

Вестник Курганской ГСХА. 2024. № 2 (50). С. 45–52  
Vestnik Kurganskoj GSNA. 2024; 2(50): 45–52

### Научная статья

УДК 519.876

Код ВАК 4.3.1

EDN: DSVDFТ

## МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГОРЕНИЯ ОТХОДОВ РАСТЕНИЕВОДСТВА В ТЕПЛОГЕНЕРАТОРЕ

Андрей Сергеевич Иванов<sup>1</sup>✉

<sup>1</sup> Государственный аграрный университет Северного Зауралья, Тюмень, Россия

<sup>1</sup> ivanovas@gausz.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0001-5991-3902>

**Аннотация.** Одним из наиболее используемых способов утилизации растительных отходов на сегодняшний день является их сжигание в теплогенераторе. Однако вопросы моделирования горения растительной биомассы в теплогенераторе недостаточно изучены. Смоделировать полноценный слой теплогенератора с учетом всех процессов, происходящих в нем, является проблематичным. Поэтому прибегают к определенным упрощениям и допущениям. Цель исследования – совершенствование модели слоевого процесса горения отходов растениеводства в теплогенераторе и разработка надёжных инструментов моделирования работы теплогенераторов. Эффективный метод совершенствования модели горения отходов растениеводства представляется такой, что посредством процесса математического моделирования кинетических реакций с учетом некоторых допущений возможно с достаточно высокой точностью для требований инженерного проектирования получить результат как для общей скорости конверсии растительных сельскохозяйственных отходов, так и для основных фракций продукта в различных условиях сгорания. В статье рассмотрены три нульмерные слоевые модели и одна квази-двумерная модель. Проанализированы особенности данных моделей и описаны процессы горения отходов растениеводства. Отмечены проблемные позиции в моделировании, недостатки существующих моделей. Представлена схема теплогенератора для сжигания отходов растениеводства и схема противоточного слоя, в которой поэтапно рассмотрен процесс преобразования топлива и получаемые при этом вещества. Ни одна из моделей не может точно предсказать сложный процесс горения в слое. Для получения более достоверных результатов необходимо более точно учитывать процессы переноса веществ и химические реакции. Кроме того, для проверки моделей в будущем желательно проводить эксперименты с твердыми частицами и летучими газами внутри слоя с применением высокоточного оборудования для контроля параметров исследуемого процесса. Это позволит значительно улучшить понимание особенностей процесса сгорания отходов растениеводства, разработки новых математических моделей и уточнения уже существующих моделей.

**Ключевые слова:** биомасса, биотопливо, растительные отходы, отходы растениеводства, сжигание биомассы, утилизация отходов, теплогенератор.

**Для цитирования:** Иванов А.С. Методы моделирования горения отходов растениеводства в теплогенераторе // Вестник Курганской ГСХА. 2024. № 2(50). С. 45–52. EDN: DSVDFТ

Scientific article

## METHODS OF CROP WASTE INCINERATION MODELING IN THE HEAT GENERATOR

Andrei S. Ivanov<sup>1</sup>✉

<sup>1</sup> Northern Trans-Ural State Agricultural University, Tyumen, Russia

<sup>1</sup> ivanovas@gausz.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0001-5991-3902>

**Abstract.** One of the most widely used ways to dispose of plant waste today is to burn it in a heat generator. However, the issues of modeling plant biomass incineration in a heat generator have not been sufficiently studied. It is problematic to simulate a full-fledged layer of a heat generator, taking into account all the processes taking place in it. Therefore, certain simplifications and assumptions are required. The purpose of the study is to improve the model of the layered incineration process of crop waste in a heat generator and to develop reliable tools for modeling heat generator operation. An effective method for improving the crop waste incineration model seems to be such that through the process of kinetic reaction mathematical modeling, taking into account certain assumptions, it is possible to obtain a result with sufficiently high accuracy, for the engineering design requirements, both for the total conversion rate of agricultural waste and for the main product fractions under various burning conditions. The article considers three zero-dimensional layer models and one quasi-two-dimensional model. The study has analyzed the features of these possibility models of describing the crop production waste incineration process. Problematic positions in modeling and shortcomings of existing models are noted. A scheme of a heat generator for burning crop waste and a countercurrent layer scheme are presented, in which the process of fuel converting and the substances obtained in this process are considered step by step. None of these models can accurately predict the complex incineration process in the layer. To obtain more reliable results, it is necessary to take into account the processes of substance transfer and chemical reactions more accurately. In addition, in order to test models in the future, it is desirable to conduct experiments with solid particles and volatile gases inside the layer using high-precision equipment to control the parameters of the process under study. This will significantly improve the understanding of the peculiarities of the crop waste incineration process, the development of new mathematical models and characteristics of existing model parameters.

**Keywords:** biomass, biofuels, plant waste, crop production waste, biomass incineration, waste disposal, heat generator.

**For citation:** Ivanov A.S. Methods of crop waste incineration modeling in the heat generator. Vestnik Kurganskoy GSHA. 2024; 2(50): 45–52. EDN: DSVDF. (In Russ).

**Введение.** Сельскохозяйственные растительные отходы значительно дешевле с точки зрения выработки из них энергии, чем ископаемое топливо, они всё чаще используются в тепловых целях в аграрном производстве [1]. Из-за разнообразия источников растительных отходов, характеристики этого биотоплива различаются по химическому составу, влажности, зольности, размеру частиц и т. д. [2]. Растительные отходы также могут быть получены из стеблей кукурузы, рисовой шелухи, кукурузных початков, соломы, лузги масленичных и зерновых культур, отходов из сечки зерновых культур и других [3].

Моделирование конверсии твердого растительного топлива в слоевом теплогенераторе представляет собой сложную задачу, включающую не только химические (гомогенные и гетерогенные) реакции, но и массо- и теплообмен в твердых частицах, а также между твердыми частицами и окружающим газом [4]. Твердые частицы в слое имеют разные свойства, размеры и форму, это необходимо учитывать при моделировании преобразования слоя. По мере сгорания топлива термохимические реакции внутри слоя протекают неравномерно. Это приводит к несбалансированному распределению газа по слою и может привести к образованию трещин и каналов через слой [5]. Смоделировать полноценный слой теплогенератора с учетом всех процессов, происходящих в нем, является проблематичным. Поэтому прибегают к определенным упрощениям и допущениям [6; 7].

Цель исследования – совершенствование модели слоевого процесса горения отходов растениеводства в теплогенераторе и разработка надёжных инструментов моделирования работы теплогенераторов.

**Материалы и методы.** Процесс сжигания отходов растениеводства в слое можно разделить на сушку; образование летучих веществ в результате термического разложения; восстановление и окисление летучих веществ; и, наконец, газификацию и окисление остатков угля [8].

Процесс переработки твердого топлива всегда начинается с процесса сушки. Частица топлива нагревается за счет конвекции горячих окружающих газов, проводимости соседних частиц и теплового излучения. Тепло, полученное частицей, переносится внутрь частицы за счет проводимости. Когда температура частиц достигает 100 °С, частицы высушиваются. Вода выходит из растительной массы в виде пара, который охлаждает внешнюю поверхность этой растительной биомассы. Для продолжения сушки требуется тепло, а это, в свою очередь, снижает температуру в теплогенераторе. Как правило, сжигание растительной био-

массы с влажностью выше 60 % практически невозможно [9]. Энергия, необходимая для испарения влаги, будет больше, чем энергия, «производимая» при сгорании.

Образование летучих компонентов включает в себя как пиролиз, так и газификацию, и для простоты его можно назвать выходом летучих веществ. Летучие вещества покидают топливо через поры и трещины в структуре. Когда летучие вещества достигают поверхности, они вступают в реакцию с окружающим воздухом и горят как диффузионное пламя. Тепло от сгорания газа передается частицам, поддерживает и усиливает процессы сушки и удаления летучих веществ. Температура, при которой происходит выход летучих веществ из растительной биомассы, находится в пределах 200-500 °С [10; 11]. Степень удаления летучих веществ зависит от конечной температуры и скорости нагрева. При температуре ниже 500 °С в топливе остается некоторое количество летучих веществ, что приводит к увеличению выхода угля. При температуре выше 500 °С выход летучих веществ прекращается, и остаются частицы угля и золы.

Во время удаления летучих веществ окружающему кислороду трудно достичь поверхности частиц из-за выходящего потока этих летучих. После завершения удаления летучих веществ молекулы кислорода могут достичь поверхности частиц и вступить в реакцию со структурой угля. Уголь образуется первично из лигнина, однако и при быстром пиролизе растительной биомассы даже гемицеллюлоза может вносить большой вклад в выделение угля [12]. Концентрация угля во многом зависит от температуры сгорания и скорости нагрева. Медленная скорость нагревания обеспечивает повышенный выход угля, поскольку выделяющаяся смола получает время для реполимеризации и образования угля. С другой стороны, высокие скорости нагрева намного быстрее выводят летучие вещества, и смола расщепляется до более легких газов, тем самым снижая выход угля. Однако выход угля в основном зависит от температуры. Высокая температура позволяет расщепить большую часть углеводородной структуры до летучих [13]. Окисление угля часто представляет собой процесс, контролируемый медленной диффузией. Время, необходимое для окисления угля, зависит от окружающей температуры, площади поверхности угля и доступного кислорода. Площадь поверхности зависит от пористости остаточного угля, поскольку кислород диффундирует в уголь через поры и трещины [14]. Основными продуктами, образующимися при окислении угля, являются CO и CO<sub>2</sub>.

Поэтому как эффективный метод совершенствования модели горения отходов растениеводства представляется такой, что посредством процесса математического моделирования кинетических реакций с учетом некоторых допущений возможно с достаточно высокой точностью для требований инженерного проектирования получить результат как для общей скорости конверсии растительных сельскохозяйственных отходов, так и для основных фракций продукта в различных условиях сгорания.

**Результаты исследования и их обсуждение.** Большая часть моделирования сжигания в неподвижном слое в прошлом касалась сжигания угля. В последние годы был разработан ряд моделей сжигания биомассы с неподвижным слоем [15]. Практически все эти модели одномерны.

Известна одномерная стационарная модель газификации биомассы с нисходящим потоком. Она не учитывает сушку и удаление летучих веществ, вместо этого фокусируясь только на сжигании и газификации угля и летучих. Состав летучих веществ рассчитывается исходя из предположения, что топливо из биомассы имеет формулу  $C_{3,03}O_{1,17}$  и образует  $CO$ ,  $CH_4$  и  $H_2O$ . Вклад сушки учитывается путем добавления  $H_2O$  к газам продуктов сгорания. Предполагается, что весь кислород реагирует с углем и образованием  $CO$ , а оставшийся уголь газифицируется  $CO_2$ ,  $H_2O$  и  $H_2$ , где  $H_2$  образуется в результате реакции между  $CH_4$  и  $H_2O$ . Модель не учитывает образовавшуюся смолу.

Общая модель, охватывающая весь процесс переработки топлива из отходов растениеводства,

от сушки до переработки угля, была предложена Ц. Бранч и др. [16]. Считается, что слой состоит из конечного числа упакованных частиц, где каждая частица моделируется в одном измерении. Учитывается теплообмен между частицами, а также усадка частиц. Однако предполагается, что усадка происходит во время сгорания угля, а не во время сушки и удаления летучих веществ. Предусматривается, что летучие вещества, покидающие слой, инертны и не реагируют друг с другом. В ходе сравнения с результатами экспериментов обнаружено, что модель хорошо описывает конверсию сухих частиц при высоких скоростях нагрева. Однако выход летучих веществ из влажных частиц недооценен. Преобразование символов хорошо фиксируется.

H. Thunman и V. Leckner [17] разработали одномерную модель слоя для изучения фронта горения в противоточном слое. Слой состоит из частиц одинакового размера, преобразование каждой частицы изучалось с использованием комплексной модели частицы. Рассмотрены поверхность частицы и исходящие с поверхности газы. Концентрация летучих частиц оценивается по балансу энергии, массе и размерам частиц. Рассмотрены шесть видов летучих. Эмпирические соотношения используются для расчета соотношений  $CO/CO_2$  и  $C_1H_1/CO_2$ . Модель очень детализирована и показывает хорошую сходимость с экспериментальными данными. Во многих работах трехмерный слой аппроксимировался противоточным газификатором, в котором предполагалось, что конверсия топлива происходит поэтапно (рисунок 1).

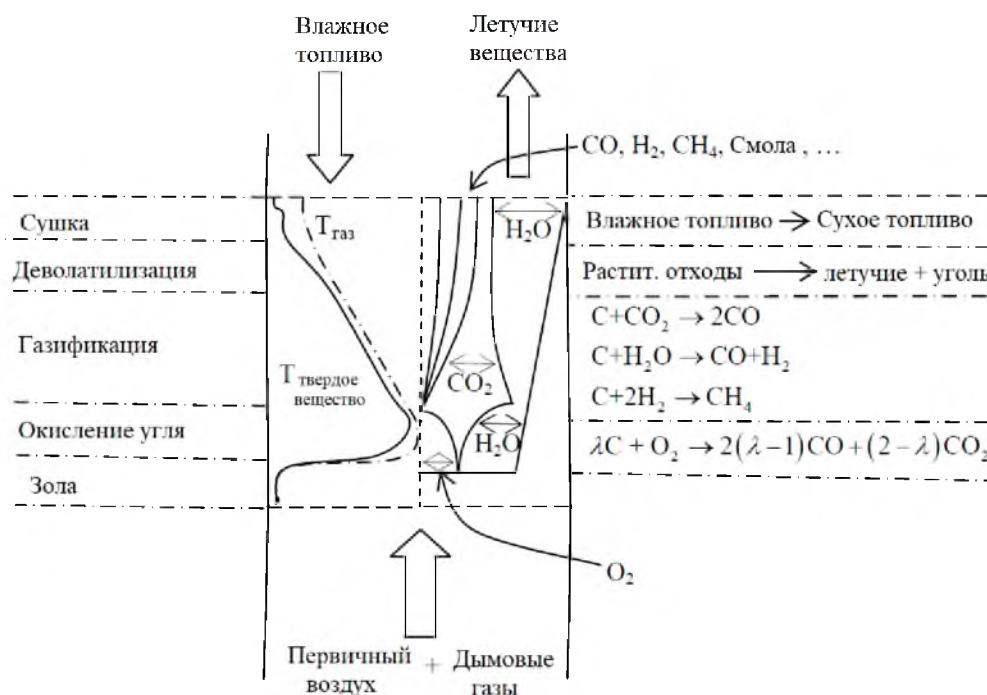


Рисунок 1 – Схема противоточного слоя

Модели слоевого процесса сгорания биомассы в теплогенераторе. Выделяют три нульмерные слоевые модели и одну квазидвумерную модель. Первая модель, полуэмпирическая, представляет собой довольно простую модель, которая хорошо работает, в основном для простых пеллетных горелок. Она суммирует поступающее топливо и воздух, состав топлива представляется в виде  $C_aH_bO_cN_d$  и предполагает, что частицы топлива распадаются на определенное количество газообразных частиц, которые покидают слой. Температура газов, покидающих слой, рассчитывается по закону сохранения энергии. Вторая и третья модели делят слой соответственно на две и три зоны и предполагают, что сушка, удаление летучих веществ и окисление угля происходят в разных зонах и при разных температурах для каждой зоны. Последняя модель представляет собой квазидвумерную модель слоя, в которой предполагается, что слой состоит из конечного числа сферических частиц (пузырьков) [18].

Полуэмпирическая модель слоя. Для моделирования теплогенератора по сжиганию отходов растениеводства можно использовать полуэмпирическую модель, в которой биотопливо подается сверху и падает на решетку, а первичный воздух добавляется под решетку (рисунок 2) [15]. Состав выходящих газов, массовый расход и температура после преобразования слоя рассчитываются

путем применения закона сохранения массы, элементов и энергии поступающего в слой топлива и первичного воздуха. Сначала рассчитывают поток влаги и массовый расход сухой беззольной растительной биомассы.

$$m_{\text{общ}} = m_{\text{T}} + m_{\text{воз}} \quad (1)$$

$$m_{(H_2O)} = \omega_{\text{вл}} \times m_{\text{T}} \quad (2)$$

$$m_{(т.б)} = (1 - \omega_{\text{вл}} - \omega_{\text{з}}) \times m_{\text{T}} \quad (3)$$

где  $m_{\text{общ}}$  – общий массовый расход на горелку, кг/с;

$m_{H_2O}$  – общий массовый расход влаги в топливе;

$m_{\text{T}}$  – общий массовый расход топлива, подаваемого в горелку;

$m_{\text{воз}}$  – общий массовый расход первичного воздуха, подаваемого в горелку;

$m_{\text{т.б}}$  – общий массовый расход сухого беззольного топлива, поступающего в горелку [19];

$\omega_{\text{з}}$  – массовая доля золы в топливе;

$\omega_{\text{вл}}$  – массовая доля влаги в топливе.

Исходя из соотношения элементов, можно рассчитать массовые доли С, Н, О и N:

$$\omega_{\text{C}} = (\omega_{(т.С)} \times m_{(т.б)}) / m_{\text{общ}} \quad (4)$$

$$\omega_{\text{H}} = (\omega_{(т.Н)} \times m_{(т.б)} + 2 \cdot M_{\text{H}}) / M_{(H_2O)} \times m_{(H_2O)} / m_{\text{общ}} \quad (5)$$

$$\omega_{\text{O}} = (\omega_{(т.О)} \times m_{(т.б)} + \omega_{(в.О)} \times m_{\text{в}} + M_{\text{O}} / M_{(H_2O)} \times m_{(H_2O)}) / m_{\text{общ}} \quad (6)$$

$$\omega_{\text{N}} = (\omega_{(т.Н)} \times m_{(т.б)} + \omega_{(в.Н)} \times m_{(H_2O)}) / m_{\text{общ}}, \quad (7)$$

где  $\omega_{\text{т.С}}$  – массовая доля углерода в топливе;

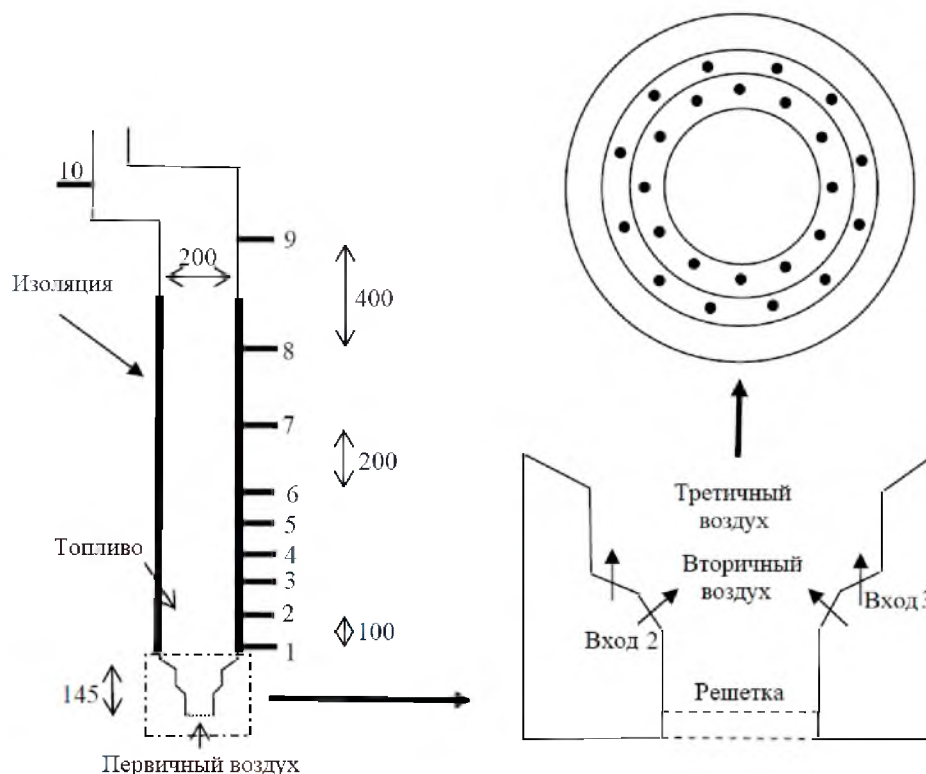


Рисунок 2 – Схема теплогенератора для сжигания отходов растениеводства (размеры в мм)

$\omega_{тН}$  – массовая доля водорода в топливе;  
 $\omega_{тО}$  – массовая доля кислорода в топливе;  
 $\omega_{тN}$  – массовая доля азота в топливе;  
 $M_i$  – молекулярная масса каждого вещества, кг/кмоль.

Двухзонные, трехзонные и квазидвумерные модели слоев основаны на комплексном химическом подходе. Топливо в двухзонной и трехзонной модели является термически тонким, а выход летучих веществ моделируется в модели функциональных групп, деполимеризации, испарения и перекрестных связей (ФГ-ДИП) [20]. ФГ-ДИП представляет собой комплексный подход для прогнозирования выхода и состава продуктов пиролиза угля (газа, смолы и полукокса). Окисление угля моделируется с использованием равновесных расчетов. Квазидвумерная модель представляет собой детализированную модель, которая была разработана на основе одночастичной модели. Модель предполагает, что слой состоит из множества термически плотных частиц, и учитывает тепло- и массоперенос, происходящий внутри каждой частицы.

Модель ФГ-ДИП состоит из двух различных подмоделей: модели функциональных групп (ФГ) и модели деполимеризации, испарения и перекрестных связей (ДИП). Модель ФГ предсказывает, как топливо разлагается с образованием легких газов, а также концентрацию этих газов. Модель ДИП рассматривает топливо как большую решетку, соединенную разрушаемыми и неразрушаемыми связями. Когда начинается термическое разложение, решетка начинает разрушаться с образованием фрагментов за счет разрушения связей (деполимеризация) и связывания (реполимеризация). Процессы связывания и разрушения связей конкурируют друг с другом, а размер фрагментов зависит от конкуренции между двумя процессами. Самые легкие из этих фрагментов испаряются в виде смолы, а более тяжелые образуют обугливание. В модели ФГ-ДИП подмодель ДИП прогнозирует, сколько образуется смолы и полукокса, и объединяет эти данные в модель ФГ. Окончательное количество полукокса рассчитывается в модели ФГ путем суммирования потерь газов и смол, а также добавления полукокса, образующегося в результате связывания смолы.

При одностадийном приближении скорость выхода летучих веществ определяются по закону Аррениуса с эффективными кинетическими константами [21; 22]:

$$k_v = k_{v,0} \times e^{\left(\frac{E_v}{R T_p}\right)}, \quad (8)$$

где  $k_{v,0}$  – предэкспоненциальный множитель процесса выхода летучих веществ;

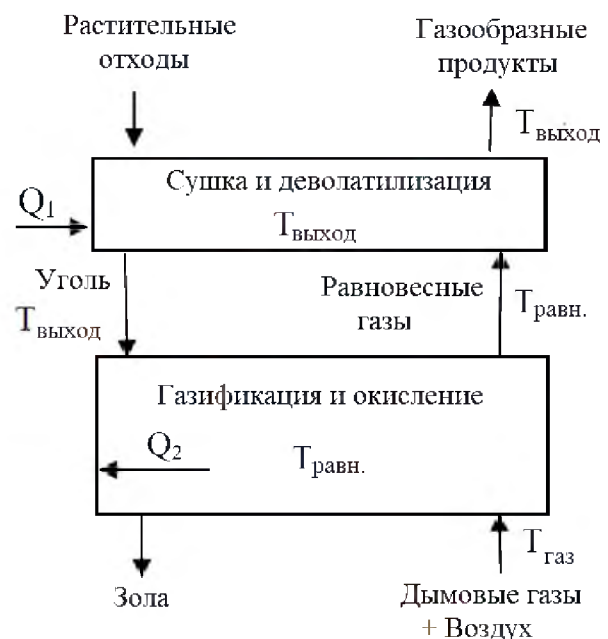
$E_v$  – энергия активации процесса выхода летучих веществ (можно принять  $k_{v,0} = 1,3 \cdot 10^7$  (1/с) [23];  $E_v = 1,67 \cdot 10^8$  (Дж/кмоль)).

Образование каждого вида газа рассчитывается в соответствии с реакцией первого порядка:

$$\frac{\partial \omega_i}{\partial t} = k_i \times \omega_i, \quad (9)$$

$\omega_i$  – массовая доля каждого  $i$ -го вещества.

Двухзонная модель. Она разработана Хоббом для процесса горения угля в противоточном слое [24]. Данная модель является более детализированной по сравнению с полуэмпирической моделью. Слой разделен на две зоны: зону сушки и удаления летучих веществ; зону окисления и газификации (рисунок 3).



Основное предположение состоит в том, что окисление и газификация происходят при гораздо более высокой температуре, чем сушка и удаление летучих веществ. Эта разница температур создает естественную границу между двумя зонами. Поэтому слой можно разделить на две зоны с разной температурой. Зона высокотемпературного окисления и газификации называется равновесной зоной, и газы, образующиеся в этой зоне, находятся в химическом и термическом равновесии. А газы, образующиеся в зоне сушки и удаления летучих, находятся лишь в химическом равновесии. Процесс образования угля моделируется с помощью модели ФГ. Видовой состав и температура определяются, предполагая наличие химического и теплового равновесия, исполь-

зую минимальный выход свободной энергии Гиббса при заданной энтальпии и элементном составе газовой фазы.

**Заключение.** Полуэмпирическая модель может использоваться в основном в тех случаях, когда собрана только часть экспериментальных данных, поэтому достоверное описание всего протекающего процесса имеет значительную погрешность.

Двухзонная модель (для противоточных слоев) и трехзонная модель, а также квазидвумерная модель (для противоточных слоев) применяются для моделирования летучих веществ из слоя. Процесс горения в газовой фазе в свободном слое моделируется с помощью усредненных по Фавру уравнений Навье-Стокса, а также уравнений переноса для энтальпии и массовых долей различных соединений.

Сравнение двузонной модели с результатами измерений показало, что данные по  $O_2$ ,  $CO$  и  $CH_4$  хорошо согласуются, однако уровень массовых долей  $CH_4$  и  $O_2$  завышен, а  $CO_2$  – занижен. Частично это можно объяснить тем, что данные экспериментальных измерений собираются на разных высотах от решетки, поэтому летучие вещества имеют время для окисления кислородом.

Расчетные результаты трехзонной модели хуже согласуются с данными измерений, за исключением  $CH_4$ . Однако концентрация таких веществ, как метан и кислород, описываются достовернее, чем в квазидвумерной модели. Связано это с тем, что в трехзонной модели слоя окисление летучего топлива в нем учитывается в предположении химического равновесия. Показатели  $CO$  в целом согласуются для зоны выхода летучих, но слишком высоки для зоны окисления углей. Для  $CO_2$  данные получаются занижены в зоне выхода летучих.

Недостатком модели ФГ-ДИП является то, что для ее использования необходимо знать исходный состав функциональных групп (т. е. состав газа) и кинетические данные. И только в том случае, если это неизвестно, функциональные группы можно извлечь из аналогичного топлива (т. е. топлива с примерно одинаковым соотношением кислорода к углероду и водорода к углероду). Выходы из известного топлива корректируются путем подбора элементов функциональных групп таким образом, чтобы общая сумма соответствовала конечному составу неизвестного топлива. В связи с этим полученные экспериментальные значения, особенно для теплогенераторов большей мощности, могут отличаться от результатов математического моделирования.

Рассмотренные простые слоевые модели могут в определенной степени предсказывать физические и химические процессы. Колебания летучих веществ вдоль слоя могут быть приблизительно

но смоделированы трехзонной и квазидвумерной моделью слоя. Такие результаты моделирования могут служить первым приближением к процессу горения в слое.

Сжигание отходов растениеводства в теплогенераторах колосникового типа является важным способом преобразования возобновляемого топлива из такой биомассы в тепловую и электрическую энергию, поэтому необходимо решать проблемы, которые имеются в настоящее время в процессе моделирования. Ни одна из моделей не может точно предсказать сложный процесс горения в слое. Для получения более достоверных результатов необходимо более точно учитывать процессы переноса веществ и химические реакции. Кроме того, для проверки моделей в будущем желательно проводить эксперименты с твердыми частицами и летучими газами внутри слоя с применением высокоточного оборудования для контроля параметров исследуемого процесса. Это позволит значительно улучшить понимание особенностей процесса сгорания отходов растениеводства, разработки новых математических моделей и уточнения уже существующих моделей.

#### Список источников

1. Кузубов А.А., Шашло Н.В. Модели использования отходов аграрных предприятий в обеспечении энергетической и экологической безопасности // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2021. Т. 14. № 3 (70). С. 168-176. DOI: 10.53914/issn2071-2243\_2021\_3\_168. EDN: EPJSZP.
2. Hiloidhari M., Das D., Baruah D.C. Bioenergy potential from crop residue biomass in India // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2014. Vol. 32. P. 504-512. ISSN: 1364-0321. DOI: 10.1016/j.rser.2014.01.025.
3. Иванов А.С., Устинов Н.Н. Результаты исследования технических характеристик отходов зерновых культур, применяемых в качестве биотоплива // Аграрный научный журнал. 2020. № 5. С. 88-92. DOI: 10.28983/asj.y2020i5pp88-92. EDN: FGMDMH.
4. Рябов Г.А. Совместное сжигание биомассы и ископаемых топлив – путь к декарбонизации производства тепла и электроэнергии (обзор) // Теплоэнергетика. 2022. № 6. С. 17-32. DOI: 10.1134/S0040363622060054. EDN: VENATJ.
5. Судакова И.Г., Руденко Н.В. Получение твердых биотоплив из растительных отходов (обзор) // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Химия. 2015. Т. 8. № 4. С. 499-513. DOI: 10.17516/1998-2836-2015-8-4-499-513. EDN: VOABJT.
6. Исследование эффективности сжигания древесного биотоплива в теплогенерирующей установке / В.К. Любов [и др.] //

Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2017. № 4 (358). С. 149-161. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.4.149. EDN: YZBFQD.

7. Dai Ya., Zheng H., Jiang Zh., Xing B. Comparison of different crop residue-based technologies for their energy production and air pollutant emission // *Science of the total environment*. 2019. Vol. 707. P. 136122. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.136122.

8. Исследование химико-технологических свойств отходов биомассы растительного сырья / К.А. Сартова [и др.] // *Химия растительного сырья*. 2018. № 4. С. 263-271. DOI: 10.14258/jcprm.2018043330. EDN: YTAPFR.

9. Biofuels from agricultural wastes / L. Pattanaik [et al.] // *Second and Third Generation of Feedstocks: The Evolution of Biofuels*. 2019. DOI: 10.1016/B978-0-12-815162-4.00005-7.

10. Опыт сжигания растительных отходов в топочном блоке ТБР-2,0 / А.В. Голубкович [и др.] // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2017. № 1. С. 37-41. DOI: 10.22314/207375992017.1.3741. EDN: YFTHGN.

11. Giltrap D.L., McJibbin R., Barnes G.R.G. A steady state model of gas-char reactions in a downdraft biomass gasifier // *Solar Energy*. 2003. Vol. 74. P. 85-91.

12. Иванов А.С. Моделирование процесса теплопроводности при сжигании растительных отходов в теплогенераторе // *Сельский механизатор*. 2024. № 3. С. 12-13. DOI: 10.47336/0131-7393-2024-3-12-13-24. EDN: BDJYKC.

13. Saleem M. Possibility of utilizing agriculture biomass as a renewable and sustainable future energy source // *Heliyon*. 2022. Vol. 8. Issue 2. P. e08905. ISSN: 2405-8440. DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e08905.

14. Рябов Г.А., Литун Д.С. Агломерация при сжигании и газификации топлив в кипящем слое // *Теплоэнергетика*. 2019. № 9. С. 42-59. DOI: 10.1134/S0040363619090042. EDN: XCEIMN.

15. Torbern Klason Modelling of Biomass Combustion in Furnaces. Doctoral Thesis // Printed by Media Tryck AB, Lund. 2006. p. 100.

16. Brunch C., Peters B., Nussbaumer T. Modelling of wood combustion under fixed bed conditions // *Fuel*. 2003. No 82. Pp. 729-738.

17. Thunman H., Leckner B. Modelling of the combustion front in a countercurrent fuel converter // *29th Symposium (International) on Combustion*. The Combustion Institute. 2002. Pp. 511-518.

18. Apazhev A.K. Environmentally oriented disposal of waste from agricultural enterprises in a biomethane plant // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022. Vol. 1112. P. 012023. DOI: 10.1088/1755-1315/1112/1/012023.

19. Волхонов М.С. Обоснование эффективно-

сти рециркуляции сушильного агента // *Механизация и электрификация сельского хозяйства*. 2007. № 4. С. 12-14. EDN: HZQBRX.

20. Functional-Group, Depolymerization, Vaporization, Cross-linking Model // *Advanced Fuel Research, Inc.* [Электронный ресурс]. URL: <http://www.afrinc.com/products/fgdvc/> (дата обращения: 07.02.2024).

21. Исследование влияния различных факторов на изменение концентрации щелочных элементов, вызывающих агломерацию слоя / Г.А. Рябов [et al.] // *Теплоэнергетика*. 2021. № 1. С. 85-94. DOI: 10.1134/S0040363621010173. EDN: XVYYEA.

22. Энергетическая утилизация биомассы. Новые технологии / В.М. Зайченко [и др.] // *Теплофизика высоких температур*. 2020. Т. 58. № 4. С. 723-731. DOI: 10.31857/S0040364420040171. EDN: THTQVU.

23. Kuznetsov V.A., Dekterev A.A., Sentyabov A.V., Chernetskiy M.Y. Numerical Study of Devolatilization Models on the Combustion Process of Pulverized Fuel Flow Swirling // *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2016. No 9 (1). P. 15-23. DOI: 10.17516/1999-494X-2016-9-1-15-23.

24. Hobbs M.L., Radulovic P.T., Smoot L.D. Modeling of fixed-bed coal gasifiers // *AIChE Journal* 38. 1992. No 5. Pp. 681-702.

## References

1. Kuzubov A.A., Shashlo N.V. Modeli ispol'zovaniya otkhodov agrarnykh predpriyatii v obespechenii energeticheskoi i ekologicheskoi bezopasnosti [Models of using waste from agricultural enterprises to ensure energy and environmental safety]. *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2021; 14(3-70): 168-176. DOI: 10.53914/issn2071-2243\_2021\_3\_168. EDN: EPJSZP. (In Russ).

2. Hiloidhari M., Das D., Baruah D.C. Bioenergy potential from crop residue biomass in India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014; (32): 504-512. ISSN: 1364-0321. DOI: 10.1016/j.rser.2014.01.025.

3. Ivanov A.S., Ustinov N.N. Rezul'taty issledovaniya tekhnicheskikh kharakteristik otkhodov zernovykh kul'tur, primenyaemykh v kachestve biotopлива [Results of a study of the technical characteristics of grain crop waste used as biofuel]. *The Agrarian Scientific Journal*. 2020; (5): 88-92. DOI: 10.28983/asj.y2020i5pp88-92. EDN: FGMDMH. (In Russ).

4. Ryabov G.A. Sovmestnoe szhiganie biomassy i iskopaemykh topliv – put' k dekarbonizatsii proizvodstva tepla i elektroenergii (obzor) [Co-firing of biomass and fossil fuels – a path to decarbonization of heat and power production (review)]. *Teploenergetika*. 2022; (6): 17-32. DOI: 10.1134/S0040363622060054. EDN: VEHATJ. (In Russ).

5. Sudakova I.G., Rudenko N.B. Poluchenie tverdykh biotopliv iz rastitel'nykh otkhodov (obzor) [Production of solid biofuels from plant waste (review)]. *Journal of Siberian federal university. Chemistry*. 2015; 8(4): 499-513. DOI: 10.17516/1998-2836-2015-8-4-499-513. EDN: VOABJT. (In Russ).
6. Lyubov V.K. et al. Issledovanie effektivnosti szhiganiya drevesnogo biotopliva v teplogeneriruyushchei ustanovke [Study of the efficiency of burning wood biofuel in a heat generating plant]. *Russian forestry journal*. 2017; 4(358): 149-161. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.4.149. EDN: YZ-BFQD. (In Russ).
7. Dai Ya., Zheng H., Jiang Zh., Xing B. Comparison of different crop residue-based technologies for their energy production and air pollutant emission. *Science of the total environment*. 2019; (707): 136122. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.136122.
8. Sartova K.A. et al. Issledovanie khimiko-tekhnologicheskikh svoystv otkhodov biomassy rastitel'nogo syr'ya [Study of the chemical and technological properties of waste biomass plant raw materials]. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ya*. 2018; (4): 263-271. DOI: 10.14258/jcprm.2018043330. EDN: YTAPFR. (In Russ).
9. Pattanaik L. et al. Biofuels from agricultural wastes. *Second and Third Generation of Feedstocks: The Evolution of Biofuels*. 2019. DOI: 10.1016/B978-0-12-815162-4.00005-7.
10. Golubkovich A.V. et al. Opyt szhiganiya rastitel'nykh otkhodov v topochnom bloke TBR-2,0 [Experience of burning plant waste in the combustion unit TBR-2.0]. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2017; (1): 37-41. DOI: 10.22314/207375992017.1.3741. EDN: YFTH-GN. (In Russ).
11. Giltrap D.L., McJibbin R., Barnes G.R.G. A steady state model of gas-char reactions in a downdraft biomass gasifier. *Solar Energy*. 2003; (74): 85-91.
12. Ivanov A.S. Modelirovanie protsessa teploprovodnosti pri szhiganii rastitel'nykh otkhodov v teplogenatore [Modeling the thermal conductivity process when burning plant waste in a heat generator]. *Selskiy Mehanizator*. 2024; (3): 12-13. DOI: 10.47336/0131-7393-2024-3-12-13-24. EDN: BDJYKC. (In Russ).
13. Saleem M. Possibility of utilizing agriculture biomass as a renewable and sustainable future energy source. *Heliyon*. 2022; 8(2): e08905. ISSN: 2405-8440. DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e08905.
14. Ryabov G.A., Litun D.S. Agglomeratsiya pri szhiganii i gazifikatsii topliv v kipyashchem sloe [Agglomeration during combustion and gasification of fuels in a fluidized bed]. *Teploenergetika*. 2019; (9): 42-59. DOI: 10.1134/S0040363619090042. EDN: XCEIMN. (In Russ).
15. Torbern Klason Modelling of Biomass Combustion in Furnaces. Doctoral Thesis. *Printed by Media Tryck AB, Lund*. 2006: 100.
16. Brunch C., Peters B., Nussbaumer T. Modeling of wood combustion under fixed bed conditions. *Fuel*. 2003; (82): 729-738.
17. Thunman H., Leckner B. Modelling of the combustion front in a countercurrent fuel converter. *29th Symposium (International) on Combustion. The Combustion Institute*. 2002; 511-518.
18. Apazhev A.K. Environmentally oriented disposal of waste from agricultural enterprises in a biomethane plant. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022; (1112): 012023. DOI: 10.1088/1755-1315/1112/1/012023.
19. Volkhonov M.S. Obosnovanie effektivnosti retsirkulyatsii sushil'nogo agenta [Rationale for the effectiveness of drying agent recycling]. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaistva*. 2007; (4): 12-14. EDN: HZQBRX. (In Russ).
20. Functional-Group, Depolymerization, Vaporization, Cross-linking Model. *Advanced Fuel Research, Inc.* [Internet]. URL: <http://www.afrinc.com/products/fgdvc/> (Accessed: 07.02.2024).
21. Ryabov G.A. et al. Issledovanie vliyaniyarazlichnykh faktorov na izmenenie kontsentratsii shchelochnykh elementov, vyzyvayushchikh aglomeratsiyu sloya [Study of the influence of various factors on changes in the concentration of alkaline elements causing layer agglomeration]. *Teploenergetika*. 2021; (1): 85-94. DOI: 10.1134/S0040363621010173. EDN: XVYYEA. (In Russ).
22. Zaichenko V.M. et al. Energeticheskaya utilizatsiya biomassy. Novye tekhnologii [Energy utilization of biomass. New technologies]. *Teplofizika vysokikh temperatur*. 2020; 58(4): 723-731. DOI: 10.31857/S0040364420040171. EDN: THTQVU. (In Russ).
23. Kuznetsov V.A., Dekterev A.A., Sentyabov A.V., Chernetskiy M.Y. Numerical Study of Devolatilization Models on the Combustion Process of Pulverized Fuel Flow Swirling. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2016; 9 (1): 15-23. DOI: 10.17516/1999-494X-2016-9-1-15-23.
24. Hobbs M.L., Radulovic P.T., Smoot L.D. Modeling of fixed-bed coal gasifiers. *AIChE Journal* 38. 1992; (5): 681-702.

#### Информация об авторах

А.С. Иванов – кандидат технических наук;  
AuthorID 719529.

#### Information about the author

A.S. Ivanov – Candidate of Technical Sciences;  
AuthorID 719529.

Статья поступила в редакцию 13.05.2024;  
одобрена после рецензирования 28.05.2024; принята к публикации 13.06.2024.

The article was submitted 13.05.2024; approved after reviewing 28.05.2024; accepted for publication 13.06.2024.