИСЭМ СО РАН).

ОБОЗНАЧЕНИЯ

- T – температура, К
- Q – источник теплоты, Вт
- S – площадь поверхности теплообмена, м²
- C_p – удельная теплоемкость, Дж/(кг К)
- z – пространственная координата (высота слоя), м

J – поток вещества, кг/(м² с)
 d – размер частиц, см
 n – количество вещества, моль
 h – удельная мольная энтальпия, Дж/моль
 k_0 – предэкспонент, 1/с
 E_a – энергия активации, Дж/моль
 R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль К)
 V_g – порозный объем, м³
 W – влажность, %
 V – выход летучих, %
 A – зольность, %
 Q – теплота сгорания, МДж/кг
 α_1 – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м² К)
 α – коэффициент избытка окислителя
 β – коэффициент массоотдачи, м/с
 τ – характерное время, с

ИНДЕКСЫ

f – fuel
 g – gas
 w – wall
 eff – effective
 V – volatiles
 pyr – pyrolysis
 eq – equilibrium
 r – raw base
 d – dry base
 daf – dry ash free base
 об. – объемная доля

СОКРАЩЕНИЯ

нм³ – кубический метр газа при н.у.
 КПД – коэффициент полезного действия
CFD – computational fluid dynamics
CGE – cold gas efficiency

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Syed-Hassan S.S.A., Wang Y., Hu S., Su S., Xiang J. Thermochemical processing of sewage sludge to energy and fuel: Fundamentals, challenges and considerations // *Renew. Sust. Energy Rev.* 2017. V. 80. P. 888. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.262>
2. Kacprzak M., Neczaj E., Fijalkowski K., Grobelak A., Grosser A., Worwag M., Rorat A., Brattebo H., Almas A., Singh B.R. Sewage sludge disposal strategies for sustainable development // *Environmental Research.* 2017. V. 156. P. 39. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.03.010>
3. Ramos A., Monteiro E., Silva V., Rouboa A. Co-gasification and recent development on waste-to-energy conversion: A review // *Renew. Sust. Energy Rev.* 2018. V. 81. P. 380. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.07.025>
4. Werther J., Ogada T. Sewage sludge combustion // *Prog. Energy Combust. Sci.* 1999. V. 25. P. 55. [https://doi.org/10.1016/S0360-1285\(98\)00020-3](https://doi.org/10.1016/S0360-1285(98)00020-3)

5. *Freda C., Cornacchia G., Romanelli A., Valerio V., Grieco M.* Sewage sludge gasification in a bench scale rotary kiln // *Fuel*. 2018. V. 212. P. 88.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.10.013>
6. *Sung J.H., Back S.K., Jeong B.M., Kim J.H., Choi H.S., Jang H.N., Seo Y.C.* Oxy-fuel co-combustion of sewage sludge and wood pellets with flue gas recirculation in a circulating fluidized bed // *Fuel Proc. Tech.* 2018. V. 172. P. 79.
<https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2017.12.005>
7. *Vostrikov A.A., Fedyaeva O.N., Shishkin A.V., Dubov D.Yu., Sokol M.Ya.* Conversion of municipal sewage sludge in supercritical water // *Solid Fuel Chemistry*. 2008. V. 42. No. 6. P. 384.
<https://doi.org/10.3103/S0361521908060116>
8. *Urych B., Smolinski A.* Kinetics of Sewage Sludge Pyrolysis and Air Gasification of Its Chars // *Energy Fuels*. 2016. V. 30. № 6. P. 4869.
<https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.6b00332>
9. *Wang X., Deng S., Tan H., Adeosun A., Vujanovic M., Yang F., Duic N.* Synergetic effect of sewage sludge and biomass co-pyrolysis: A combined study in thermogravimetric analyzer and a fixed bed reactor // *Energy Conv. Manag.* 2016. V. 118. P. 399.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.04.014>
10. *Wang C., Wang X., Jiang X., Li F., Lei Y., Lin Q.* The thermal behavior and kinetics of co-combustion between sewage sludge and wheat straw // *Fuel Proc. Tech.* 2019. V. 189. P. 1.
<https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2019.02.024>
11. *Dogru M., Midilli A., Howarth C.R.* Gasification of sewage sludge using a throated downdraft gasifier and uncertainty analysis // *Fuel Proc. Tech.* 2002. V. 75. P. 55.
[https://doi.org/10.1016/S0378-3820\(01\)00234-X](https://doi.org/10.1016/S0378-3820(01)00234-X)
12. *Kim M., Lee Y., Park J., Ryu C., Ohm T.-I.* Partial oxidation of sewage sludge briquettes in a updraft fixed bed // *Waste Management*. 2016. V. 49. P. 204.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.01.040>
13. *Seggiani M., Vitolo S., Puccini M., Bellini A.* Cogasification of sewage sludge in an updraft gasifier // *Fuel*. 2012. V. 93. P. 486.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.08.054>
14. *Ong Z., Cheng Y., Maneerung T., Yao Z., Tong Y.W., Wang C.-H., Dai Y.* Co-gasification of woody biomass and sewage sludge in a fixed-bed downdraft gasifier // *AIChE J.* 2015. V. 61. № 8. P. 2508.
<https://doi.org/10.1002/aic.14836>
15. *Seggiani M., Puccini M., Raggio G., Vitolo S.* Effect of sewage sludge content on gas quality and solid residues produced by cogasification in an updraft gasifier // *Waste Management*. 2012. V. 32. № 10. P. 1826.
<https://doi.org/10.1002/aic.14836>
16. *Striugas N., Zakarauskas K., Dziugys A., Navakas R., Paulauskas R.* An evaluation of performance of automatically operated multi-fuel downdraft gasifier for energy production // *Applied Thermal Engineering*. 2014. V. 73. № 1. P. 1151.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.09.007>
17. *Jarvinen M., Mueller C., Hupa M., Fogelholm C.-J.* CFD-applicable discrete combustion model for thermally large particles // *Progress in Computational Fluid Dynamics*. 2011. V. 11. № 6. P. 373.
<https://doi.org/10.1504/PCFD.2011.042847>
18. *Донской И.Г., Козлов А.Н., Свищев Д.А., Шаманский В.А.* Расчетное исследование эффективности ступенчатого процесса газификации влажной древесины // *Теплоэнергетика*. 2017. № 4. С. 21–29.
<https://doi.org/10.1134/S0040363617040026>
19. *Peng L., Wang Y., Lei Z., Cheng G.* Co-gasification of wet sewage sludge and forestry waste in situ steam agent // *Bioresource Technology*. 2012. V. 114. P. 698.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.03.079>
20. *Elsner E., Wysocki M., Niegodajew P., Borecki R.* Experimental and economic study of small-scale CHP installation equipped with downdraft gasifier and internal combustion engine // *Applied Energy*. 2017. V. 202. P. 213.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.148>
21. *Trop P., Agrez M., Urbancl D., Goricanec D.* Co-gasification of torrefied wood biomass and sewage sludge // *Computer Aided Chem. Eng.* 2016. V. 38. P. 2229.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63428-3.50376-3>
22. *Petersen I., Werther J.* Experimental investigation and modeling of gasification of sewage sludge in the circulating fluidized bed // *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. 2005. V. 44. № 7. P. 717.
<https://doi.org/10.1016/j.cep.2004.09.001>
23. *Mun T.-Y., Kim J.-W., Kim J.-S.* Air gasification of dried sewage sludge in a two-stage gasifier: Part 1. The effects and reusability of additives on the removal of tar and hydrogen production // *Int. J. Hydrogen Energy*. 2013. V. 38. P. 5226.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.10.120>

24. Choi Y.-K., Mun T.-Y., Cho M.-H., Kim J.-S. Gasification of dried sewage sludge in a newly developed three-stage gasifier: Effect of each reactor temperature on the producer gas composition and impurity removal // *Energy*. 2016. V. 114. P. 121.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.07.166>
25. Цветков М.В., Подлесный Д.Н., Фрейман В.М., Цветкова Ю.Ю., Салганская М.В., Зюкин И.В., Зайченко А.Ю., Салганский Е.А. О поведении золы осадка сточных вод в условиях высокотемпературной переработки // *Журн. прикладной химии*. 2020. Т. 93. № 6. С. 873.
<https://doi.org/10.31857/S0044461820060134>
26. Sun Y., Chem J., Zhang Z. Distributional and compositional insight into the polluting materials during sludge combustion: Roles of ash // *Fuel*. 2018. V. 220. P. 318.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.01.142>
27. Ronda A., Gomez-Barea A., Haro P., de Almeida V.F., Salinero J. Elements partitioning during thermal conversion of sewage sludge // *Fuel Proc. Tech.* 2019. V. 186. P. 156.
<https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2019.01.001>
28. Skoglund N., Bafver L., Fahlstrom J., Holmen E., Renstrom C. Fuel design in co-combustion of demolition wood chips and municipal sewage sludge // *Fuel Proc. Tech.* 2016. V. 141. Pt. 2. P. 196.
<https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.08.037>
29. Namkung H., Lee Y.-J., Park J.-H., Song G.-S., Choi J.W., Choi Y.-C., Park S.-J., Kim J.-G. Blending effect of sewage sludge and woody biomass into coal on combustion and ash agglomeration behavior // *Fuel*. 2018. V. 225. P. 266.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.03.109>
30. Schwitalla D., Reinmoller M., Forman C., Wolfersdorf C., Gootz M., Bai J., Guhl S., Neuroth M., Meyer B. Ash and slag properties for co-gasification of sewage sludge and coal: An experimentally validated modeling approach // *Fuel Proc. Tech.* 2018. V. 175. P. 1.
<https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2018.02.026>
31. Li M., Li F., Liu Q., Fang Y., Xiao H. Regulation of ash fusibility for high ash-fusion-temperature (AFT) coal by industrial sludge addition // *Fuel*. 2019. V. 244. P. 91.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.01.161>
32. Tang S., Zheng C., Yan F., Shao N., Tang Y., Zhang Z. Product characteristics and kinetics of sewage sludge pyrolysis driven by alkaline earth metals // *Energy*. 2018. V. 153. P. 921–932.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.04.108>
33. Clausen L.R. Energy efficient thermochemical conversion of very wet biomass to biofuels by integration of steam drying, steam electrolysis and gasification // *Energy*. 2017. V. 125. P. 327.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.02.132>
34. Seggiani M., Puccini M., Vitolo S. Gasification of sewage sludge: mathematical modelling of an up-draft gasifier // *Chem. Eng. Trans.* 2013. V. 32. P. 895.
<https://doi.org/10.3303/CET1332150>
35. Yan W.-C., Shen Y., You S., Sim S.H., Luo Z.-H., Tong Y.W., Wang C.-H. Model-Based Downdraft Biomass Gasifier Operation and Design for Synthetic Gas Production // *J. Cleaner Prod.* 2018. V. 178. P. 476.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.009>
36. Донской И.Г. Моделирование процесса совместной газификации древесины и полимерных материалов в плотном слое // *Химия твердого топлива*. 2018. № 2. С. 67–72.
<https://doi.org/10.3103/S0361521918020027>
37. Теплицкий Ю.С., Ковенский В.И. О постановке граничных условий и условий сопряжения для задач теплопереноса в зернистых слоях на основе двухтемпературной модели // *ИФЖ*. 2006. Т. 79. № 6. С. 98–106.
38. Аэров М.Э., Тодес О.М., Наринский Д.А. Аппараты со стационарным зернистым слоем: Гидравлические и тепловые основы работы. Л.: Химия, 1979.
39. Donskoy I.G., Shamansky V.A., Kozlov A.N., Svishchev D.A. Coal gasification process simulations using combined kinetic-thermodynamic models in one-dimensional approximation // *Combustion Theory and Modelling*. 2017. V. 21. № 3. P. 529.
<https://doi.org/10.1080/13647830.2016.1259505>
40. Kovenksii V.I. Method of calculating the bed combustion of a solid fuel coke residue // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2012. V. 46. № 2. P. 180.
<https://doi.org/10.1134/S0040579512020054>
41. Ranzi E., Faravelli T., Manenti F. Pyrolysis, gasification, and combustion of solid fuels // *Advances in Chemical Engineering*. 2016. V. 49. P. 1.
<https://doi.org/10.1016/bs.ache.2016.09.001>
42. Horton S.R., Mohr R.J., Zhang Y., Petrocelli F.P., Klein M.T. Molecular-level kinetic modeling of biomass gasification // *Energy & Fuels*. 2016. V. 30. P. 3906.
<https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.5b01988>
43. Prins M.J., Ptasiński K.J., Janssen F.J.J.G. From coal to biomass gasification: Comparison of thermodynamic efficiency // *Energy*. 2007. V. 32. P. 1248.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2006.07.017>

44. *Madadian E.* Experimental Observation on Downdraft Gasification for Different Biomass Feedstocks // Gasification for Low-Grade Feedstock. InTech, 2018. P. 79.
<https://doi.org/10.5772/intechopen.77119>
45. *Chaves L.I., da Silva M.J., de Souza S.N.M., Secco D., Rosa H.A., Nogueira C.E.C., Frigo E.P.* Small-scale power generation analysis: Downdraft gasifier coupled to engine generator set // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. V. 58. P. 491.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.033>
46. *Indrawan N., Thapa S., Bhoi P.R., Huhnke R.L., Kumar A.* Electricity power generation from co-gasification of municipal solid wastes and biomass: Generation and emission performance // Energy. 2018. V. 162. P. 764.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.07.169>

Numerical Study of the Process of Woody Biomass and Sewage Sludge Co-Gasification in Fixed-Bed Downdraft Reactor

I. G. Donskoy*

Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia
*e-mail: donskoy.chem@mail.ru

The utilization of combustible waste, such as sewage sludge, can be combined with energy production for small-scale consumers. One of the ways of such utilization can be gasification, which makes it possible to obtain a combustible gas suitable for thermal and electric energy production. The aim of this study is to estimate the efficiency of sewage sludge co-conversion with woody biomass using mathematical model that allow to investigate process characteristics under different process conditions (air stoichiometric ratio, fuel mixture composition, initial moisture of sewage sludge). Fixed-bed downdraft process is investigated related to using of wood and sewage sludge mixtures. New results are obtained considering process efficiency dependence on input fuel composition, method is proposed to estimate acceptable fuel mixtures based on agglomeration and efficiency requirements.

Keywords: gasification, downdraft gasifier, sewage sludge, woody biomass, mathematical modelling, optimization