

ПАРОВЫЕ КОТЛЫ, ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ТОПЛИВО, ГОРЕЛОЧНЫЕ УСТРОЙСТВА И ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ КОТЛОВ

ОСОБЕННОСТИ ПЕРВИЧНОЙ ФРАГМЕНТАЦИИ ДРЕВЕСНОЙ БИОМАССЫ В ПРОЦЕССЕ БЫСТРОГО НАГРЕВА И ВЫХОДА ЛЕТУЧИХ¹

© 2022 г. Д. С. Литун^а, *, Г. А. Рябов^а, Е. А. Шорина^а

^аВсероссийский теплотехнический институт, Автозаводская ул., д. 14, Москва, 115280 Россия

*e-mail: litoun@gmail.com

Поступила в редакцию 01.11.2021 г.

После доработки 26.11.2021 г.

Принята к публикации 22.12.2021 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований первичной фрагментации древесных частиц квадратного сечения при быстром нагреве и выходе летучих. Дано описание экспериментального оборудования и методики исследований. Показано, что вероятность и интенсивность первичной фрагментации древесных частиц возрастают с увеличением их начального размера, температуры процесса и соотношения между их продольными и поперечными размерами. Результаты экспериментальных исследований свидетельствуют об определяющей роли в первичной фрагментации древесных частиц напряжений, вызываемых давлением летучих и усадкой древесины в процессе термического разложения. На основе исследования микроструктуры коксовых фрагментов, образующихся в процессе первичной фрагментации, сделаны предположения о механизме растрескивания и влиянии на него строения и формы древесных частиц. Применительно к древесной биомассе предложено в качестве показателя сопротивления выходу летучих использовать отношение выхода их к удельному объему древесины. При обработке экспериментальных данных показано, что меньшие значения удельного объема и соответственно большее сопротивление выходу летучих способствуют первичной фрагментации. На основе анализа полученных данных сформулированы основные направления дальнейших исследований первичной фрагментации древесных частиц при сжигании и газификации в кипящем и плотном слоях.

Ключевые слова: биомасса, кипящий слой, древесные частицы, первичная фрагментация, коксовый остаток, микроструктура, газификация, пиролиз, тепловыделение, ожигание, выход летучих

DOI: 10.1134/S0040363622070037

Возрастание роли в мировой электро- и теплоэнергетике возобновляемых источников энергии, в частности биотоплива, в последние десятилетия привело к развитию технологий термической переработки биомассы. На ТЭС и в крупных котельных эксплуатируются энергетические котлы большой и средней мощности с кипящим и циркулирующим кипящим слоями [1]. В России наибольшее распространение получили паровые котлы с кипящим слоем на древесных отходах [1, 2]. Для этой технологии характерно использование топливных частиц, имеющих довольно большие размеры по сравнению с пылеугольным топливом. При попадании таких частиц в слой происходит фрагментация из-за напряжений, возникающих вследствие быстрого нагрева и выделения летучих веществ (далее летучих) на стадиях пиролиза (первичная фрагментация) и горения коксового остатка при удельном объеме его пор более 80%

(вторичная фрагментация) [3]. При этом крупные частицы распадаются и происходит ожигание и горение мелких частиц, имеющих распределение по размерам, существенно отличающееся от исходного. Наиболее существенный вклад в измельчение топливных частиц высокорекреационных топлив вносит первичная фрагментация, вызывающая увеличение уноса горючих из слоя. Это влияет на распределение тепловыделения по высоте топочного устройства и потери тепла при механической неполноте сгорания в топке. О необходимости учета влияния фрагментации на унос горючих при математическом моделировании и потерь тепла при тепловом расчете топочных устройств с кипящим слоем на биомассе указано в работах [3, 4].

Основные факторы, влияющие на первичную фрагментацию угольных частиц при сжигании в кипящем слое (температура, размер частиц, выход летучих и пористость), были определены в [5–12]. Чем выше температура, больше размер частиц и выход летучих и меньше пористость, тем

¹ Исследования выполнены на базе Центра коллективного пользования научным оборудованием “Центр исследования материалов тепловой энергетики нового поколения”.

интенсивнее первичная фрагментация. В ряде исследований предпринимались попытки определить значение критического диаметра частиц, ниже которого фрагментация отсутствует [6–9, 12]. В [6] была установлена связь между критическим диаметром частиц и коэффициентом сопротивления пор, представляющим собой отношение выхода летучих к равновесной влаге топлива.

При разработке метода расчета уноса золы и потерь тепла с механическим недожогом в кипящем слое при сжигании древесной биомассы была предпринята попытка учесть первичную фрагментацию частиц на основе данных, полученных в ходе промышленных исследований котла с кипящим слоем на кородеревесных отходах КМ-75-40М на ТЭС-3 Архангельского целлюлозно-бумажного комбината [4]. Однако, чтобы появилась возможность применять эту методику при расчете котлов, для которых характеристики топлива и режимные условия работы существенно отличаются от исследованных, требуется провести ее модификацию с привлечением дополнительных опытных данных.

В обзоре [13] показано, что исследования первичной фрагментации чаще всего фокусируются на изучении изменений в распределении частиц по размерам в процессе термической обработки в кипящем слое. Опубликованные данные такого рода в большинстве случаев представляют собой результаты лабораторных исследований углей различных сортов. За редким исключением [12, 14], практически во всех работах на экспериментальных установках с кипящим слоем фрагментацию частиц топлива исследовали в условиях интенсивного массообмена в кипящем слое [13]. На подобных лабораторных установках моделируются реальные условия сжигания в кипящем слое. Вместе с тем особенность таких исследований заключается в том, что получаемые данные не являются результатом собственно процесса нагрева частиц и выхода летучих, поскольку на них накладывается влияние массообмена и истирания. Массообмен, в свою очередь, сильно зависит от гидродинамических условий работы кипящего слоя, которые могут заметно различаться в разных установках.

Исследования процесса горения высокорреакционных топлив в кипящем слое также показали, что на начальной стадии вокруг частицы образуется газовый пузырь из летучих веществ, выходящих из нее, и продуктов их сгорания [15–17].

Несмотря на высокую реакционную способность коксового остатка, для топлив с большим выходом летучих при температуре в камере сгорания более 700°C их длительное горение приводит к задержке воспламенения коксовой частицы вследствие того, что горящие летучие препятствуют доступу кислорода к ее поверхности. Воспламенение коксового остатка начинается после завершения горения летучих, т.е. процесс горения

крупных частиц высокорреакционного топлива в кипящем слое носит двухстадийный характер [18–20]. Поэтому первичная фрагментация биотоплив в кипящем слое при температурах, характерных для сжигания, происходит в инертной среде летучих и продуктов их сгорания, окружающих частицу.

Таким образом, экспериментальные исследования влияния температуры, размера, формы и структуры частиц на процесс первичной фрагментации в инертной среде в отсутствие массообмена представляют собой актуальную задачу создания фундаментальных основ методов расчета топочных устройств и газификаторов, работающих на биотопливе. Первоочередными, по мнению авторов, представляются экспериментальные работы, посвященные изучению механизма процесса фрагментации и формирования представлений о его физической картине. С одной стороны, такие исследования проведены и в значительной мере обобщены для угольных топлив и практически отсутствуют в виде научных публикаций для древесных частиц [13]. С другой стороны, механизм растрескивания древесных и угольных частиц может кардинально различаться из-за принципиальных отличий в их микроструктуре.

Понимание особенностей процесса растрескивания древесных частиц, основных факторов, которые влияют на его характер, должно предшествовать поиску эмпирических зависимостей, описывающих первичную фрагментацию. В России впервые такие исследования применительно к частицам древесной биомассы хвойных пород были выполнены в ОАО ВТИ. Первые результаты экспериментов по изучению первичной фрагментации древесных частиц хвойных пород были опубликованы в [21]. В настоящей работе они дополнены данными о влиянии на фрагментацию формы частиц, микроструктуры и удельного объема древесины.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Эксперименты проводили с использованием лабораторной трубчатой печи SNOL с рабочей камерой диаметром 35 мм, оснащенной системой подвода инертного газа и контроля его расхода, и электронного сканирующего микроскопа Vega3LMN. Схема лабораторной установки и используемое лабораторное оборудование представлены в [21]. Исследуемые частицы с помощью специального захвата быстро вводили в предварительно нагретую до температуры процесса печь через отверстие со стороны выхода инертного газа и помещали их в находящийся в центре камеры лоток. Конструкция лотков, изготовленных из жаростойкой трехслойной металлической сетки с ячейками каждого слоя разме-

ром 100×100 мкм, позволяла обеспечить хорошее омывание частиц инертным газом и свободный выход летучих, а также не допустить провал образующихся мелких фрагментов.

После завершения выхода летучих из частицы печь охлаждали до комнатной температуры, лоток извлекали из печи, фотографировали и подсчитывали образовавшиеся коксовые частицы и их фрагменты (массой более 0.001 г), взвешивали крупные фрагменты и мелочь на электронных весах с точностью до 0.0001 г, определяли плотность и эквивалентный диаметр крупных фрагментов, исследовали коксовые частицы и фрагменты с помощью электронного микроскопа. В течение всего процесса с начала разогрева печи до извлечения лотка в нее подавался инертный газ (азот высокой чистоты) расходом 0.3–0.5 дм³/мин для предотвращения взаимодействия частиц с кислородом воздуха.

Для определения плотности частиц (фрагментов) им при механической обработке придавали призматическую форму, после чего производили их повторное взвешивание и рассчитывали объем по трем характерным размерам. Плотность ρ_p , г/мм³, и эквивалентный диаметр коксовой частицы (фрагмента) d_{vp} , мм, вычисляли по формулам

$$\rho_p = \frac{\dot{m}_p}{\dot{V}_p}; \quad d_{vp} = \sqrt[3]{\frac{6m_p}{\pi\rho_p}}$$

где m_p – масса необработанной коксовой частицы, г; \dot{m}_p , \dot{V}_p – масса, г, и объем, мм³, обработанной частицы.

Исследовали древесные квазикруглые (куб) и продолговатые (квадратного сечения) частицы ели с соотношением продольного h и поперечного a размеров соответственно $h/a = 1$ и $h/a = 8$ и начальными эквивалентными диаметрами $d_{v0} = 16.9$ – 24.8 мм для квазикруглых частиц и $d_{v0} = 7.3$ – 24.8 мм для продолговатых частиц при температурах процесса 800, 850, 900 и 950°C. Размеры исследованных частиц соответствовали размерам реальных древесных частиц, сжигаемых в промышленных котлах с кипящим слоем на ТЭС. Исходная форма исследованных частиц (параллелепипед) представляет собой абстракцию реальной частицы древесной щепы, имеющей плоские грани и острые ребра, что позволяет исследовать фундаментальные закономерности растрескивания и первичной фрагментации древесных частиц, которые сложно установить, используя реальные продолговатые частицы, обладающие большим разнообразием геометрических форм.

Средние значения и пределы изменения влаги и зольности на рабочую массу, а также выхода летучих на сухую беззольную массу по результатам

Основные характеристики, %, древесных (еловых) частиц

Показатель	Значение	
	среднее	диапазон изменения
Влага W_i^r	7.26	5.27–9.32
Зольность A_i^r	0.45	0.15–0.85
Выход летучих V_i^r	86.57	85.73–86.68

анализа согласно стандартам [22–25] представлены в таблице.

При обработке полученных в процессе экспериментов данных в соответствии с общепринятым подходом под фрагментацией понимали растрескивание частицы, в результате которого подвергшаяся пиролизу исходная частица разделялась минимум на два фрагмента [13]. Влияние температуры, начального размера и формы на первичную фрагментацию крупных древесных частиц оценивали с помощью известных критериев фрагментации: критического диаметра d_{v0}^{cr} , вероятности фрагментации SF , степени фрагментации (коэффициента размножения частиц) N , вариационного фактора исходных частиц F_d и обобщенного индекса фрагментации (индекса измельчения) S_f [6, 10, 11, 26], а также массовой доли мелкой фракции коксовых фрагментов X_f . Критический диаметр частицы d_{v0}^{cr} является самым простым критерием для оценки склонности различных топлив к фрагментации и представляет собой наибольший диаметр частиц топлива, для которого не наблюдается заметной фрагментации [6]. Этот показатель отражает только наличие факта фрагментации, но не дает количественной оценки ее интенсивности.

Используемые для таких оценок критерии SF , N , F_d , S_f и X_f рассчитывали по формулам

$$SF = \frac{n_f}{n_0}; \quad N = \frac{N_{out}}{N_{in}}; \quad F_d = \frac{\bar{d}_{vp}}{d_{v0}};$$

$$S_f = \frac{N}{F_d}; \quad X_f = \frac{m_f}{m_p},$$

где n_f – число исходных древесных частиц одинаковой формы эквивалентным диаметром d_{v0} , подвергшихся фрагментации в повторяющихся опытах с образованием фрагментов массой не менее 0.001 г (эквивалентный диаметр более 3 мм); n_0 – общее число исходных древесных частиц одинаковой формы средним эквивалентным диаметром \bar{d}_{v0} , подвергшихся пиролизу в повторяющихся опытах; N_{out} – общее число частиц, образо-

вавшихся после завершения процесса фрагментации; N_{in} – число исходных частиц; \bar{d}_{vp} – средний эквивалентный диаметр коксовых частиц массой не менее 0.001 г, образовавшихся после завершения процесса из исходных частиц средним эквивалентным диаметром d_{v0} ; m_f – общая масса мелкой фракции коксовых частиц (менее 0.001 г), образовавшихся после завершения процесса из исходных частиц эквивалентным диаметром d_{v0} ; m_p – общая масса коксовых частиц, образовавшихся после завершения процесса из исходных частиц эквивалентным диаметром d_{v0} .

Вероятность фрагментации SF позволяет оценить постоянство фрагментации частицы с учетом фактора случайности, поскольку первичная фрагментация является в значительной степени стохастическим процессом [26]. Степень фрагментации N характеризует изменение количества частиц и дает количественную оценку первичной фрагментации, но не отражает изменения распределения размеров частиц и влияния на него набухания или усадки частиц в процессе выхода летучих [10]. Для характеристики изменения распределения частиц используют вариационный фактор исходных частиц F_d . Индекс S_f является комплексным показателем, учитывающим увеличение числа частиц и уменьшение их размера вследствие фрагментации, а также влияние на размер частиц их набухания (усадки) в процессе выхода летучих [10]. Поскольку меньшее значение F_d и большее значение N соответствуют большему количеству и меньшему размеру частиц после фрагментации, большее значение S_f означает более интенсивную фрагментацию.

При расчете критериев фрагментации учитывали фрагменты массой не менее 0.001 г (эквивалентный диаметр более 3 мм). Фрагменты массой менее 0.001 г учитывали с помощью массовой доли мелочи X_f . Общая массовая доля отслаивавшихся частиц массой менее 0.001 г оказалась незначительной во всех опытах (не более 0.05), поэтому в случае, когда крупные фрагменты оставались скрепленными между собой, образовавшуюся коксовую частицу считали не утратившей целостность, а исходную частицу – не прошедшей фрагментацию.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

Результаты экспериментов представлены в виде зависимостей критериев фрагментации от температуры и начального эквивалентного диаметра частиц. Повышение температуры t процесса в диапазоне 800–950°C и увеличение исходного размера частиц биомассы повышают вероятность и интенсивность их фрагментации при быстром нагреве и выходе летучих. Это касается доли ча-

стиц, подвергшихся фрагментации, и состава образовавшихся коксовых частиц.

Проанализировав рис. 1, 2, можно отметить, что соотношение продольного и поперечного размеров частиц оказывает существенное влияние на процесс фрагментации. Вероятность фрагментации продолговатых частиц при $d_{v0} = 16.9$ мм и более составляет 100% во всем диапазоне температур, в то время как для частиц при $h/a = 1$ даже при $d_{v0} = 24.8$ мм фрагментация не наблюдается при температурах 850°C и ниже, а SF превышает 50% только при температуре более 900°C (см. рис. 1, а). Для частиц при $h/a = 1$ и $d_{v0} = 16.9$ мм фрагментация во всем диапазоне температур от 800 до 950°C отсутствует.

На рис. 2, а видно, что при температуре процесса 950°C вероятность фрагментации продолговатых частиц больше по сравнению с частицами, имеющими форму куба, при одинаковом эквивалентном диаметре. Для продолговатых и кубических частиц при $d_{v0} = 24.8$ мм характерно увеличение S_f с повышением температуры (см. рис. 1, б). При этом как абсолютные значения, так и темп роста S_f с увеличением температуры при одинаковом эквивалентном диаметре для продолговатых частиц больше, чем для кубических.

Как показывают зависимости F_d от температуры (см. рис. 1, в), средний по массе эквивалентный диаметр древесных частиц в результате выхода летучих снижается даже при отсутствии фрагментации (кубические частицы при $d_{v0} = 16.9$ мм во всем диапазоне температур и при $d_{v0} = 24.8$ мм и $t = 850^\circ\text{C}$). При этом температура в рассматриваемом диапазоне не оказывает существенного влияния на степень изменения эквивалентного диаметра кубических частиц. Это свидетельствует о наличии их усадки по эквивалентному диаметру, равной примерно 10% (объемная усадка около 27%), в процессе быстрого нагрева и выхода летучих и об отсутствии значительного влияния температуры в диапазоне 800–950°C на степень усадки. Для продолговатых и кубических частиц, подвергшихся фрагментации, наблюдается в целом снижение F_d по мере возрастания температуры процесса (исключая выпадающее значение для продолговатых частиц при 850°C).

Зависимости степени фрагментации N от температуры и размера частиц по своему виду схожи с зависимостями для S_f . Они демонстрируют более интенсивную фрагментацию продолговатых частиц по сравнению с кубическими – значение N возрастает с увеличением температуры и размера частиц. Для кубических частиц $N = 1$ во всем диапазоне температур при $\bar{d}_{v0} = 16.9$ мм в связи с отсутствием фрагментации. Изменение характеристик фрагментации в зависимости от температуры

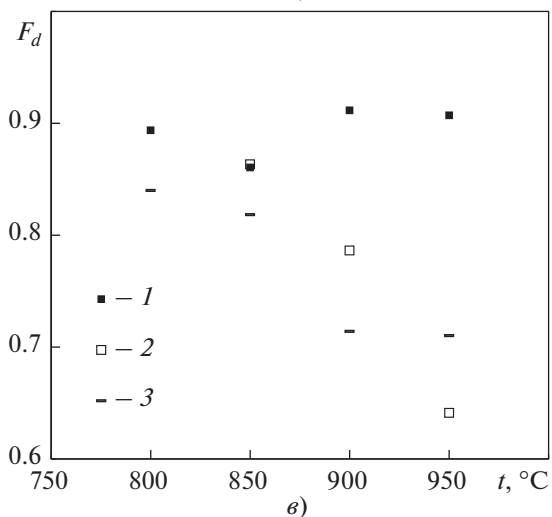
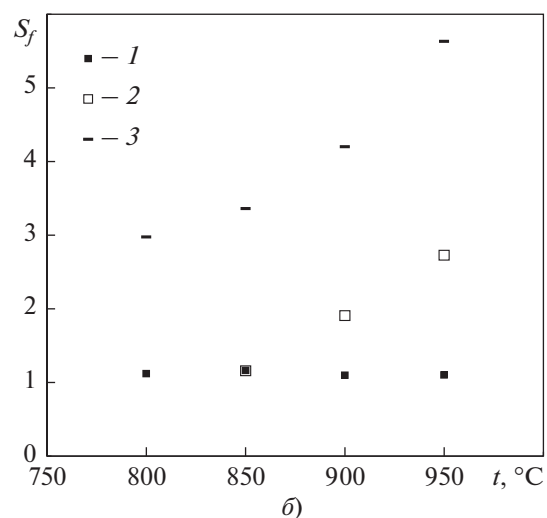
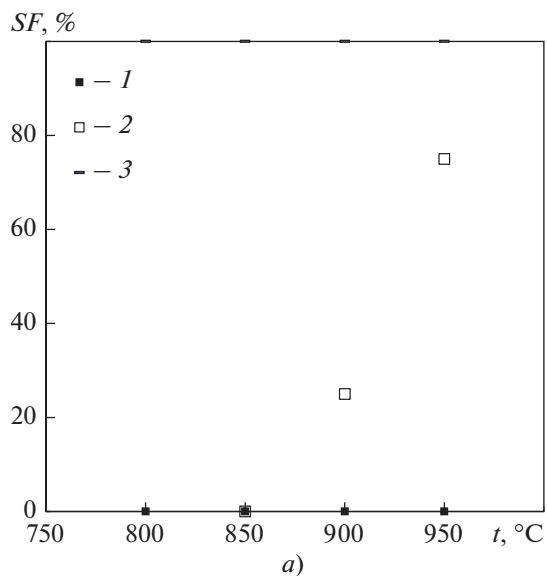


Рис. 1. Зависимость вероятности (а) и индекса (б) фрагментации частиц, вариационного фактора (θ) от температуры.
 h/a : 1, 2 – 1; 3 – 8; d_{v0} , мм: 1 – 16.9; 2, 3 – 24.8

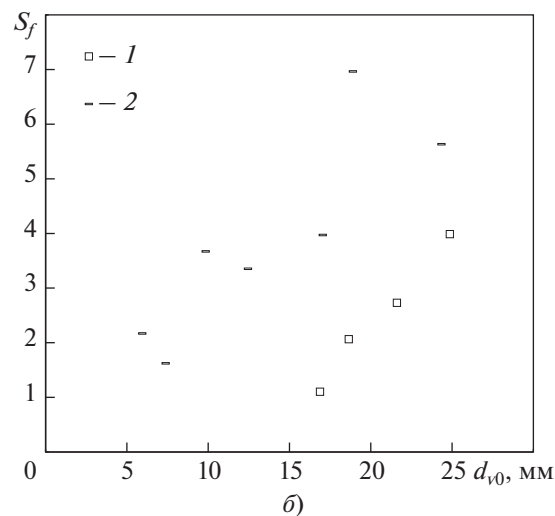
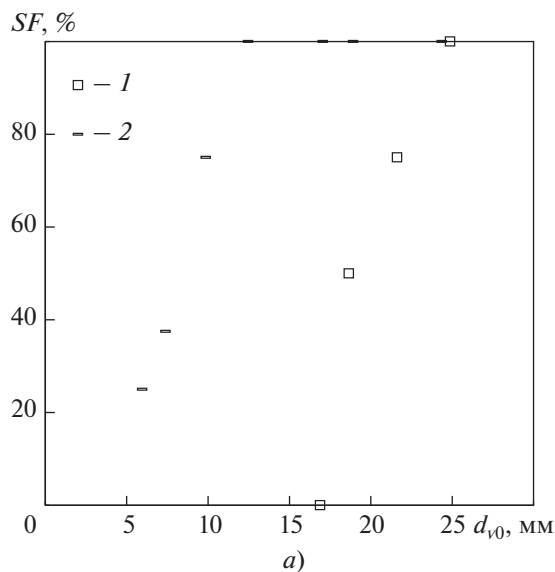


Рис. 2. Зависимость вероятности (а) и индекса (б) фрагментации частиц от их начального эквивалентного диаметра при температуре 950 °C.
 h/a : 1 – 1; 2 – 8

и исходного размера древесных частиц согласуется с существующими данными и представлениями о характере влияния этих факторов на первичную фрагментацию при сжигании углей в кипящем слое [13].

Критический диаметр фрагментации d_{v0}^{cr} при температуре 950 °C можно рассчитать по данным рис. 2, а. Если принять в качестве критического диаметра значение, при котором вероятность фрагментации составляет 50%, то $d_{v0}^{cr} = 18$ –19 мм для частиц при $h/a = 1$ и $d_{v0}^{cr} = 8$ –12 мм при $h/a = 8$. Меньшие значения критических диаметров продолговатых частиц свидетельствуют о большей их первичной фрагментации в сравнении с частица-

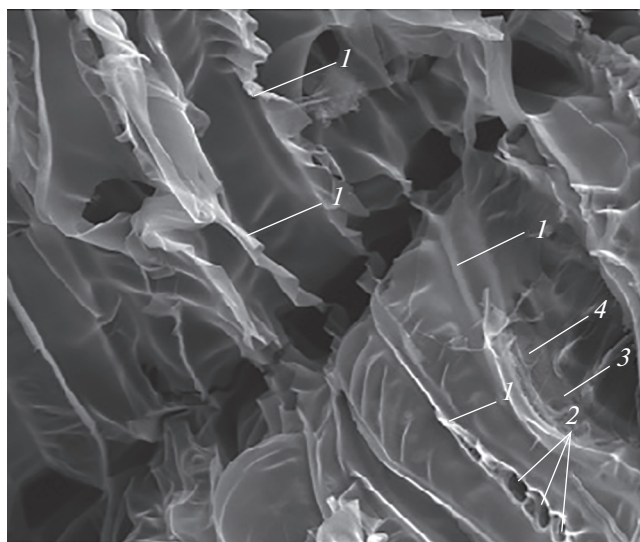


Рис. 3. Трещина на поверхности растрескавшейся коксовой частицы и элементы структуры на срезах, образованных трещиной.
1 – стенки трахеид; 2 – паренхимные клетки; 3 – окаймляющие поры; 4 – мембраны окаймляющих пор



Рис. 4. Растрескавшаяся нефрагментированная коксовая частица

ми кубической (квазикруглой) формы при прочих равных условиях.

Анализ данных сканирования коксовых частиц и фрагментов с помощью электронного микроскопа показал, что коксовые частицы сохраняют строение исходных древесных частиц с присущими древесине хвойных пород структурными элементами: трахеидами, паренхимными клетками, простыми и окаймляющими порами. При этом в материале стенок полых элементов микроструктуры лигноцеллюлоза замещается углеродом. На фотографии среза коксовой частицы, полученной с

помощью электронного микроскопа с большой степенью увеличения, видно, что сохраняются даже такие тонкие элементы строения древесины, как мембраны окаймляющих пор (рис. 3).

При первичной фрагментации в ходе быстрого нагрева и выхода летучих в кубической древесной частице образуются крупные трещины под действием напряжений, возникающих из-за внутреннего давления газов и усадки лигноцеллюлозы в процессе термической деструкции. Формирование трещины происходит путем последовательных продольных разрывов стенок трахеид. Эти трещины зарождаются на поверхности и развиваются в направлении центра частицы по мере ее прогрева. На фотографии растрескавшейся, но нефрагментированной кубической частицы отчетливо видно, что она остается целой благодаря не затронутому растрескиванием ядру в ее центре (рис. 4).

В первую очередь трещины образуются на боковых гранях коксовых частиц и фрагментов (на наружных поверхностях, параллельных продольным осям трахеид – слоям древесных волокон) в местах выхода на поверхность границ между осенним (поздним) и летним (ранним) приростами древесины или годичными слоями (кольцами). На изображении зарождающейся трещины на поверхности частицы после быстрого нагрева и выхода летучих, полученном с помощью электронного микроскопа, видно, что растрескивание первоначально происходит по границам раннего и позднего приростов древесины, различающихся размером поперечного сечения трахеид и толщиной прироста (рис. 5).

На фотографии срезов коксовых фрагментов, образовавшихся из кубической древесной частицы, видно изменение характера кривизны слоев древесных волокон на границах годовых приростов, свидетельствующее о сдвиге на этой границе (рис. 6). Ряды трахеид позднего и раннего приростов изогнуты и направлены в противоположные стороны: ряды раннего прироста выгнуты вдоль годичных колец по направлению к боковым поверхностям, ряды позднего прироста – наоборот, от поверхности. Чем больше длина сегмента границы приростов, ограниченного боковыми гранями в поперечном сечении частицы, тем более заметен взаимный изгиб слоев ранних и поздних трахеид (рис. 7). При этом в средней части осеннего слоя ряды трахеид всегда сохраняют ориентацию перпендикулярно границе годичных приростов. Изменение характера кривизны слоев древесных волокон вблизи границ годичных приростов сопровождается соответствующим искривлением наружной поверхности частиц (см. рис. 7). Расположение границ годичных колец относительно боковых граней частиц оказывает влияние на образование разрывов на их поверх-

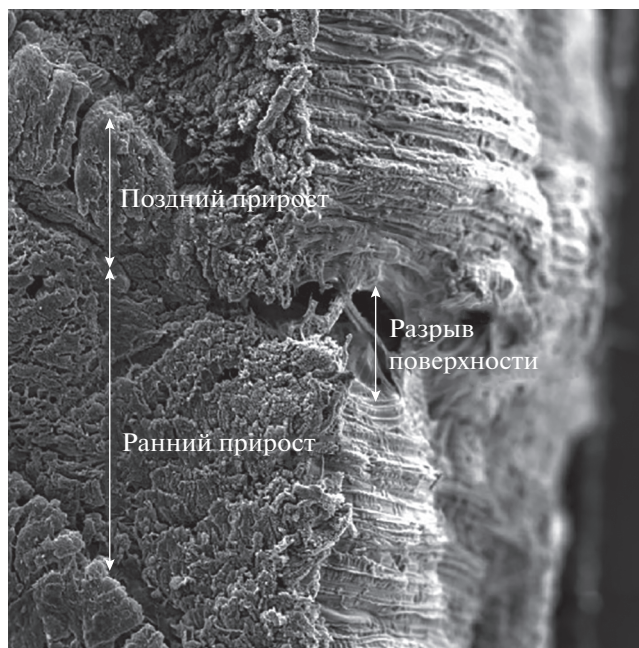
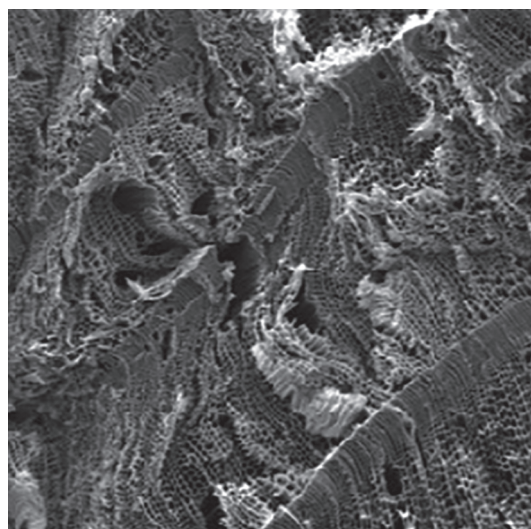


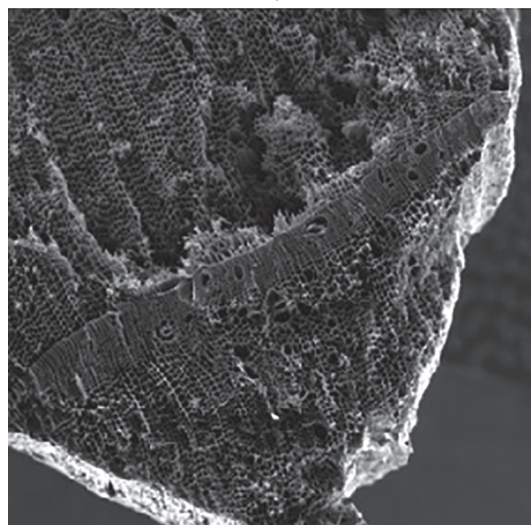
Рис. 5. Растрескивание на границе позднего и раннего приростов

ности. Острый угол между границей приростов со стороны раннего прироста и поверхностью, в отличие от прямого или тупого угла, а также большая длина сегментов границ приростов, ограниченных боковыми гранями, способствуют образованию разрывов (см. рис. 7, 8). Трещины зарождаются в центральных зонах боковых граней частиц и развиваются вдоль волокон в обе стороны по направлению к торцевым граням (границы перпендикулярные осям трахеид) и вовнутрь частиц по границам годовичных слоев.

В кубических частицах трещины на границах приростов являются главным источником образования фрагментов (продольные разломы). Для продолговатых частиц характерны такие же особенности образования продольных трещин, как и для кубических, но основным механизмом первичной фрагментации является образование поперечных трещин. Подавляющее большинство фрагментов из продолговатых частиц образуется при поперечных разломах, перпендикулярных осям трахеид (рис. 9). Продольные трещины имеют максимальную ширину в центре и сужаются при приближении к торцевым граням или поперечным разломам. Боковые поверхности и слои волокон (трахеиды) образовавшихся фрагментов, а также треснувших продолговатых коксовых частиц по обе стороны от трещины выгнуты наружу по отношению к продольным осям трещины и частицы и ориентированы под углом друг к другу вблизи поперечных разломов (см. рис. 9, 10). При этом торцевые грани продолговатых частиц приоб-



a)



б)

Рис. 6. Искривление слоев трахеид между границами годовичных приростов на радиальных срезах. а – сильное искривление при большей длине границ годовичных приростов; б – слабое искривление при меньшей длине границ годовичных приростов

ретают округлую форму из-за ступенчатых смещений к центру частицы внешних слоев трахеид относительно внутренних (см. рис. 10, а, 11, а, 12).

Фотография фрагментов продолговатых частиц, образовавшихся в результате растрескивания продольных срезов, демонстрирует также локальное “раздвижение” волокон внутри частиц с образованием свободных полостей, сопровождающееся продольными и поперечными разрывами трахеид (см. рис. 11). Незначительное выгибание волокон обнаруживается и в кубических коксовых частицах, вследствие чего их форма становится немного округлой, “бочонкообразной” с

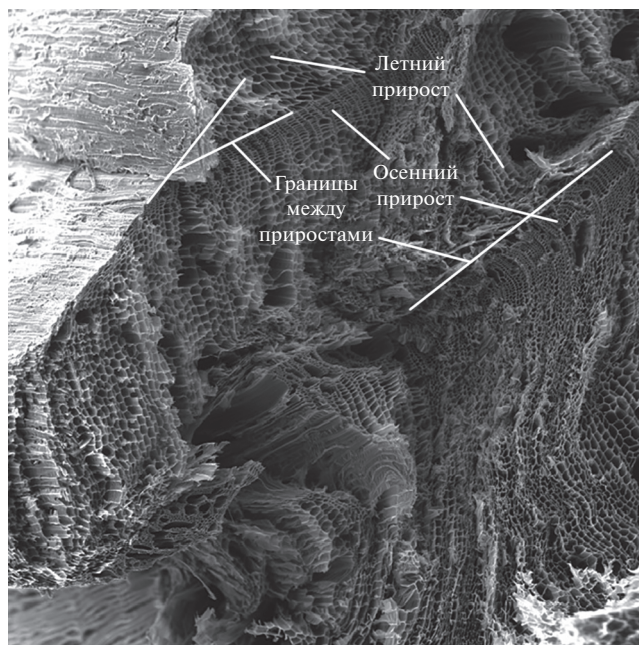
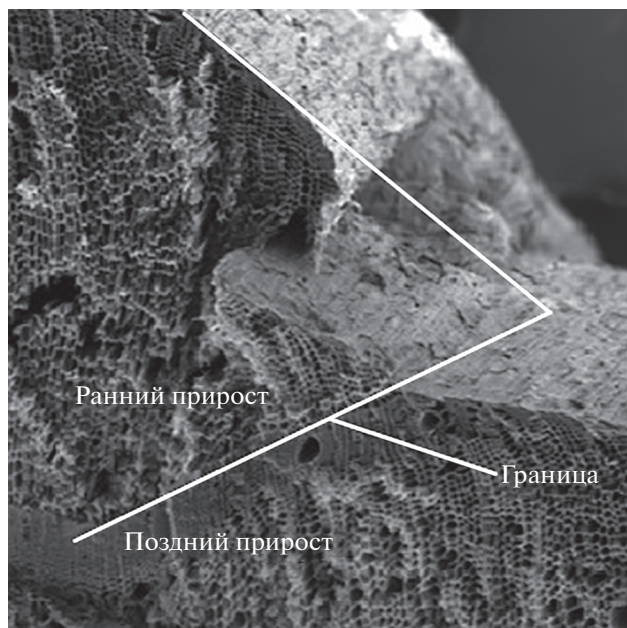


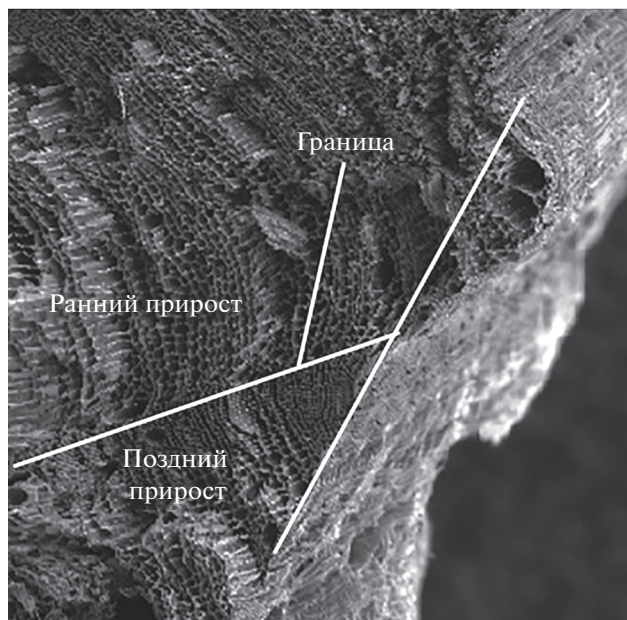
Рис. 7. Микроструктура коксовой частицы (поперечный разрез) и сдвиги на границах осеннего и летнего приростов

сохранением плоских торцевых поверхностей и отсутствием поперечных разломов.

Физическая картина растрескивания древесных частиц не вполне ясна, однако анализ результатов сканирования коксовых частиц и фрагментов позволяет сделать некоторые предположения относительно влияния на нее микроструктуры древесины и формы (геометрических характеристик) частиц. В частности, большую склонность продолговатых частиц к фрагментации по сравнению с кубическими такого же объема при одинаковых температуре и начальном эквивалентном диаметре можно объяснить сочетанием продольно ориентированной трубчатой структуры древесины и большего отношения площади поверхности к объему. Во время быстрого нагрева и выхода летучих происходит резкое повышение давления внутри частицы. При этом вытянутые вдоль боковых поверхностей частицы полые клетки древесины (трахеиды) служат каналами для транспорта водяных паров и газов из частицы в окружающую среду под действием внутреннего давления, играя ту же роль, что и поры при выходе летучих в угольных частицах. Чем больше соотношение продольного и поперечного размеров частицы при одинаковых массах и объемах, тем меньше общее сечение для выхода газов через торцевые поверхности и больше протяженность каналов для транспорта газов из центра частицы. Как следствие, продолговатые частицы не только быстрее прогреваются с более интенсивным выхо-



a)



б)

Рис. 8. Искривление поверхности частицы на границах осеннего и летнего приростов на радиальных срезах. *a* – излом и разрыв на поверхности по границе годичных слоев, расположенной под острым углом к наружной поверхности частицы со стороны раннего прироста; *б* – искривление поверхности по границе годичных слоев, расположенной под тупым углом к поверхности со стороны раннего прироста

дом летучих, но и имеют большее гидравлическое сопротивление выходу их из частицы по сравнению с кубическими, что приводит к развитию более высокого давления газов внутри частицы. Растрескивание частиц происходит под действием на-

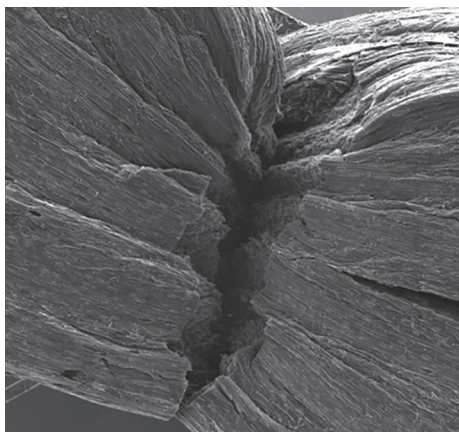
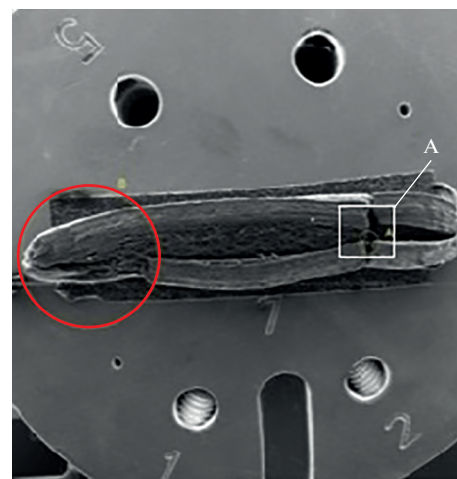


Рис. 9. Поперечный разлом продолговатой частицы

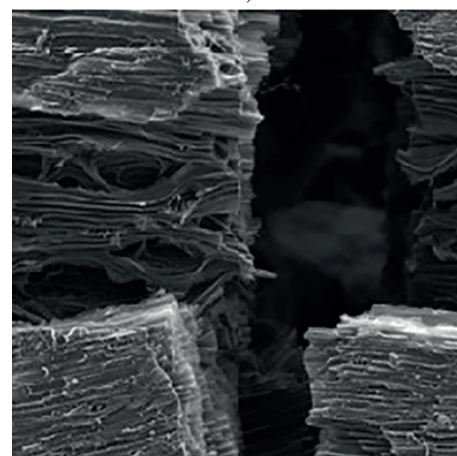
пряжений, вызванных повышением давления и возникающих при усадке частиц в процессе разложения основных компонентов древесины, из которых состоят стенки трахеид: гемицеллюлоз, целлюлозы и лигнина [27].

Вероятной причиной изменения характера кривизны слоев древесных волокон вблизи границ годовичных приростов может быть большая степень окружной усадки волокон позднего прироста по сравнению с ранним приростом при испарении вторичной влаги и термическом разложении гемицеллюлоз на начальных стадиях нагрева при температурах 120–150 и 150–275°C соответственно, а также деструкции лигнина, которая полностью завершается при более высоких температурах (350–450°C) [28]. При этом происходит смещение слоев поздних трахеид относительно ранних вдоль границы годовичных приростов. При такой деформации микроструктуры частицы острый угол между границей приростов со стороны раннего прироста и поверхностью приводит к излому последней, появлению разрыва на поверхности частицы и зарождению трещины (см. рис. 7). Летние трахеиды, расположенные вблизи границы годовичных слоев, имеют наибольшее количество окаймляющих пор и, соответственно, наименьшую прочность [28]. Окаймляющие поры ослабляют стенки трахеид, и около них в первую очередь начинается разрушение элементов древесины (по данным микроскопических исследований образцов разрушения древесины после испытаний на сжатие и изгиб) [28].

Взаимному смещению волокон раннего и позднего приростов вблизи границы годовичных слоев должно способствовать и выгибание летних трахеид в направлении к боковой поверхности частицы под действием давления выделяющихся внутри частицы газов. В результате возникающих градиентов давления при быстром нагреве и выходе летучих происходят продольные разрывы и деформация



а)



б)

Рис. 10. Изгиб волокон и округление торцевых поверхностей при растрескивании и первичной фрагментации продолговатой частицы.
а – общий вид; б – зона А

трахеид с образованием локальных внутренних пустот и объединением их объемов (см. рис. 11), которые приводят к искривлению волокон в виде концентрических криволинейных поверхностей, окружающих пустоты. Таким разрывам и искривлению подвержены, в первую очередь, менее прочные трахеиды летнего прироста. В некоторых случаях наблюдается образование пустот и в волокнах осенних приростов, однако их объемы и количество существенно меньше, чем в слоях ранних трахеид. Обращает на себя внимание также то, что наибольшее количество таких внутренних пустот и разрывов обнаруживается в коксовых частицах, образовавшихся при температуре процесса 950°C (максимальная скорость нагрева частиц).

Продольные трещины, образующиеся на поверхностях боковых граней частицы по границам годовичных приростов, ускоряют выход газов из

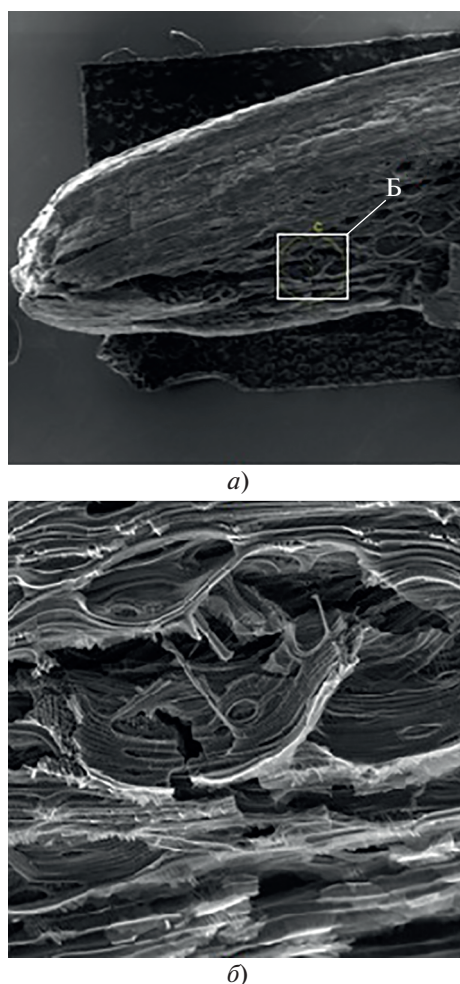


Рис. 11. Свободные полости, изгиб, продольные и поперечные разрывы трахейд при растрескивании и фрагментации продолговатой частицы.
а – общий вид; б – зона Б

внешних слоев, снижая в них давление и способствуя возникновению поперечных градиентов давления, направленных от внутренних зон к периферии. В зонах, где продольные трещины зарождаются и по мере развития приобретают наибольшую ширину, должны возникать наиболее высокие поперечные градиенты давления. При достижении температуры волокон примерно 270–300°C начинается деструкция кристаллической целлюлозы [27], что должно приводить, с одной стороны, к окончательному переходу материала стенок трахейд в аморфное состояние и возникновению поверхностного натяжения, а с другой – к снижению их прочности.

Продольно ориентированные спиральные структуры – микрофибрилы, состоящие из кристаллической целлюлозы, являются остовом клеточных стенок трахейд и обеспечивают их жесткость и механическую прочность [27]. Совместное

действие давления газов и разложения целлюлозы способствует одновременному выгибанию внешних слоев наружу относительно краев трещин и дальнейшему разрастанию продольных трещин вследствие увеличения окружных (тангенциальных) напряжений. При этом трахеиды начинают работать на изгиб и растяжение, испытывая дополнительные напряжения, приводящие к образованию поперечных разрывов, которые распространяются по мере прогрева частицы от периферии к ее центру, и формирующие поперечные разломы. Подобные поперечные разрывы трахейд при их изгибе и растяжении можно наблюдать и во внутренних зонах частиц при образовании локальных пустот под давлением выделяющихся газов (см. рис. 11, б).

Смещение наружных слоев трахейд относительно внутренних в продольном направлении (см. рис. 10, а, 11, а, 12) можно объяснить сочетанием большого аксиального сокращения периферийных волокон, достигших температуры разложения кристаллической целлюлозы [29], и выгибания волокон под действием давления газов при их последовательном нагреве и пиролизе от периферии к центру. Смещение слоев должно быть более заметно, чем больше продольный размер частицы, и, видимо, по этой причине оно не наблюдается на торцевых гранях при быстром нагреве и пиролизе кубических частиц.

Представленный анализ и предположения о механизме растрескивания древесных частиц в процессе быстрого нагрева и выхода летучих позволяют обоснованно подойти к выбору количественных характеристик, отражающих влияние микроструктуры, а также строения древесных частиц на их фрагментацию подобно тому, как это ранее было сделано для угольных топлив. В [6] было показано, что сопротивление пор выходу летучих влияет на склонность углей к первичной фрагментации и критический диаметр угольных частиц повышается с увеличением отношения выхода летучих к пористости. Применительно к древесной биомассе в качестве пористости можно использовать удельный объем древесины, который при фиксированной влажности коррелирует с объемом пустот и может быть существенно различным для разных частиц древесины (даже одной породы) из-за различных размеров площади сечения трахейд и соотношения количеств трахейд раннего и позднего прироста вследствие неодинаковых условий произрастания, местоположения в стволе дерева и т.п. [28]. Обработка результатов экспериментов с продолговатыми древесными частицами при $h/a = 8$, имеющими одинаковую влажность и разный удельный объем, показала существенное влияние удельного объема частиц v_0 на их фрагментацию. Чем меньше v_0 , тем больше сопротивление выходу летучих V_i^r/v_0

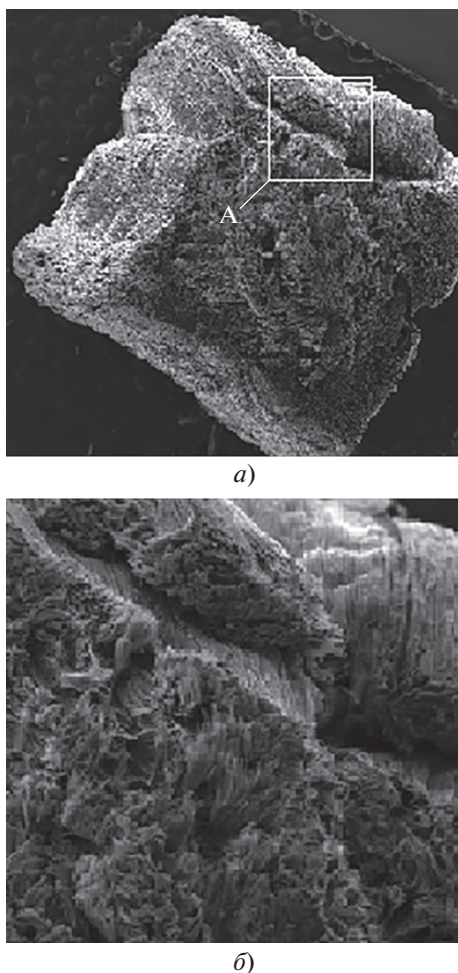


Рис. 12. Смещение внешних слоев трахеид относительно внутренних на торцевых поверхностях продолговатых частиц.
a – общий вид; *б* – зона А

и больше склонность древесных частиц к фрагментации. Влияние удельного объема частиц на первичную фрагментацию при температурах пиролиза 800 и 900°C показано в виде зависимостей степени первичной фрагментации от начального эквивалентного диаметра частиц на рис. 13.

Можно ожидать, что при одинаковых выходе летучих, удельном объеме и массе частиц на характеристики фрагментации также оказывает влияние отношение их объема к площади сечения торцевых граней, представляющей собой площадь сечения выхода основной массы летучих до начала интенсивного растрескивания. Для частиц правильной формы – это соотношение объема и площади поперечного сечения, т.е. продольный размер частицы. Это предположение нуждается в экспериментальной проверке в опытах с древесными частицами одинакового начального эквивалентного диаметра, различающимися продольным размером.

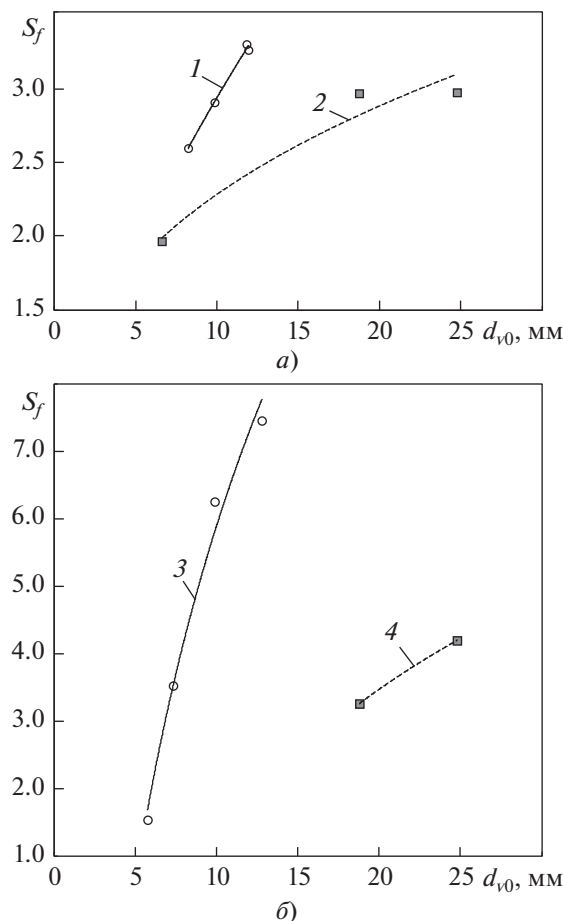


Рис. 13. Зависимость индекса фрагментации продолговатых древесных частиц от начального эквивалентного диаметра при $W_i^r = 7\%$, $h/a = 8$ и температуре 800°C (*a*), 900°C (*б*).
 v_0 , см³/г: 1 – 1.53; 2 – 2.09; 3 – 1.49; 4 – 2.13;
 V_i^r/v_0 , г/см³: 1 – 0.52; 2 – 0.38; 3 – 0.54; 4 – 0.37

ВЫВОДЫ

1. При температуре пиролиза 800–950°C и увеличении исходного размера частиц биомассы возрастают вероятность и интенсивность их фрагментации.

2. Отсутствие значимого количества мелких фрагментов, образующихся при отслаивании с поверхности частиц, свидетельствует о незначительном влиянии термических напряжений на первичную фрагментацию древесной биомассы, в отличие от большинства углей. Определяющую роль в первичной фрагментации древесных частиц играют напряжения, вызываемые давлением летучих и усадкой в процессе термического разложения древесины.

3. При одинаковом начальном эквивалентном диаметре (массе частицы) продолговатые части-

цы прямоугольного сечения подвергаются более интенсивной первичной фрагментации по сравнению с квазикруглыми (кубическими).

4. Удельный объем древесных частиц оказывает существенное влияние на характер и интенсивность их растрескивания в процессе быстрого нагрева и выхода летучих. Эта характеристика должна рассматриваться как один из основных факторов, воздействующих на первичную фрагментацию древесного топлива наряду с температурой, начальным размером частицы и ее формой. Меньший удельный объем и, соответственно, большее сопротивление выходу летучих способствуют первичной фрагментации при прочих равных условиях.

5. Необходимы дальнейшие исследования взаимосвязи между структурой и физическими свойствами частиц древесины, а также количественными характеристиками фрагментации с учетом данных о влиянии температуры, начального размера частиц и скорости псевдооживления. Наибольший интерес представляет исследование влияния продольного размера частицы (отношения объема частицы к площади сечения торцевых граней). Это позволит получить количественные эмпирические зависимости главных критериев фрагментации и разработать на их основе инженерные методики расчета уноса горючих из слоя при сжигании, пиролизе и газификации древесной биомассы в кипящем слое с учетом первичной фрагментации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Рябов Г.А., Литун Д.С.** Использование технологии кипящего слоя для эффективного сжигания и газификации биомассы / под ред. О.С. Попеля // *Материалы Первого международного форума "Возобновляемая энергетика. Пути повышения энергетической эффективности. REENFOR-2013"*. Москва, 22–23 октября 2013 г. М.: ОИВТ РАН, 2013. С. 306–309.
2. **Опыт сжигания различных видов биомассы в России и Белоруссии** / Г.А. Рябов, Д.С. Литун, Е.А. Пищуха, Ю.С. Теплицкий, В.А. Бородуля // *Электрические станции*. 2015. № 9. С. 9–17.
3. **Lau I.T.** Char particle reaction and attrition in fluidized bed combustors: modeling and measurement: Technical report. Canmet Energy Technology Centre, 1995. <https://ruor.uottawa.ca/handle/10393/10129>
4. **Литун Д.С.** Расчет уноса золы и потерь тепла с механическим недожогом в кипящем слое при сжигании биомассы // *Изв. РАН. Энергетика*. 2015. № 5. С. 90–102.
5. **Fragmentation and attrition in the fluidized combustion of a coal** / R. Chirone, A. Cammarota, M.D' Amore, L. Massimilla // *Proc. of the 7th Intern. Conf. on FBC. Franklin Plaza Hotel, Philadelphia, Pennsylvania, 25–27 Oct. 1982. V. 2. P. 1023–1029.*
6. **Dakic D., Honing G., Valk M.** Fragmentation and swelling of various coals during devolatilization in a fluid bed // *Fuel*. 1989. V. 68. P. 911–916. [https://doi.org/10.1016/0016-2361\(89\)90129-4](https://doi.org/10.1016/0016-2361(89)90129-4)
7. **Dakic D., Honing G., Grubor B.** Mathematical simulation of coal fragmentation during devolatilization in fluidized bed // *IEA-AFBC Mathematical Modelling Meeting. Goteborg, Sweden, 1989.*
8. **Ranking fuels for utility-scale AFBC application** / R.R. Chandran, J.N. Duqum, M.A. Perna, D.D. Sutherland, D.R. Rowley // *Proc. of the 10th Intern. Conf. on FBC. San Francisco, 30 April–3 May 1989. V. 1. P. 313–322.*
9. **Peeler J., Poynton H.** Devolatilization of large coal particles under fluidized bed conditions // *Fuel*. 1992. V. 71. P. 425–430. [https://doi.org/10.1016/0016-2361\(92\)90032-J](https://doi.org/10.1016/0016-2361(92)90032-J)
10. **The fragmentation of coal particles during combustion in a fluidized bed** / H. Zhang, K. Cen, J. Yan, M. Ni // *Fuel*. 2002. V. 81. Is. 14. P 1835–1840.
11. **Kosowska-Galachowska M., Luckos A.** An experimental investigation into the fragmentation of coal particles in a fluidized-bed combustor // *Proc. 20th Intern. Conf. on Fluidized Bed Combustion. Beijing, China, 18–21 May 2009. Tsinghua University Press. P. 330–335.*
12. **Bunt J., Waanders F.** An understanding of lump coal physical property behaviour (density and particle size effects) impacting on a commercial-scale Sasol–Lurgi FBDB gasifier // *Fuel*. 2008. V. 87. P. 2856–2865. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2008.03.022>
13. **Литун Д.С., Рябов Г.А.** Современное состояние и актуальные задачи исследований процессов первичной фрагментации частиц твердого топлива применительно к сжиганию и газификации биомассы в псевдооживленном и плотном слое (обзор) // *Теплоэнергетика*. 2018. № 12. С. 24–34. <https://doi.org/10.1134/S0040363618120044>
14. **Badenhorst C.J.** Primary fragmentation of large coal particles: dis. ... for the degree of magister in chemical engineering. Potchefstroom Campus, South Africa, North-West University, 2016. http://dspace.nwu.ac.za/bitstream/handle/10394/17838/Badenhorst_CJ_2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
15. **Pillai K.K.** The influence of coal type on devolatilization and combustion in fluidized beds // *J. Inst. Energy*. 1981. V. 54. P. 142–150.
16. **Pillai K.K.** A schematic for coal devolatilization in fluidized bed combustors // *J. Inst. Energy*. 1982. V. 424. P. 132–133.
17. **Yates J., MacGillivar M., Cheesman D.** Coal devolatilization in fluidized bed combustors // *Chem. Eng. Sci.* 1980. V. 11. P. 2360–2361. [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(80\)87019-9](https://doi.org/10.1016/0009-2509(80)87019-9)
18. **Prins W., Siemons R., Van Swaaij W.P.M.** Devolatilization and ignition of coal particles in a two-dimensional fluidized bed // *Combust. Flame*. 1989. V. 75. Is. 1. P. 57–79. [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(89\)90087-4](https://doi.org/10.1016/0010-2180(89)90087-4)
19. **Oka S.N.** Fluidized bed combustion. N.Y.: Marcel Dekker, 2004.
20. **Радованович М.** Сжигание топлива в псевдооживленном слое: пер. с англ. / под ред. Э.Э. Шпильрайна. М.: Энергоатомиздат, 1990.

21. **Litoun D., Ryabov G., Pchelincev A.** Fragmentation of biomass particles in fixed and fluidized bed combustion and gasification // *J. Phys. Conf. Ser.* 2019. V. 1261. Is. 1. P. 012021. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1261/1/012021>
22. **ГОСТ 32975.2-2014.** Биотопливо твердое. Определение содержания влаги высушиванием. Часть 2. Общая влага. Ускоренный метод. М.: Стандартинформ, 2015.
23. **ГОСТ 32975.3-14.** Биотопливо твердое. Определение содержания влаги высушиванием. Часть 3. Влага аналитическая. М.: Стандартинформ, 2019.
24. **ГОСТ Р 56881-2016.** Биомасса. Определение зольности стандартным методом. М.: Стандартинформ, 2016.
25. **ГОСТ 32990-2014.** Биотопливо твердое. Определение выхода летучих веществ. М.: Стандартинформ, 2015.
26. **Srekanth M.** Primary fragmentation of wood in a fluidized bed combustor – an experimental investigation // *Int. J. Innov. Sci. Res.* 2014. V. 9. Is. 2. P. 502–510.
27. **Никитина В.М., Оболенская А.В., Щеголев В.П.** Химия древесины и целлюлозы. М.: Лесная промышленность, 1978.
28. **Боровиков А.М., Уголев Б.Н.** Справочник по древесине / под ред. Б.Н. Уголева. М.: Лесная промышленность, 1989.
29. **Динамика** изменения характеристик частиц натуральной и гранулированной древесины при термохимической конверсии в кипящем слое / Г.И. Пальченко, О.С. Рабинович, О.П. Хорольская, С.В. Василевич, В.А. Бородуля, Б. Леккнер, Я.Э. Йоханссон, К. Туллин // VI Минский междунар. форум по тепломассообмену. 19–23 мая 2008 г. https://www.itmo.by/conferences/abstracts/?ELEMENT_ID=4833/

Features of Primary Fragmentation of Wood Biomass during Fast Heating and Devolatilization

D. S. Litun^{a, *}, G. A. Ryabov^a, and E. A. Shorina^a

^a *OAO All-Russia Thermal Engineering Institute (VTI), Moscow, 115280 Russia*

**e-mail: litoun@gmail.com*

Abstract—Results are presented from experimental studies into primary fragmentation of wood particles during their fast heating and devolatilization. The experimental equipment and the study procedure are described. It has been demonstrated that the probability and intensity of primary fragmentation of wood particles increases with an increase in their initial size, process temperature, and the ratio of their longitudinal and transverse dimensions. The results of experimental studies suggest that the stresses arising from the pressure of volatiles and wood shrinkage control the primary fragmentation of wood particles. Based on the study into the microstructure of coke fragments formed during primary fragmentation, assumptions were made about the mechanism of cracking and its dependence on the structure and shape of wood particles. As applied to wood biomass, it is proposed to use the ratio of the volatile yield to the specific volume of wood as a criterion of devolatilization resistance. Processing of experimental data has revealed that smaller specific volumes and, accordingly, higher devolatilization resistances facilitate primary fragmentation. An analysis of the obtained data enabled the authors to determine the main lines of further studies into the primary fragmentation of wood particles during combustion and gasification in fluidized and dense beds.

Keywords: biomass, fluidized bed, wood particles, primary fragmentation, coke residue, microstructure, gasification, pyrolysis, heat release, fluidization, volatile yield