

ПОСТРОЕНИЕ АЛГОРИТМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПСЕВДООЖИЖЕННОГО СЛОЯ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОТЛАХ

В.В. Ганиев^{1, 2✉}, И.С. Константинов³

¹ООО «Белэнергомаш – БЗЭМ», Россия, 308009, г. Белгород, ул. Волчанская, д. 165

²ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, д. 85

³ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова», Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46

ganiev_vv@mail.ru

Рассмотрена проблема утилизации растительных биологических отходов посредством их сжигания в энергетических котлах с технологией кипящего слоя. Обоснована актуальность технологии в контексте углеродной нейтральности биотоплива и глобальных климатических стратегий, проводится сравнительный анализ особенностей использования биомассы в России и за рубежом. Приведено описание физического механизма процесса псевдоожигения. Предложен подход к построению математической модели расчета и на ее основе алгоритма определения гидродинамических параметров кипящего слоя для проектирования котлов с кипящим слоем для сжигания биомассы, которые в настоящее время широко используются. Разработана математическая модель гидродинамических характеристик котлов с кипящим слоем. Построен вычислительный алгоритм и получена зависимость для расчета рабочей скорости псевдоожигения, а также ключевые параметры процесса псевдоожигения — критическую скорость начала псевдоожигения, число псевдоожигения, перепад давления в слое и высоту слоя. Проведена верификация теоретических значений путем сопоставления с данными промышленной эксплуатации котлов с кипящим слоем. Проанализировано влияние температуры слоя на скоростные характеристики потока и приводится методика пуска котла из холодного состояния. Предложенный алгоритм позволяет оптимизировать конструкцию воздухораспределительной решетки кипящего слоя и повысить эффективность сжигания низкокалорийных видов топлива.

Ключевые слова: математическая модель, скорость псевдоожигения, псевдоожигенный слой, кипящий слой, гидродинамика, биотопливо, котел

Ссылка для цитирования: Ганиев В.В., Константинов И.С. Построение алгоритма определения гидродинамических параметров псевдоожигенного слоя в энергетических котлах // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2026. Т. 30. № 5. С. 118–131. DOI: 10.17816/2542-1468-2026-5-118-131

Увеличение объема биологических отходов (биомассы), как бытовых, так и промышленных, послужило толчком к дальнейшему развитию технологий их утилизации, в том числе сжигания. В условиях глобальной борьбы с изменением климата использование биомассы в качестве топлива приобретает актуальность. Данный подход рассматривается как один из инструментов сокращения выбросов диоксида углерода (CO_2).

Ключевым преимуществом биомассы в соответствии с Киотским протоколом к Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата от 16.02.2005 г., является ее углеродная нейтральность, т. е. отсутствие чистого прироста выбросов углерода в атмосферу.

При сжигании биомассы выделяется такое же количество CO_2 , какое было поглощено растением за весь период его активного роста. Таким образом, природный баланс CO_2 не нарушается, поскольку новые растения и деревья продолжают расти и поглощать выделяемый диоксид углерода.

В отличие от этого при сжигании ископаемого топлива возникает дисбаланс CO_2 . Ископаемые виды топлива изначально находились в толще земли, и в природе не существует механизма нейтрализации содержащегося в них диоксида углерода [1–5].

Мировые тенденции подтверждают рост интереса к биомассе как источнику энергии. В Западной Европе, особенно в скандинавских странах, активно используют различные виды биомассы для получения тепла и электроэнергии. За рубежом сжигание биомассы получило

широкое распространение в рамках стратегий по сокращению выбросов CO_2 [1].

Однако у растительной биомассы в исходном состоянии есть существенные недостатки по сравнению с другими видами топлива [4]:

- значительно более низкая теплота сгорания;
- значительно более высокая влажность;
- небольшая насыпная плотность.

Эти факторы ограничивают энергетическое использование биомассы, особенно на крупных энергетических установках.

В России ситуация имеет свои особенности. При относительно низких ценах на энергоресурсы (особенно на природный газ) использование специального древесного топлива для производства тепла и электроэнергии пока не находит широкого применения [1, 2].

Вместе с тем в стране активно внедряются новые установки для получения тепла и электроэнергии из отходов производств. Такие решения быстро окупаются (за 1–3 года) на предприятиях лесопромышленного комплекса и сельского хозяйства, что демонстрирует потенциал биомассы как элемента национальной стратегии энергосбережения и снижения вредных выбросов в атмосферу [1, 2].

Оптимальной технологией сжигания биомассы в настоящее время считается сжигание в кипящем слое (КС). Данная технология позволяет эффективно утилизировать различные виды топлива с низкой теплотворной способностью, высокой влажностью и зольностью [1–4, 6–25].

Таким образом, применение котлов с КС для сжигания биомассы представляет собой перспективное направление в области энергетики. Оно способствует сокращению выбросов диоксида углерода (CO_2) и обеспечивает эффективное использование возобновляемых источников энергии.

Качественное сжигание твердого топлива в котлах с КС обеспечивается за счет интенсивного перемешивания твердых частиц инертного слоя и топлива. Благодаря аккумулятивному теплу слоя (накопленной тепловой энергии в процессе сгорания топлива, которая сохраняется в инертных материалах КС и используется для поддержания стабильного температурного режима), происходят эффективный разогрев вновь подаваемого топлива и его газификация. Продукты газификации сгорают в надслоевом пространстве, смешиваясь с вторичным воздухом. Коксовый остаток при интенсивном истирании с наполнителем слоя выгорает в кипящем слое благодаря первичному воздуху. За счет выгорания коксового остатка происхо-

дит разогрев инертного наполнителя слоя. Технология КС позволяет поддерживать стабильное горение топлива с низкой калорийностью и высокой влажностью, исключая необходимость сжигания дополнительного топлива для поддержания процесса горения. Кроме того, аккумулятивное тепло слоя помогает уменьшить влияние изменения качества топлива на работу котла [2, 5–19, 21–28]. Поскольку в технологии КС частицы инертного слоя, выступающие в качестве аккумулятора тепла, ориентировочно занимают 95...99 % массы всех твердых частиц слоя [13, 14, 21–23], определяющим параметром при выполнении расчетов гидродинамических характеристик КС будет являться не размер частицы топлива, а размер частицы материала слоя.

В классических работах по псевдооживлению [21–23, 29–34] показано, что интенсивное перемешивание твердых частиц инертного слоя и топлива достигается путем подачи газа (воздуха) под неподвижный слой сыпучего материала, в котором под действием потока газа начинается процесс псевдооживления. Отдельно стоит отметить, что особое значение в данном процессе имеет воздушораспределительная решетка, которая обеспечивает равномерность распределения потоков воздуха в слое и тем самым поддерживает стабильное «кипение» слоя [35]. При достижении определенного значения скорости начала псевдооживления (первая критическая скорость — $w_{кр}$), при которой сила гидродинамического воздействия (давления p) становится равной силе тяжести частиц, неподвижный слой переходит во взвешенное состояние

$$g \cdot \rho_{\text{нас}} = - \frac{dp}{dz}, \quad (1)$$

где g — ускорение свободного падения, м/с²;
 $\rho_{\text{нас}}$ — плотность насыпная (материала в слое) с учетом силы Архимеда, кг/м³;
 $-\frac{dp}{dz}$ — вертикальная составляющая градиента давления, Па/м.

Принимая как условие, что частицы слоя являются монодисперсными и с учетом их реальных характеристик и высоты слоя, уравнение (1) примет следующий вид

$$\frac{\Delta P_{\text{сл}}}{H_0} = g \cdot (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{г}}) \cdot (1 - \varepsilon_0), \quad (2)$$

где $\Delta P_{\text{сл}}$ — перепад давления в слое, Па;
 H_0 — высота неподвижного слоя, м;
 $\rho_{\text{ч}}$ — истинная плотность частиц, кг/м³;
 $\rho_{\text{г}}$ — плотность потока газа (воздуха), кг/м³;
 ε_0 — порозность (доля объема пустот между частицами в объеме слоя) неподвижного слоя.

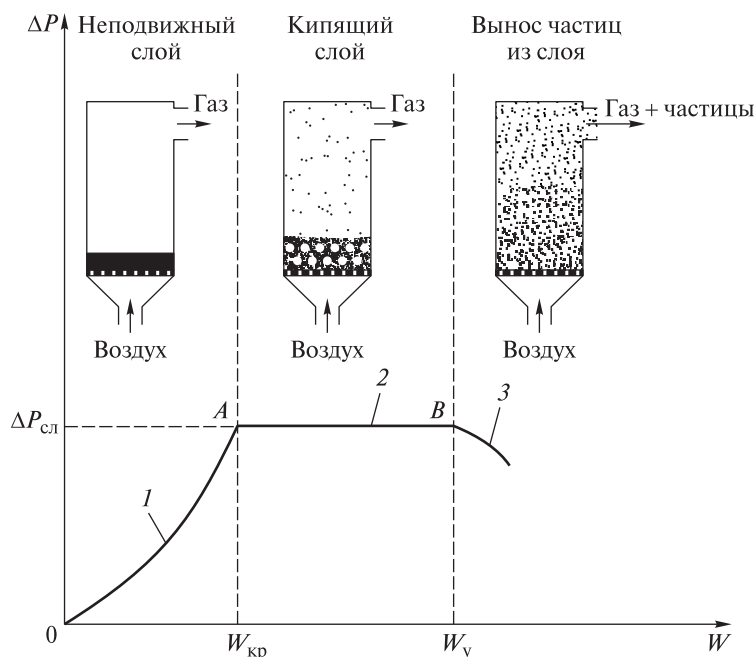


Рис. 1. Идеальная кривая псевдоожижения: 1 — фильтрование агента сквозь неподвижный слой; 2 — псевдоожиженное состояние ($\Delta P_{\text{сл}} = \text{const}$); 3 — унос частиц из слоя

Fig. 1. Ideal fluidization curve: 1 — filtration of the agent through a stationary bed; 2 — fluidized state ($\Delta P_{\text{сл}} = \text{const}$); 3 — particle entrainment from the bed

По сути, процесс псевдоожижения схож с процессом кипения жидкости и приобретает некоторые ее свойства, а его поведение подчиняется законам гидростатики.

Приведем некоторые особенности этого процесса [21].

1. На любой высоте КС статическое давление равно массе псевдоожиженных частиц, приходящейся на единицу площади сечения над этой высотой.

2. Поверхность КС остается горизонтальной независимо от наклона. Кроме того, КС принимает форму емкости.

3. Твердые частицы из слоя могут быть удалены через отверстие в дне или боковой стенке, аналогично тому, как жидкость вытекает из емкости.

4. Предметы, плотность которых превышает плотность КС, тонут, а предметы меньшей плотности всплывают.

5. Частицы в КС хорошо перемешаны, что обеспечивает при нагревании равномерное распределение температуры по всей поверхности слоя.

Для идеальной кривой, когда не учитывается сила сцепления одиночной частицы с соседней, и принято считать, что все частицы в слое монодисперсные и имеют сферическую гладкую

поверхность, можно выделить три интервала скоростей (рис. 1) [21, 29–33]:

1) кривая 1 — от 0 до первой критической скорости ($w_{\text{кр}}$) — соответствует режиму фильтрования газа через неподвижный слой, при данном режиме происходит образование каналов в неподвижном слое;

2) кривая 2 — от первой критической скорости ($w_{\text{кр}}$) до уноса части из слоя (вторая критическая скорость w_y) — данное состояние характеризуется образованием газовых пузырей и переходу в режим пузырькового оживления.

В данном режиме перепад давления слоя остается постоянным, при этом высота слоя увеличивается за счет увеличения расстояния между частицами (порозности ϵ)

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{сл}} &= g \cdot (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{г}}) \cdot (1 - \epsilon_0) \cdot H_0 = \\ &= g \cdot (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{г}}) \cdot (1 - \epsilon_{\text{кр}}) \cdot H_{\text{кр}}, \text{ Па} \end{aligned} \quad (3)$$

где $\epsilon_{\text{кр}}$ — порозность слоя в момент начала псевдоожижения;

$H_{\text{кр}}$ — высота слоя в момент начала псевдоожижения, м.

Этот режим считается наиболее приемлемым для котлов с КС, благодаря зоне стабильного кипения, где все частицы находятся в движении без выноса из слоя;

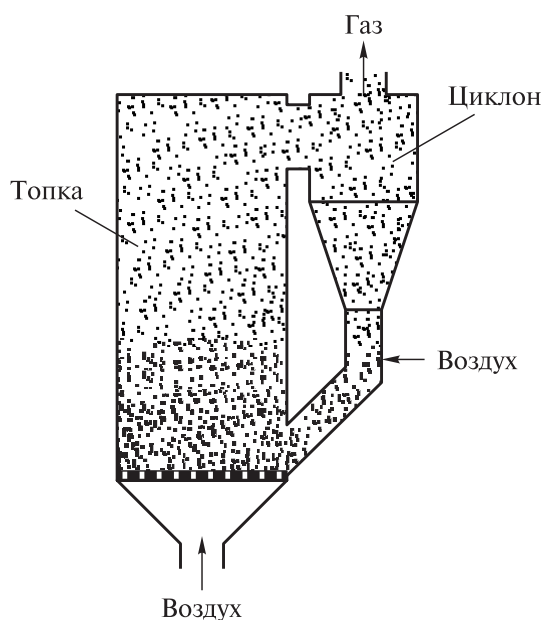


Рис. 2. Схема котла с топкой циркулирующего кипящего слоя

Fig. 2. Schematic diagram of a boiler with a circulating fluidized bed furnace

3) кривая 3 — описывает вынос частиц из слоя при скоростях, превышающих критическую, когда происходит массовый вынос частиц из слоя.

Данный режим применяется в котлах с циркулирующим кипящим слоем (ЦКС) (рис. 2).

Из зависимостей скоростей (см. рис. 1) наглядно видно, что стационарный КС существует в ограниченном интервале скоростей

$$w_{кр} \leq w_{раб} \leq w_y \quad (4)$$

где $w_{раб}$ — является рабочей скоростью псевдоожижения, при которой частицы слоя находятся в движении без выноса за пределы слоя, м/с.

На основе известных зависимостей [29, 30, 32, 34] разработан алгоритм расчета гидродинамических показателей котлов с КС.

В качестве формулы, применяемой для расчета скорости начала псевдоожижения, в России широко применяется формула Тодеса [29, 30, 34]

$$Re_{кр} = \frac{Ar}{150 \cdot \frac{1 - \epsilon_{кр}}{\epsilon_{кр}^3} + \sqrt{\frac{1,75}{\epsilon_{кр}^3} \cdot Ar}}, \quad (5)$$

где $Re_{кр}$ — критерий Рейнольдса

$$Re_{кр} = \frac{w_{кр} \cdot d_q^{cp}}{v_r}; \quad (6)$$

Ar — критерий Архимеда

$$Ar = \frac{g \cdot d_q^{cp3}}{v_r^2} \cdot \frac{(\rho_q - \rho_r)}{\rho_r}; \quad (7)$$

d_q^{cp} — средний по поверхности диаметр частиц, м;

v_r — кинематическая вязкость газа (воздуха), м²/с.

При расчетах чаще используют упрощенную формулу (5) [29, 30, 32, 34, 36] с учетом, что $\epsilon_{кр} \approx 0,4$ [21–23, 32, 34]

$$Re_{кр} = \frac{Ar}{1400 + 5,22 \cdot \sqrt{Ar}}. \quad (8)$$

Расчет скорости уноса частиц из слоя проводится по интерполяционной формуле Тодеса, которая считается наиболее универсальной во всем диапазоне чисел Рейнольдса [29, 30, 32, 34, 36, 37]

$$Re_y = \frac{Ar}{18 + 0,61 \cdot \sqrt{Ar}}, \quad (9)$$

где Re_y — критерий Рейнольдса

$$Re_y = \frac{w_y \cdot d_q^{cp}}{v_r} \dots \quad (10)$$

Рабочую скорость псевдоожижения задают с помощью числа псевдоожижения (K_w), характеризующего интенсивность перемешивания [22, 38]

$$K_w = \frac{w_{раб}}{w_{кр}}. \quad (11)$$

Согласно рекомендациям [22, 38] значение числа псевдоожижения должно находиться в диапазоне 3...5.

Определение рабочей скорости псевдоожижения. Поскольку ключевым фактором, определяющим рабочую скорость псевдоожижения инертного слоя, является размер частиц материала, установим следующие ограничения.

1. В качестве максимального размера неочищаемых частиц инертного слоя (d_q^{max}), исходя из многолетнего опыта проектирования и эксплуатации котлов для сжигания биотоплива в КС, принимается 2,5 мм. Этот параметр задает максимально допустимую скорость псевдоожижения, необходимую для поддержания частиц во взвешенном состоянии.

2. Минимальный размер частиц инертного слоя (d_q^{min}), которые могут быть вынесены из слоя, должен быть меньше 0,3 мм. Это значение было установлено на основе многолетнего опыта проектирования и эксплуатации котлов для сжигания биотоплива в КС, накопленного одной из ведущих мировых компаний-производи-

телей котлов Valmet [14]. Данный параметр является граничным условием, превышение которого повлияет на стабильность и эффективность работы КС.

В качестве оживающего инертный слой газа принимаем воздух. Полученные значения гидродинамических параметров КС в дальнейшем будут использоваться при расчете объема первичного воздуха ($V_{\text{в1}}$). При этом следует отметить, что распределение расхода оживающего газа имеет ярко выраженную градиентную природу:

- в нижней части слоя — холодный воздух с минимальным расходом;
- в средней части слоя — прогретый воздух с увеличенным расходом;
- в верхней части (на поверхности) слоя — дымовые газы с максимальным расходом.

Характерной особенностью данного процесса является крайне быстрое выравнивание температурного режима газов. Уже на расстоянии нескольких сантиметров от плоскости воздухораспределительной решетки температура поступающего воздуха практически полностью сравнивается с температурой самого слоя, что обеспечивает эффективную теплопередачу и стабильность процесса горения [22].

В качестве исходных параметров для вычислений были приняты следующие данные:

1. Диапазон температуры кипящего слоя составляет от 800 до 900 °С [14, 21, 22, 28], в качестве расчетной температура слоя ($T_{\text{сл}}$) принято значение 800 °С. Такое решение обеспечивает небольшой запас на ухудшение состава слоя и качества топлива, поскольку температура зависит от доли тепла в слое, которое определяется избытком (недостатком) воздуха в слое и теплотой сгорания топлива [34]. При данной температуре определяются физические свойства оживающего воздуха.

2. В качестве инертного слоя применяется фракционированный кварцевый песок с размером фракций 0,8...1,25 мм, со средним по поверхности размером частиц ($d_{\text{ч}}^{\text{cp}}$) 1,0 мм.

3. Истинная плотность кварцевого песка ($\rho_{\text{ч}}$), который используется в качестве инертного слоя, составляет 2450 кг/м³, насыпная плотность $\rho_{\text{нас}}$ — 1450 кг/м³.

Скорость начала псевдоожижения по выражению (6) для максимального размера неожигаемых частиц инертного слоя размером $d_{\text{ч}}^{\text{max}} = 2,5$ мм составит ~1,24 м/с. Округлим это значение до 1,2 м/с. Данное значение, полученное на основе ранее установленного условия по максимальному размеру неожигаемых частиц, является достаточным для обеспечения процесса псевдоожижения при среднем по поверхности размере частиц $d_{\text{ч}}^{\text{cp}} = 1,0$ мм.

При этом скорость начала псевдоожижения для средних частиц составляет ~0,3 м/с. По выражению (11) определяем число псевдоожижения, которое составит ~4.

Полученное значение числа псевдоожижения является приемлемым, поскольку находится в диапазоне 3...5 [22, 38], что обеспечивает устойчивое псевдоожижение как средних по размеру частиц, так и крупных, которые могут образовываться в процессе агломерации слоя или попадания в слой вместе с топливом. Расчет рабочей скорости псевдоожижения по выражению (11) выполняем, принимая число псевдоожижения за 4, тогда скорость составит ~1,2 м/с.

Следует отметить, что фактическая скорость газового потока в сечении КС превышает расчетное значение рабочей скорости псевдоожижения (1,2 м/с). Это обусловлено тем, что объем дымовых газов, образующихся при сгорании топлива, значительно превосходит объем воздуха, подаваемого в решетку КС [22, 34]. Однако качественный анализ показывает, что данное явление работает на повышение эффективности процесса. Образующиеся продукты сгорания создают дополнительный «запас» объема, который способствует более эффективному оживанию агломерированных частиц в КС.

На основании рассчитанной рабочей скорости псевдоожижения 1,2 м/с выполним расчет минимального диаметра частиц, уносимых из КС.

Критерий Лященко $Ly = Re^3/Ar$ [30, 38] с учетом выражений (7) и (10) примет вид

$$Ly = \frac{w_{\text{раб}}^3 \cdot \rho_{\text{гр}}}{g \cdot v_{\text{гр}} \cdot (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{гр}})}, \quad (12)$$

а с учетом выражения (9) — иной вид

$$Ly = \frac{Ar_{\text{min}}^2}{(18 + 0,61 \cdot \sqrt{Ar_{\text{min}}})^3}. \quad (13)$$

Выразим критерий Архимеда из выражения (13)

$$Ar_{\text{min}} = (18 + 0,61 \cdot \sqrt{Ar_{\text{min}}})^{\frac{3}{2}} \cdot Ly^{\frac{1}{2}}. \quad (14)$$

Выражение (14) представим в виде функции

$$f(x) = (18 + 0,61 \cdot \sqrt{x})^{\frac{3}{2}} \cdot Ly^{\frac{1}{2}} - x. \quad (15)$$

Расчет выражения (15) выполняется методом дихотомии (деления пополам).

Исходя из выражения (7), минимальный размер частиц, подлежащих уносу из КС при рабочей скорости псевдоожижения, можно определить по формуле

$$d_{\text{ч.у}}^{\text{min}} = \left(\frac{v_{\text{гр}}^2 \cdot Ar_{\text{min}} \cdot \rho_{\text{гр}}}{g \cdot (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{гр}})} \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (16)$$

Основные характеристики котлов с кипящим слоем для сжигания биомассы

Key characteristics of fluidized-bed boilers for biomass combustion

Параметр	АО «Архангельский ЦБК»		ОАО «Сегежский ЦБК»	
	Котел Е-75-3,9-440ДФТ	Котел МТК-83,5-10-540	Котел МТК-120-4,0-440	Котел МТК-120-4,0-440
Номинальная тепловая мощность котла, МВт	60	59	90	90
Год пуска	2004	2014	2018	2018
Топливо	Кородревесные отходы, иловые осадки	Кородревесные отходы, иловые осадки	Кородревесные отходы, щепа, иловые осадки, мазут	
Производитель	Kvaerner Power Oy, ООО СО «Белэнерго-машпроект», ООО «Белэнерго-маш – БЗЭМ»	Metso Power Oy, АО «ЗКО»	Valmet Technologies Oy, АО «ЗКО»	
Основные характеристики КС: проект решетки	Kvaerner Power Oy	Metso Power Oy	Valmet Technologies Oy	
площадь сечения, м ²	35,3	47,5	46,3	
вид песка	Гс3 ТУ-5717-006-00136722-2016	Гс3 ТУ-5717-006-00136722-2016	Гс3 ТУ-5717-006-00136722-2016	
средний по поверхности размер частиц песка, мм	1	1	1	
средняя высота насыпного слоя, м	0,6	0,45	0,6	
температура КС, °С	800–900	800–900	800–900	
Параметры работы: нагрузка котла, %	100	55	100	40
паропроизводительность, т/ч	75	45	83,5	46
давление перегретого пара, МПа	3,9	3,9	10	10
температура перегретого пара, °С	440	410	540	505
расход первичного воздуха и газов рециркуляции, нм ³ /с	11,81	6,94	15,6	10,2
расход первичного воздуха, нм ³ /с	11,81	6,94	15,6	10,2
расход вторичного воздуха, нм ³ /с	9,72	15	7,1	4,3
расход третичного воздуха, нм ³ /с	–	–	2,8	0,8
число псевдооживления	3,9...4,4	2,3...2,6	3,9...4,4	2,5...2,9
скорость в сечении КС, м/с	1,21...1,32	0,71...0,78	1,21...1,33	0,79...0,87

Минимальный размер частицы, уносимой из слоя при рабочей скорости псевдооживления, составил 0,22 мм. Полученное значение не превышает установленного ранее ограничения по размеру частиц ($d_{\text{ч}}^{\text{мин}} = 0,3$ мм), которые могут выноситься из слоя.

На основании анализа работы действующих котлов с КС были определены их основные характеристики и параметры. Рассмотрим некоторые характеристики котлов с КС (таблица).

На основании данных по котлу Е-75-3,9-440ДФТ построим график (рис. 3) изменения скорости воздуха в сечении КС в зависимости от температуры КС при постоянном расходе первичного воздуха.

На графике (см. рис. 3) представлены три ключевые линии (кривые):

1) $w_{\text{раб}}$ ($N = 100\%$) — динамика изменения скорости воздуха в сечении КС при варьировании температуры КС от 25 °С до 900 °С и постоянном расходе первичного воздуха 11,81 нм³/с;

2) $w_{\text{раб}}$ ($N = 55\%$) — зависимость скорости воздуха в сечении КС от температуры КС в диапазоне от 800 до 900 °С с постоянным расходом воздуха 6,94 нм³/с;

3) $w_{\text{кр}}$ — кривая критической скорости начала псевдооживления в интервале температур КС от 25 до 900 °С для частиц песка со средним размером по поверхности 1 мм.

Проведем детальный анализ полученных данных (см. рис. 3), отражающих взаимосвязь между скоростью и температурой КС при условии постоянного расхода первичного воздуха.

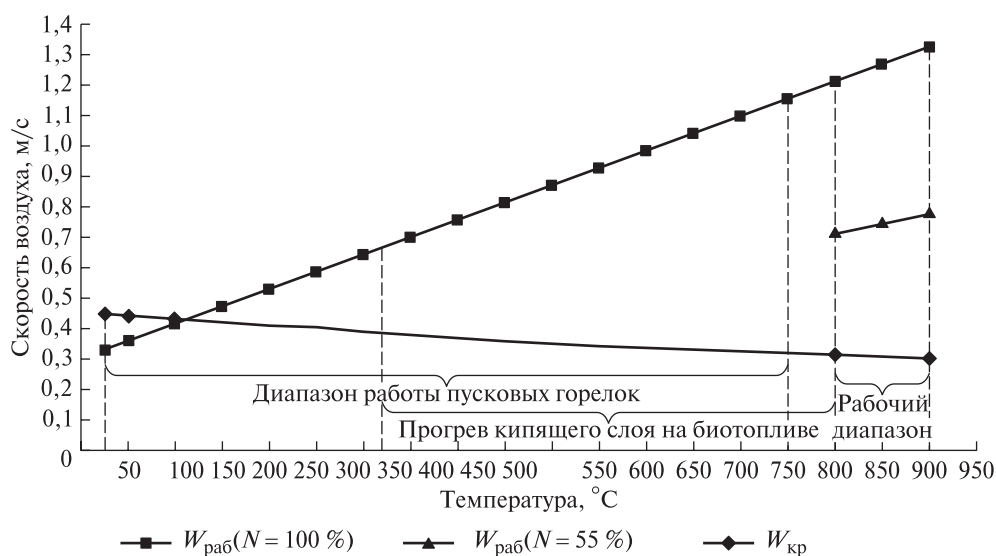


Рис. 3. Скорость воздуха в кипящем слое в зависимости от температуры
 Fig. 3. Air velocities in the fluidized bed as a function of temperature

По мере повышения температуры слоя скорость в сечении КС увеличивается линейно. Данный эффект обусловлен термодинамическими свойствами воздуха — при нагревании происходит снижение его плотности, что закономерно отражается на скоростных характеристиках потока.

У критической скорости начала псевдоожижения наблюдается обратная зависимость: с ростом температуры КС происходит снижение критической скорости начала псевдоожижения. Физическое обоснование данного явления заключается в том, что при уменьшении плотности воздуха требуется меньшее значение скорости для преодоления сил сцепления между частицами инертного слоя, что способствует более легкому переходу системы в состояние псевдоожижения.

Пуск котла из холодного состояния представляет наибольший интерес, поскольку включает в себя больше информации об изменении характеристик КС на всем диапазоне температур. Пуск котла осуществляется при предварительном заполнении его деаэрированной водой.

До включения в работу растопочных (пусковых) горелок (горелки размещены над КС и установлены под углом для его эффективного прогрева) пуск котла начинается с подачи первичного воздуха в решетку КС, а затем — под слой, для приведения инертного слоя в оживленное состояние. Стоит отметить, что в данном случае воздух с температурой примерно 25 °С (если только воздушные калориферы не запитаны от сторонних источников тепла) подается в холодный котел. При данных условиях скорость воздуха в КС составит 0,34 м/с.

Скорость начала псевдоожижения при температуре воздуха 25 °С составляет 0,45 м/с, т. е. при данном режиме необходимо увеличить расход воздуха для оживления слоя. В противном случае отсутствие оживления частиц слоя или образование застойных зон во время работы пусковых горелок приведет к неравномерному распределению температуры в слое. Это может вызвать агломерацию верхней поверхности слоя.

После подтверждения устойчивого функционирования КС осуществляют прогрев инертного слоя растопочными горелками. Оптимальная скорость прогрева 1 °С/мин, максимально допустимая 1,5 °С/мин. Такая скорость позволяет равномерно прогреть инертный слой и избежать локального перегрева, способного вызвать агломерацию частиц.

Из рис. 2 видно, что при температуре слоя 108 °С скорость псевдоожижения выравнивается со скоростью начала псевдоожижения (значение ~0,43 м/с). Уже при температуре 150 °С скорость псевдоожижения (0,48 м/с) превышает скорость начала псевдоожижения (0,42 м/с). Это обеспечивает перемешивание слоя и, следовательно, более равномерную температуру в нем.

При наличии нагрузочных горелок (предназначенных для работы котла на дополнительном топливе — газе или мазуте, а также в комбинации с биотопливом) пуск котла начинается с разогрева топки и котла в целом. Этот процесс осуществляется без оживления инертного слоя и без работы растопочных горелок, поскольку нагрузочные горелки располагаются выше зоны подачи вторичного воздуха и установлены горизонтально, что уменьшает тепловое воздей-

ствие на поверхность песка. При этом нагрузка горелки не должна превышать 40 %, чтобы пламя горелки не расплавало поверхность песка. В течение первых 2 ч нагрузочные горелки обеспечивают подъем давления в пароводяном тракте котла и температуры дымовых газов на выходе из котла до значения выше 100 °С.

По прошествии 2 ч происходит подача первичного воздуха, вследствие чего происходит ожигание инертного слоя. Затем включаются растопочные горелки, при этом нагрузочные горелки выключаются. Далее процесс набора температуры КС и дальнейшие пусковые операции на котле происходят по аналогии с котлами без нагрузочных горелок. Данный режим пуска (с использованием нагрузочных горелок) позволяет более равномерно прогревать огнеупорную обмуровку топки и вести более быстрый пуск котла.

Биотопливо начинает воспламеняться при температуре выше 300 °С, поэтому при достижении КС температуры в 320...350 °С начинается периодическая подача основного топлива до температуры КС 450 °С. Растопку котла целесообразно проводить на биотопливе с пониженной влажностью (примерно 40...45 %), исключив подачу илового осадка (при его наличии). Такое топливо воспламеняется быстрее, поскольку требует меньшего количества тепла на просушку. Это упрощает процесс разогрева котла и снижает механический недожог топлива в период пуска.

Подача биотоплива сопровождается с поддержкой его горения пусковыми горелками до достижения температуры КС в 700...750 °С.

Из рис. 2 видно, что при рабочих параметрах слоя (температура 800...900 °С) скорость воздуха в КС составляет примерно 1,21...1,32 м/с. Критическая скорость воздуха в КС, при которой начинается псевдоожигания, находится в диапазоне $\approx 0,31...0,30$ м/с. Подставив эти значения в выражение (11), можно вычислить, что число псевдоожигания будет составлять $\approx 3,9...4,4$.

Полученные ранее значения числа псевдоожигания и рабочей скорости псевдоожигания для средней частицы слоя практически совпадают с данными значениями, а также с другими значениями на действующих объектах (см. таблицу).

Дополнительно следует отметить, что ранее выбранная скорость псевдоожигания 1,2 м/с обеспечивает возможность подачи дымовых газов рециркуляции совместно с первичным воздухом. Рециркуляция дымовых газов используется для регулирования температуры слоя. При изменении расхода газов рециркуляции изменяется концентрация кислорода в слое,

участвующем в реакциях горения. Стабильность слоя не нарушается, поскольку имеется запас по критической скорости, т. е. скорости уноса для минимального размера частиц инертного слоя $d_{\text{ч}}^{\text{min}} = 0,3$ мм. В соответствии с выражением (10) скорость уноса частиц размером 0,3 мм из слоя составляет примерно 1,99 м/с.

Значение скорости псевдоожигания 1,2 м/с актуально только при номинальной нагрузке котла. При снижении нагрузки данное значение тоже будет меньше, так как расход топлива уменьшается. Снижение скорости может привести к проблемам в работе слоя, таким как застой или провалы. Заменить недостающий объем воздуха газами рециркуляция нельзя, поскольку это уменьшит температуру слоя, что также нарушит его работу. На действующих объектах при пониженных нагрузках скорость составляет $\sim 0,8$ м/с (см. таблицу). Стоит отметить, что расход первичного воздуха снижается непропорционально нагрузке.

Расчет гидродинамических показателей котлов с КС выполняется на «идеальные условия», при которых не происходит истирание частиц КС или агломерация частиц КС за счет компонентов топлива.

Далее определяем перепад давления (в Па) в слое

$$\Delta P_{\text{сл}} = g \cdot (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{г}}) \cdot (1 - \varepsilon_0) \cdot H_0. \quad (17)$$

Принимая во внимание, что

$$\varepsilon_0 = 1 - \frac{\rho_{\text{нас}}}{\rho_{\text{ч}}}, \quad (18)$$

получаем, что $\varepsilon_0 \approx \varepsilon_{\text{кр}}$, т. е. порозность насыпного слоя равна 0,4.

Высота (в м) псевдоожиганного слоя

$$H_{\text{сл}} = \frac{\Delta P_{\text{сл}}}{g \cdot (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{г}}) \cdot (1 - \varepsilon_{\text{раб}})}, \quad (19)$$

где $\varepsilon_{\text{раб}}$ — порозность псевдоожиганного слоя,

$$\varepsilon_{\text{раб}} = \varepsilon_{\text{кр}} \cdot \left(\frac{Re_{\text{раб}} + 0,02 \cdot Re_{\text{раб}}^2}{Re_{\text{кр}} + 0,02 \cdot Re_{\text{кр}}^2} \right)^{0,21}, \quad (20)$$

где $Re_{\text{раб}}$ — критерий Рейнольдса,

$$Re_{\text{раб}} = \frac{w_{\text{раб}} \cdot d_{\text{ч}}^{\text{ср}}}{\nu_{\text{г}}}. \quad (21)$$

Блок-схема алгоритма реализации предлагаемой математической расчетной модели представлена на рис. 4.

Полученные значения гидродинамических параметров КС позволяют определить объем первичного воздуха ($V_{\text{в1}}$, $\text{м}^3/\text{с}$), который подается в решетку КС.

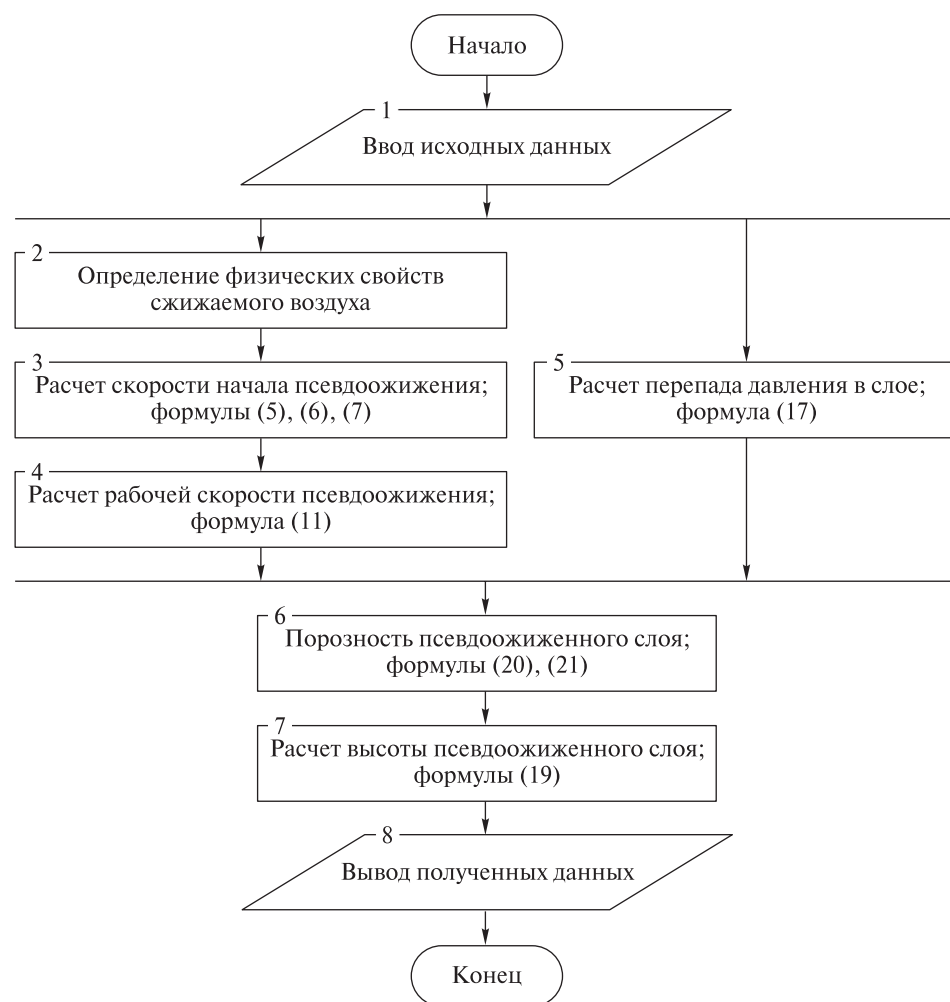


Рис. 4. Блок-схема алгоритма определения гидродинамических параметров кипящего слоя

Fig. 4. Flowchart of the algorithm for determining the hydrodynamic parameters of a fluidized bed

$$V_{в1} = w_{раб} \cdot S_{сл} \cdot \left(\frac{P_0 + \Delta P_{сл}}{P_0} \right) \cdot \left(\frac{273^\circ \text{C}}{273^\circ \text{C} + T_{сл}} \right), \quad (22)$$

где $S_{сл}$ — площадь сечения кипящего слоя, м^2 ;
 P_0 — давление газа (воздуха) при нормальных условиях, Па.

Полученное значение $V_{в1}$ служит базовым параметром для расчета конструкции воздухо-распределительной решетки и определения проходных сечений коробов первичного воздуха.

Выводы

Использование биомассы в качестве топлива при выработке тепла и электроэнергии является важной задачей энергосбережения. Этот подход способствует сокращению выбросов диоксида углерода (CO_2) и обеспечивает эффективное использование возобновляемых источников энергии.

Комплексный анализ процесса сжигания биомассы в котлах с КС позволил определить

ключевые гидродинамические параметры: скорости начала псевдооживления и уноса частиц из слоя, диапазон чисел псевдооживления и рабочую скорость псевдооживления. Разработанный алгоритм лег в основу программного комплекса, применяемого для определения параметров котлов с КС на ООО «Белэнергомаш-БЗЭМ». Его результатом стало определение параметров решетки КС с учетом установленных рабочих скоростей псевдооживления.

Выбранные параметры котла с КС отвечают условиям устойчивой работы, что подтверждается практикой эксплуатации аналогичных установок. Разработанная математическая модель и алгоритм могут успешно применяться при создании котлов на биомассе. Это позволяет проектировать энергоэффективные котлы, обеспечивающие стабильное горение топлива с низкой теплотворной способностью, высокой влажностью и зольностью.

Благодарности

Авторы выражают благодарность д-ру техн. наук, сотруднику ОАО «ВТИ» Рябову Георгию Александровичу за профессиональные консультации и ценные замечания, способствовавшие повышению качества представленной работы.

Список литературы

- [1] Рябов Г.А., Литун Д.С., Дик Э.П., Земсков К.А. Перспективы и проблемы использования биомассы и отходов для производства тепла и электроэнергии // Теплоэнергетика, 2006. № 7. С. 61–66.
- [2] Рябов Г.А., Литун Д.С., Пицуха Е.А., Теплицкий Ю.С., Бородуля В.А. Опыт сжигания различных видов биомассы в России и Белоруссии // Электрические станции, 2015. № 9. С. 9–17.
- [3] Рябов Г.А. Использование технологии кипящего слоя для получения электроэнергии, тепла и полезных продуктов с минимальным углеродным следом: доклад на Рос. междунар. энергетическом форуме 2023, Санкт-Петербург, 19.04.2023 г. СПб., 2023. URL: https://nts-ees.ru/assets/doc/p/presentation-p115-2023-04-19_ryabov.pptx (дата обращения 05.03.2026).
- [4] Кох-Татаренко В.С., Кузьмин С.Н., Небышев А.В., Исьемин Р.Л., Михалев А.В., Милованов О.Ю. Окислительная торрефикация в кипящем слое некоторых видов биомассы // Теплоэнергетика, 2022. № 2. С. 23–32.
- [5] Bolhar-Nordenkampf M. Utilization of Biomass residues for Energy production in Pulp and Paper Industry // Conference: 45° Congresso Aticelca, Italy, Stra (Venezia), 2014, v. 1. DOI: 10.13140/2.1.2584.9928
- [6] Денисов В.М., Рябов Г.А. Использование технологии кипящего слоя для утилизации древесных отходов с получением тепла и энергии // Новости теплоснабжения, 2002. № 6 (22). С. 11–13.
- [7] Рябов Г.А., Дик Э.П., Соболева А.Н., Соловьева Т.Е. Особенности процессов сжигания биотоплив в котлах с кипящим слоем // Теплоэнергетика, 2005. № 9. С. 54–60.
- [8] Ковенский В.И. Условия эффективного сжигания твердого топлива в топках кипящего слоя // Теплоэнергетика, 2012. № 8. С. 34–38.
- [9] Рябов Г.А., Литун Д.С. Использование технологии кипящего слоя для эффективного сжигания и газификации биомассы // Возобновляемая энергетика. Пути повышения энергетической эффективности. REE-NFOR-2013: Материалы I Междунар. форума, Москва, 22–23 октября 2013 г. / под ред. О. С. Попеля. М.: Изд-во ОИВТ РАН, 2013. С. 306–309.
- [10] Шайхед О.В. Процессы псевдооживления в топках с низкотемпературным кипящим слоем // Строительство и техногенная безопасность, 2014. № 50. С. 172–177.
- [11] Шарафутдинова Э.Р., Петров О.И., Ситдилов Д.Х., Грибанов А.И. Варианты использования способа сжигания древесных отходов в псевдооживленном слое // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: Материалы Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов, ученых, 6 мая 2015 г. Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ, 2015. 274 с.
- [12] Плешанов К.А., Ионкин И.Л., Росляков П.В., Маслов Р.С., Рагуткин А.В., Кондратьева О.Е. Сжигание кородревесных отходов в котле с кипящим слоем // Теплоэнергетика, 2016. № 11. С. 62–67.
- [13] Кормачев Б.В., Меньяев К.В. Реконструкция парового котла БКЗ-75-3,9ФБ с переводом на технологию НТКС и сжиганием кородревесных отходов // Наука и молодежь: Материалы XVII Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Барнаул, 01–05 июня 2020 г.: в 8 ч. Барнаул: Изд-во Алтайского государственного технического университета имени И.И. Ползунова, 2020. Ч. 4. С. 14–15.
- [14] Смородин С.Н., Белоусов В.Н. Оборудование энерготехнологических ТЭС. СПб.: Изд-во ВШТЭ СПб-ГУПТД, 2021. 123 с.
- [15] Козлов Д.А., Марченко М.В., Клепиков А.С. Сжигание низкосортного топлива в топках с низкотемпературным кипящим слоем // Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова: материалы конф., Белгород, 30 апреля 20 мая 2021 г. Белгород: Изд-во Белгородского государственного технологического университета имени В.Г. Шухова, 2021. С. 4081–4084.
- [16] Ведрученко В.Р., Финиченко А.Ю., Гаак В.К., Глухова М.В. Методика теплового расчета топки с кипящим слоем // Наука, инновации, общество в современных условиях. Пенза: Наука и просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.), 2022. С. 137–148.
- [17] Родионов А.С. Анализ применения технологий сжигания топлива в кипящем слое на котлах БКЗ-75-39 // Молодая мысль: наука, технологии, инновации: Материалы XIV (XX) Всерос. науч.-техн. конф. студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых, Братск, 04–08 апреля 2022 г. Братск: Изд-во Братского государственного университета, 2022. С. 200–203.
- [18] Куртуков В.С., Антупьев С.В., Громова Е.Н. Сжигание коро-древесных отходов ЦБП в топках с низкотемпературным кипящим слоем // Современная целлюлозно-бумажная промышленность. Актуальные задачи и перспективные решения: Материалы V Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых и специалистов ЦБП, Санкт-Петербург, 13–14 ноября 2023 г. СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна, 2023. С. 5–10.
- [19] Ганиев В.В. Анализ работы котлов, сжигающих твердое топливо по технологии псевдооживленного (кипящего) слоя // Инновационный потенциал развития науки в современном мире: достижения и инновации: сб. научных статей по материалам XIII Междун. науч.-практ. конф., Уфа, 12 декабря 2023 г. В 3 ч. Уфа: Изд-во НИЦ Вестник науки, 2023. Ч. 1. С. 45–50.
- [20] Ганиев В.В., Константинов И.С. Моделирование процесса формирования состава топливной смеси для регулирования работы котлов с псевдооживленным (кипящим) слоем // Информационные системы и технологии, 2024. № 6(146). С. 15–23.
- [21] Basu P., Kefa C., Jestin L. Boilers and Burners: Design and Theory. New York: Springer, 2000, v. XIII, 566 p.
- [22] Basu P. Combustion and Gasification in Fluidized Beds. FL: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2006, 496 p.

- [23] Vakkilainen E.K. *Steam Generation from Biomass: Construction and Design of Large Boilers*. Oxford : Butterworth-Heinemann, 2016, 322 p.
- [24] Fedorovichcheva M.F. Modeling of Temperature Regimes in a Furnace of Bubbling Fluidized Bed Boiler // Lappeenranta University of Technology, 2014, 82 p.
- [25] Kase I., Bhochhibhoya S., Paudel L., Parajuli P., Prapajati S., Shrestha P.L. Design and analysis of air distributors and bed materials of fluidized bed boiler // International J. of Fluid Mechanics & Thermal Sciences, 2016, v. 2, no. 4, pp. 22–36.
- [26] Маслеников М.С. Топки с кипящим слоем // Теплоэнергетика. 1958, № 1. С. 77–80.
- [27] Башкова М.Н., Казимиров С.А., Темлянец М.В., Багрянцев В.И., Рыбушкин А.А., Слаженева К.С. Практика и перспективы применения различных способов сжигания твердого топлива в теплоэнергетических установках // Вестник Сибирского государственного индустриального университета, 2014. № 2 (8). С. 24–32.
- [28] Горош В.А., Ведрученко В.Р. О перспективах использования технологии сжигания твердого топлива по технологии «кипящего слоя» в котельных установках // Актуальные вопросы энергетики: материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, Омск, 14–15 мая 2021 г. Омск: Изд-во Омского государственного технического университета, 2021. С. 27–29.
- [29] Тодес О.М., Цитович О.Б. Аппараты с кипящим зернистым слоем. Л.: Химия, 1981. 296 с.
- [30] Баскаков А.П., Лукачевский Б.П., Мухленов И.П., Ойгенблик А.А., Прокопенко А.Н., Рашковская Н.Б., Сажин Б.С., Тодес О.М., Филипповский Н.Ф., Фролов В.Ф., Цитович О.Б. Расчеты аппаратов кипящего слоя: Справочник / под ред. И.П. Мухленова, Б.С. Сажиной, В.Ф. Фролова. Л.: Химия, 1986. 352 с.
- [31] Кубин М. Сжигание твердого топлива в кипящем слое. М.: Энергоатомиздат, 1991. 143 с.
- [32] Баскаков А.П., Мацнев В.В., Распопов И.В. Котлы и топки с кипящим слоем. М.: Энергоатомиздат, 1995. 349 с.
- [33] Семенов С.А. Модельные исследования гидродинамики аппаратов с кипящим слоем // Системы. Методы. Технологии, 2009. № 2 (2). С. 82–86.
- [34] Литун Д.С. Разработка метода теплового расчета топок котлов с кипящим слоем для сжигания биомассы на ТЭС: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.14. Москва, ОАО «ВТИ», 2017. 199 с.
- [35] Ганиев В.В., Константинов И.С. Анализ конструкций воздухораспределительных решеток котлов с псевдоожиженным (кипящим) слоем // Университетская наука, 2024. № 1(17). С. 26–28.
- [36] Федотова К.С. Модель гидродинамики кипящего слоя в топке котла Е-16-21-350 ГДМВ // Вестник науки, 2025. № 6 (87). Т. 2. С. 2395–2402.
- [37] Антонов П.П., Сидоров А.М., Тюркин А.С., Щербakov Ф.В. Уточненный тепловой расчет топок низкотемпературного кипящего слоя // Ползуновский вестник, 2008. № 1–2. С. 115–122.
- [38] Расчет скорости псевдоожижения в печах кипящего слоя // Иннер Инжиниринг, 2025. URL: <https://inner.su/articles/raschet-skorosti-psevdoozhizheniya-v-pechakh-kiipyashchego-sloya/> (дата обращения 26.08.2025).

Сведения об авторах

Ганиев Всеволод Витальевич✉ — вед. конструктор, руководитель группы ООО «Белэнергомаш – БЗЭМ»; аспирант, ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», ganiev_vv@mail.ru

Константинов Игорь Сергеевич — д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова», konstantinovi@mail.ru

Поступила в редакцию 06.11.2025.

Одобрено после рецензирования 16.02.2026.

Принята к публикации 24.02.2026.

ALGORITHM DEVELOPMENT TO DETERMINE HYDRODYNAMIC PARAMETERS OF FLUIDIZED BED IN POWER BOILERS

V.V. Ganiyev^{1, 2✉}, I.S. Konstantinov³

¹JSK «Belenergomash - BZEM», 165, Volchanskaya st., 308009, Belgorod, Russia

²Belgorod State National Research University, 85, Pobedy st., 308015, Belgorod, Russia

³Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 46, Kostyukova st., 308012, Belgorod, Russia

ganiyev_vv@mail.ru

The article proposes an approach to constructing a mathematical model for calculation and, based on it, an algorithm for determining the hydrodynamic parameters of a fluidized (boiling) bed for designing fluidized-bed (FB) boilers for biomass combustion, which are currently widely used. The relevance of the work stems from the need for accurate calculation of the operating gas (air) velocity in the bed and the space above the bed. A mathematical model of the hydrodynamic characteristics of FB boilers has been developed; based on this model, a computational algorithm has been constructed and a relationship for calculating the operating fluidization velocity has been obtained. The algorithm makes it possible to determine key parameters: the critical velocity at the onset of fluidization, the fluidization number, the pressure drop across the bed, the bed height. The practical significance lies in the possibility of optimizing the design of the fluidized-bed grate and improving the combustion efficiency of low-calorific fuels.

Keywords: mathematical model, fluidizing velocity, fluidized bed, boiling bed, hydrodynamics, biofuel, boiler

Suggested citation: Ganiyev V.V., Konstantinov I.S. *Postroyeniye algoritma opredeleniya gidrodinamicheskikh parametrov psevdoozhizhennogo sloya v energeticheskikh kotlakh* [Algorithm development to determine hydrodynamic parameters of fluidized bed in power boilers]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2026, vol. 30, no. 5, pp. 118–131. DOI: 10.17816/2542-1468-2026-5-118-131

References

- [1] Ryabov G.A., Litun D.S., Dik E.P., Zemskov K.A. *Perspektivy i problemy ispol'zovaniya biomassy i otkhodov dlya proizvodstva tepla i elektroenergii* [Prospects and challenges of using biomass and waste for heat and electricity production]. *Teploenergetika* [Thermal Engineering], 2006, no. 7, pp. 61–66.
- [2] Ryabov G.A., Litun D.S., Pitsukha Ye.A., Teplitskiy Yu.S., Borodulya V.A. *Opyt szhiganiya razlichnykh vidov biomassy v Rossii i Belorussii* [Experience in burning various types of biomass in Russia and Belarus]. *Elektricheskiye stantsii* [Electric Power Stations], 2015, no. 9, pp. 9–17.
- [3] Ryabov G.A. *Ispol'zovaniye tekhnologii kipyashchego sloya dlya polucheniya elektroenergii, tepla i poleznykh produktov s minimal'nym uglerodnym sledom* [Application of fluidized bed technology for generating electricity, heat and valuable products with a minimal carbon footprint]. *Doklad na Rossiyskom mezhdunarodnom energeticheskome forume 2023* [Presentation at the Russian International Energy Forum 2023], Sankt-Peterburg, 19.04.2023 g. Sankt-Peterburg, 2023. Available at: https://nts-ees.ru/assets/doc/p/presentation-p115-2023-04-19_ryabov.pptx (accessed 05.03.2026).
- [4] Kokh-Tatarenko V.S., Kuz'min S.N., Nebyvayev A.V., Is'yemin R.L., Mikhalev A.V., Milovanov O.Yu. *Okislitel'naya torrefikatsiya v kipyashchem sloye nekotorykh vidov biomassy* [Oxidative torrefaction of certain types of biomass in a fluidized bed]. *Teploenergetika* [Thermal Engineering], 2022, no. 2, pp. 23–32.
- [5] Bolhar-Nordenkamp M. Utilization of Biomass residues for Energy production in Pulp and Paper Industry // Conference: 45° Congresso Aticelca, Italy, Stra (Venezia), 2014, v. 1. DOI: 10.13140/2.1.2584.9928
- [6] Denisov V.M., Ryabov G.A. *Ispol'zovaniye tekhnologii kipyashchego sloya dlya utilizatsii drevesnykh otkhodov s polucheniyem tepla i energii* [Application of fluidized bed technology for wood waste disposal with heat and energy recovery]. *Novosti teplosnabzheniya* [News of Heat Supply], 2002, no. 6 (22), pp. 11–13.
- [7] Ryabov G.A., Dik E.P., Soboleva A.N., Solov'yeva T.Ye. *Osobennosti protsessov szhiganiya biotopliv v kotlakh s kipyashchim sloyem* [Features of biofuel combustion processes in fluidized bed boilers]. *Teploenergetika* [Thermal Engineering], 2005, no. 9, pp. 54–60.
- [8] Kovenskiy V.I. *Usloviya effektivnogo szhiganiya tverdogo topliva v topkakh kipyashchego sloya* [Conditions for efficient combustion of solid fuel in fluidized bed furnaces]. *Teploenergetika* [Thermal Engineering], 2012, no. 8, pp. 34–38.
- [9] Ryabov G.A., Litun D.S. *Ispol'zovaniye tekhnologii kipyashchego sloya dlya effektivnogo szhiganiya i gazifikatsii biomassy* [Application of fluidized bed technology for efficient combustion and gasification of biomass]. *Materialy Pervogo mezhdunarodnogo foruma «Vozobnovlyayemaya energetika. Puti povysheniya energeticheskoy effektivnosti. REE-NFOR-2013»* [Proceedings of the First International Forum «Renewable Energy. Ways to Improve Energy Efficiency. REE-NFOR-2013»] Moscow, 22–23 October 2013. Ed. O. S. Popelya. Moscow: OIVT RAN, 2013, pp. 306–309.

- [10] Shaykhed O.V. *Protsessy psevdoozhizheniya v topkakh s nizkotemperaturnym kipyashchim sloyem* [Fluidization processes in low-temperature fluidized bed furnaces]. Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost' [Construction and Industrial Safety], 2014, no. 50, pp. 172–177.
- [11] Sharafutdinova E.R., Petrov O.I., Sitdikov D.Kh., Gribanov A.I. *Varianty ispol'zovaniya sposoba szhiganiya drevesnykh otkhodov v psevdoozhizhennom sloye* [Options for using the method of wood waste combustion in a fluidized bed]. Energo i resursosberezheniye v teploenergetike i sotsial'noy sfere : materialy Mezhdunarodnoy nauchno tekhnicheskoy konferentsii studentov, aspirantov, uchenykh [Energy and Resource Conservation in Heat Power Engineering and the Social Sphere: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference for Students, Postgraduates, and Researchers], 2015, t. 3, no. 1, pp. 255–257.
- [12] Pleshanov K.A., Ionkin I.L., Roslyakov P.V., Maslov R.S., Ragutkin A.V., Kondrat'yeva O.Ye. *Szhiganiye korodrevesnykh otkhodov v kotle s kipyashchim sloyem* [Combustion of bark and wood waste in a fluidized bed boiler]. Teploenergetika [Thermal Engineering], 2016, no. 11, pp. 62–67.
- [13] Kormachev B.V., Menyayev K.V. *Rekonstruktsiya parovogo kotla BKZ-75-3,9FB s perevodom na tekhnologiyu NTKS i szhiganiyem korodrevesnykh otkhodov* [Reconstruction of the BKZ-75-3.9FB steam boiler with conversion to LTFB technology and combustion of bark and wood waste]. Nauka i molodezh' : materialy XVII Vserossiyskoy nauchno tekhnicheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh [Science and Youth: Proceedings of the XVII All-Russian Scientific and Technical Conference for Students, Postgraduates and Young Scientists], Barnaul, 01–05 June 2020. Barnaul: Altayskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet im. I.I. Polzunova, 2020, part 4, pp. 14–15.
- [14] Smorodin S.N., Belousov V.N. *Oborudovaniye energotekhnologicheskikh TES* [Equipment for energy-technological thermal power plants: textbook]. St. Petersburg: VShTE SPbGUPTD, 2021, 123 p.
- [15] Kozlov D.A., Marchenko M.V., Klepikov A.S. *Szhiganiye nizkosortnogo topliva v topkakh s nizkotemperaturnym kipyashchim sloyem* [Combustion of low-grade fuel in low-temperature fluidized bed furnaces]. Mezhdunarodnaya nauchno tekhnicheskaya konferentsiya molodykh uchenykh BGTU im. V.G. Shukhova: materialy konferentsii [International Scientific and Technical Conference of Young Scientists at Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov: Conference Proceedings], Belgorod, 30 aprelya 20 May 2021. Belgorod: Belgorodskiy gosudarstvennyy tekhnologicheskii universitet im. V. G. Shukhova, 2021, pp. 4081–4084.
- [16] Vedruchenko V.R., Finichenko A.Yu., Gaak V.K., Glukhova M.V. *Metodika teplovogo rascheta topki s kipyashchim sloyem* [Methodology for thermal calculation of a fluidized bed furnace]. Nauka, innovatsii, obshchestvo v sovremennykh usloviyakh [Science, Innovation, and Society in Modern Conditions]. Penza: Nauka i Prosveshcheniye (IP Gulyayev G. Yu.), 2022, pp. 137–148.
- [17] Rodionov A.S. *Analiz primeneniya tekhnologii szhiganiya topliva v kipyashchem sloye na kotlakh BKZ-75-39* [Analysis of the application of fluidized bed combustion technologies in BKZ-75-39 boilers]. Molodaya mysl': nauka, tekhnologii, innovatsii: materialy XIV (XX) Vserossiyskoy nauchno tekhnicheskoy konferentsii studentov, magistrantov, aspirantov i molodykh uchenykh [Young Thought: Science, Technologies, Innovations: Proceedings of the XIV (XX) All-Russian Scientific and Technical Conference for Students, Master's Students, Postgraduates and Young Scientists], Bratsk, 04–08 April 2022. Bratsk: Bratskiy gosudarstvennyy universitet, 2022, pp. 200–203.
- [18] Kurtukov V.S., Antuf'yev S.V., Gromova Ye.N. *Szhiganiye koro drevesnykh otkhodov TsBP v topkakh s nizkotemperaturnym kipyashchim sloyem* [Combustion of bark and wood waste from pulp and paper industry in low-temperature fluidized bed furnaces]. Sovremennaya tsellyulozno bumazhnaya promyshlennost'. Aktual'nyye zadachi i perspektivnyye resheniya: materialy V Mezhdunarodnoy nauchno tekhnicheskoy konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistov TsBP [Modern Pulp and Paper Industry. Urgent Tasks and Promising Solutions: Proceedings of the V International Scientific and Technical Conference of Young Scientists and Specialists of the Pulp and Paper Industry], Sankt Peterburg, 13–14 noyabrya 2023 g. Sankt Peterburg: Sankt Peterburgskiy gosudarstvennyy universitet promyshlennykh tekhnologii i dizayna, 2023, pp. 5–10.
- [19] Ganiyev V.V. *Analiz raboty kotlov, szhigayushchikh tverdoye toplivo po tekhnologii psevdoozhizhennogo (kipyashchego) sloya* [Analysis of the operation of boilers burning solid fuel using fluidized (fluidized) bed technology]. Sbornik nauchnykh statey po materialam XIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Innovatsionnyy potentsial razvitiya nauki v sovremennom mire: dostizheniya i innovatsii» [Collection of Scientific Articles Based on the Materials of the XIII International Scientific and Practical Conference «Innovation Potential of Development in the Modern World: Achievements and Innovations»], Ufa, 12 Desember 2023. In 3 p. Part 1. Ufa: Izd. NITs Vestnik nauki, 2023, pp. 45–50.
- [20] Ganiyev V.V., Konstantinov I.S. *Modelirovaniye protsessa formirovaniya sostava toplivnoy smesi dlya regulirovaniya raboty kotlov s psevdoozhizhennym (kipyashchim) sloyem* [Modeling the process of fuel mixture composition formation for controlling the operation of fluidized bed boilers]. Informatsionnyye sistemy i tekhnologii [Information Systems and Technologies], 2024, no. 6(146), pp. 15–23.
- [21] Basu P., Kefa C., Jestin L. *Boilers and Burners: Design and Theory*. New York: Springer, 2000, v. XIII, 566 p.
- [22] Basu P. *Combustion and Gasification in Fluidized Beds*. FL: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2006, 496 p.
- [23] Vakkilainen E.K. *Steam Generation from Biomass: Construction and Design of Large Boilers*. Oxford : Butterworth-Heinemann, 2016, 322 p.
- [24] Fedorovicheva M.F. *Modeling of Temperature Regimes in a Furnace of Bubbling Fluidized Bed Boiler*. Lappeenranta University of Technology, 2014, 82 p.
- [25] Kase I., Bhochhibhoya S., Paudel L., Parajuli P., Prajapati S., Shrestha P.L. *Design and analysis of air distributors and bed materials of fluidized bed boiler*. International J. of Fluid Mechanics & Thermal Sciences, 2016, v. 2, no. 4, pp. 22–36.
- [26] Maslenikov M.S. *Topki s kipyashchim sloyem* [Fluidized bed furnaces]. Teploenergetika [Thermal Engineering], 1958, no. 1, pp. 77–80.

- [27] Bashkova M.N., Kazimirov S.A., Temlyantsev M.V., Bagryantsev V.I., Rybushkin A.A., Slazhneva K.S. *Praktika i perspektivy primeneniya razlichnykh sposobov szhiganiya tverdogo topliva v teploenergeticheskikh ustanovkakh* [Practice and prospects of applying various methods of solid fuel combustion in thermal power installations]. Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo industrial'nogo universiteta [Bulletin of the Siberian State Industrial University], 2014, no. 2 (8), pp. 24–32.
- [28] Gorosh V.A., Vedruchenko V.R. *O perspektivakh ispol'zovaniya tekhnologii szhiganiya tverdogo topliva po tekhnologii «kipyashchego sloya» v kotel'nykh ustanovkakh* [On the prospects of using fluidized bed combustion technology for solid fuel in boiler plants]. Aktual'nyye voprosy energetiki: materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem [Current Issues in Energy: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation], Omsk, 14–15 May 2021. Omsk: Omskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet, 2021, pp. 27–29.
- [29] Todes O.M., Tsitovich O.B. *Apparaty s kipyashchim zernistym sloyem* [Apparatuses with fluidized granular bed]. Leningrad: Khimiya, 1981, 296 p.
- [30] Baskakov A.P., Lukachevskiy B.P., Mukhlenov I.P., Oygenblik A.A., Prokopenko A.N., Rashkovskaya N.B., Sazhin B.S., Todes O.M., Filippovskiy N.F., Frolov V.F., Tsitovich O.B. *Raschety apparatov kipyashchego sloya: Spravochnik* [Calculations for fluidized bed apparatuses: Handbook]. Ed. I.P. Mukhlenov, B.S. Sazhin, V.F. Frolov. Leningrad: Khimiya, 1986, 352 p.
- [31] Kubin M. *Szhiganiye tverdogo topliva v kipyashchem sloye* [Combustion of solid fuel in fluidized bed]. Moscow: Energoatomizdat, 1991, 143 p.
- [32] Baskakov A.P., Matsnev V.V., Raspopov I.V. *Kotly i topki s kipyashchim sloyem* [Boilers and furnaces with fluidized bed]. Moscow: Energoatomizdat, 1995, 349 p.
- [33] Semenov S.A. *Model'nyye issledovaniya gidrodinamiki apparatov s kipyashchim sloyem* [Model studies of hydrodynamics in fluidized bed apparatuses]. Sistemy. Metody. Tekhnologii [Systems. Methods. Technologies], 2009, no. 2 (2), pp. 82–86.
- [34] Litun D.S. *Razrabotka metoda teplovogo rascheta topok kotlov s kipyashchim sloyem dlya szhiganiya biomassy na TES* [Development of a method for thermal calculation of fluidized bed boiler furnaces for biomass combustion at thermal power plants]. Dis. Cand. Sci. (Tech.), 05.14.14. Moscow: VTI, 2017, 199 p.
- [35] Ganiyev V.V., Konstantinov I.S. *Analiz konstruktivnykh vozdukhoraspredeletel'nykh reshetok kotlov s psevdoozhizhennym (kipyashchim) sloyem* [Analysis of designs of air distribution grates for fluidized bed boilers]. Universitetskaya nauka [University Science], 2024, no. 1(17), pp. 26–28.
- [36] Fedotova K.S. *Model' gidrodinamiki kipyashchego sloya v topke kotla E-16-21-350 GDMV* [Model of fluidized bed hydrodynamics in the furnace of the E-16-21-350 GDMW boiler]. Vestnik nauki [Bulletin of Science], 2025, no. 6 (87), t. 2, pp. 2395–2402.
- [37] Antonov P.P., Sidorov A.M., Tyurkin A.S., Shcherbakov F.V. *Utochnennyy teplovoy raschet topok nizkotemperaturnogo kipyashchego sloya* [Refined thermal calculation of low-temperature fluidized bed furnaces]. Polzunovskiy vestnik [Polzunov Bulletin], 2008, no. 1–2, pp. 115–122.
- [38] *Raschet skorosti psevdoozhizheniya v pechakh kipyashchego sloya* [Calculation of fluidization velocity in fluidized bed furnaces]. Inner Inzhiniring [Inner Engineering], 2025. Available at: <https://inner.su/articles/raschet-skorosti-psevdoozhizheniya-v-pechakh-kipyashchego-sloya/> (accessed 26.08.2025).

Acknowledgments

The authors express their gratitude to Georgy Alexandrovich Ryabov, Dr. Sci. (Tech.) and employee of JSC «VTI», for his professional advice and valuable comments, which helped to improve the quality of the presented work.

Authors' information

Ganiev Vsevolod Vital'evich✉ — Lead design engineer JSK «Belenergomash – BZEM»; pg. of the Belgorod State National Research University, ganiev_vv@mail.ru

Konstantinov Igor' Sergeevich — Dr. Sci. (Tech.), Professor of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, konstantinovi@mail.ru

Received 06.11.2025.

Approved after review 16.02.2026.

Accepted for publication 24.02.2026.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article
The authors declare that there is no conflict of interest