

Р. Г. Сафин, Н. Ф. Тимербаев, Д. А. Ахметова,  
Р. Р. Зиятдинов, А. Р. Хабибуллина

### ГАЗИФИКАЦИЯ ДРЕВЕСНЫХ ОТХОДОВ

**Ключевые слова:** термическое разложение, генераторный газ, синтез-газ, газификация, температура, древесные отходы, деструкция, термохимическое разложение.

*Представлен обзор исследований по газификации древесных отходов. Представлены результаты физического и математического моделирования процесса прямоточной газификации.*

**Keywords:** thermal expansion, producer gas, syngas, gasification, temperature, wood waste, destruction, thermochemical decomposition.

*This paper reviews research on gasification of wood waste. The results of physical and mathematical modeling of direct-flow gasification.*

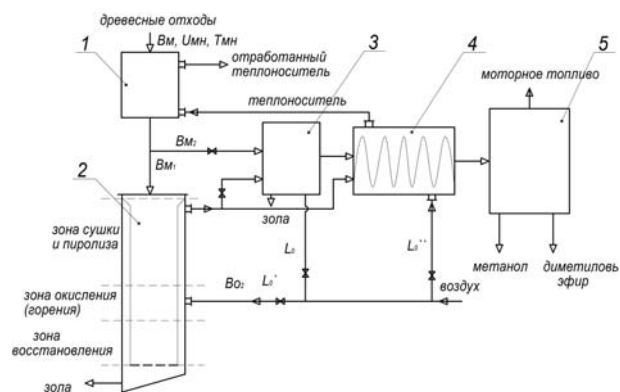
Одним из факторов, сдерживающих развитие предприятий ЛПК, является низкий уровень их технической оснащенности, приводящий к образованию большого количества древесных отходов. Ежегодно на предприятиях лесопромышленного комплекса России образуются миллионы тонн древесных отходов [1,2]. Наиболее простым способом утилизации древесных отходов является их термическая переработка [3,4,5] путем прямого сжигания с целью получения тепловой энергии [6,7,8]. Более сложными, но более эффективными являются методы конверсии древесных отходов в жидкое [9÷13], либо газовое состояние с получением продуктов, востребованных химической и другими отраслями промышленности. Одним из таких продуктов, который можно получить путем прямоточной газификации древесных отходов, является синтез-газ, широко применяемый в химической промышленности.

Химические процессы, протекающие при термическом разложении древесины, представляют собой комплекс сложных химических превращений термической деструкции высокомолекулярных соединений, состоящих из множества элементарных взаимодействий.

Анализ существующих технологий газификации отходов деревообработки показал, что газификация включает в себя взаимосвязанные процессы нагрева древесных отходов, их сушки, пиролиза, горения и химической конверсии продуктов горения в генераторный газ. Последовательность процессов зависит от способа газификации, который в свою очередь зависит от требований, предъявляемых к генераторному газу. Для производства генераторного газа, который непосредственно сжигается в котле-утилизаторе, применяя противоточный или перекрестный ток. При необходимости получения более чистого генераторного газа, например для сжигания в двигателях внутреннего сгорания, либо использования в качестве химического сырья, применяется противоточный режим [14]. Генераторный газ максимально обогащенный водородом и окисью углерода может использоваться для синтеза новых веществ и называется синтез-газом [15].

Для реализации в условиях малых деревообрабатывающих предприятий в настоящее время одним из наиболее перспективных методов является технология прямоточного процесса газификации. На базе современных представлений о влиянии температуры на свойства древесины, о тепломассопереносе, осложненном параллельно протекающими химическими реакциями, а также сорбционно-кинетических, тепловых и массопроводных и химических свойствах древесины разработан процесс комплексной энерготехнологической переработки древесных отходов. [16]

Схема разработанного процесса энерготехнологической переработки высоковлажных древесных отходов с предварительной сушкой методом прямоточной газификации, представленная на рисунке 1.



**Рис. 1 – Структурная схема энерготехнологического комплекса переработки древесных отходов с применением прямоточной газификации**

Согласно данной схеме древесные отходы поступают в камеру предварительной сушки 1. Затем высушенные отходы делятся на два потока, основная часть поступает в газогенератор 2, а другая часть подается в топку 3 для производства теплоносителя. Другими входными потоками в систему переработки высоковлажных древесных отходов является воздух, который подается в качестве окислителя в газогенератор и топку и в качестве теплоносителя в утилизатор тепла – 4 при

производстве из продуктов газификации химических продуктов 5. На выходе из системы переработки древесных отходов имеем новые химические продукты, отработанный теплоноситель и золу. Внутри рассматриваемой системы протекают взаимосвязанные процессы сушки, пиролиза, горения и восстановления.

Математическое описание процессов сушки, пиролиза и горения представлены в вышеприведенных работах [3÷14].

При рассмотрении процесса восстановления, вследствие значительного влияния конвективного переноса тепла и массы, теплопроводностью и диффузией по газу пренебрегаем. С учетом принятого допущения уравнения сохранения вещества для каждого компонента газового потока и для угля запишутся в виде [17÷20]:

$$w_{z-z} \cdot \frac{\partial C_i}{\partial y} = -k_i \cdot C_i, \quad (1)$$

$$w_y \cdot \frac{\partial m_y}{\partial y} = -m_y \cdot \sum_{m=1}^z k_i. \quad (2)$$

Уравнение сохранения энергии для газового потока и угля соответственно примут вид: [17,21]

$$\rho_{z-z} \cdot c_{z-z} \cdot w_{z-z} \cdot \frac{\partial T_{z-z}}{\partial y} = -\alpha_{z-z} \cdot (T_y - T_{z-z}) \cdot f + \sum_{i=1}^z (q_i \cdot k_i \cdot (C_{i0} - C_i)), \quad (3)$$

$$\rho_y \cdot c_y \cdot w_y \cdot \frac{\partial T_y}{\partial y} = \alpha_{z-z} \cdot (T_y - T_{z-z}) \cdot f - \sum_{i=1}^z (q_i \cdot k_i \cdot (C_{i0} - C_i)). \quad (4)$$

Для решения системы уравнений [1÷4] приняты граничные условия

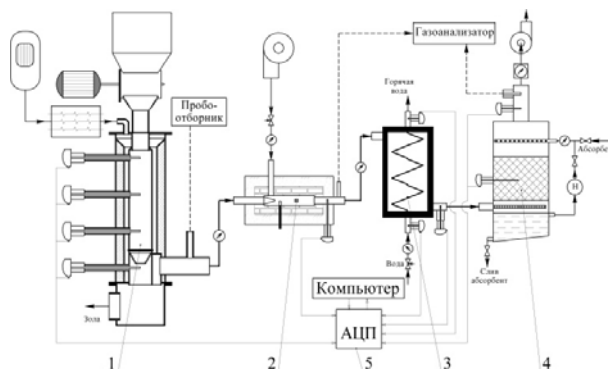
$$T_{y|y=0} = T_{z-z|y=0} \quad C_i|_{y=0} = C_{i0} \quad m_y|_{y=0} = m_{y0} \quad (5)$$

Расчет процесса газификации включает в себя: расчет зоны термического разложения древесного материала в отсутствие кислорода (пиролиза), расчет процесса горения продуктов пиролиза и расчет восстановительной зоны процесса газификации [22,23]. Оптимизационная задача расчета процесса газификации сводится к определению высот зон пиролиза, горения и восстановления, увязанных между собой таким образом, чтобы количество и качество угля образованного в зоне пиролиза удовлетворяло количеству газов получаемых в зоне окисления, с тем, чтобы на выходе из зоны восстановления не оставалось диоксида углерода, паров воды, либо непрореагировавшего углерода.

Для разработки эффективного аппаратного оформления процесса энерготехнологической переработки влажных древесных отходов с применением метода прямоточной газификации необходимо теоретическое и физическое моделирование основных процессов сопровождающих газификацию.

На рисунке 2 представлена схема экспериментальной установки для исследования процесса прямоточной газификации отходов

деревообработки. Экспериментальная установка состоит из последовательно соединенных газификатора 1, камеры дожигания генераторного газа 2, теплообменника 3, системы очистки топочных газов в виде абсорбера 4, модуля управления и регистрации данных 5.



**Рис. 2 - Схема экспериментальной установки для исследования процесса прямоточной газификации древесных отходов**

На установке исследованы гетерогенные процессы, протекающие в восстановительной зоне реактора газификации, определено влияние входных параметров на процесс прямоточной газификации древесных отходов.

Моделирование проводилось для древесных отходов сосны, имеющих форму пластины толщиной 0,01м при начальной температуре частиц  $T_n=25$  °С до условия достижения сушильным агентом степени насыщения  $\phi=0,95$  [14].

Для повышения эффективности энерготехнологической переработки высоковлажных древесных отходов целесообразно использование предварительной сушки топлива подаваемого в газификатор, за счет тепла отработанных топочных газов либо тепла, получаемого при охлаждении синтез-газа.

Анализ влажности топочных газов в зависимости от температуры и влагосодержания отходов [15] показал, что, несмотря на большое количество влаги, содержащейся в топочных газах, они имеют достаточный потенциал влагопоглощения и могут быть использованы в качестве сушильного агента.

В результате проведенных исследований установлено, что оптимальным является время пребывания, за которое сушильный агент (топочный газ) в результате сушки древесных отходов достигает уровня степени насыщения, близкого к значению 0,95. Более длительное пребывание топочного газа в сушильном бункере нежелательно, так как в верхней части сушильного бункера, начинается процесс конденсации топочных газов на поверхности холодных древесных частиц, поступающих из загрузочного шлюза [16,24].

Анализ результатов физического и математического моделирования показывает, что увеличение образования диоксида углерода связано с уменьшением температуры в зоне восстановления и, как следствие, снижением скорости реакций

восстановления, что в свою очередь и приводит к уменьшению содержания углекислого газа и увеличению количества водяных паров. Содержание водорода в генераторном газе при значениях влажности в пределах 18-22% имеет максимальное значение, однако с дальнейшим увеличением влажности отходов количество водорода уменьшается в результате понижения температуры в зоне восстановления.

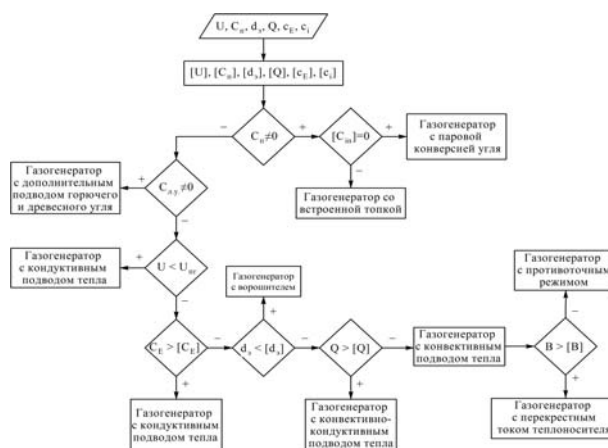
На состав генераторного газа, также оказывает влияние расход окислителя в зоне горения. Увеличение расхода окислителя до значения коэффициента избытка воздуха 0,7 приводит к росту температуры в восстановительной зоне газификатора и, как следствие, к росту содержания горючих компонентов окиси углерода и водорода и уменьшению доли невосстановленного диоксида углерода в генераторном газе. Это объясняется смещением константы равновесия эндотермических реакций восстановления диоксида углерода и паров воды в сторону образования водорода и окиси углерода при более высоких температурах. Увеличение содержания в генераторном газе водорода и окиси углерода, также связано с ростом скорости химических реакций в зонах горения и восстановления за счет увеличения температуры.

Также на установке для исследования процесса прямоточной газификации отходов деревообработки определено влияние содержания летучих в угле в зоне восстановления на состав и теплоту сгорания генераторного газа. Содержание основных горючих компонентов генераторного газа, при увеличении содержания летучих в угле с 5 до 24%, возрастает, что повышает теплотворную способность генераторного газа. Однако опыты показывают, что дальнейшее увеличение содержания летучих в угле приводит к образованию неразложившихся смол в генераторном газе.

В работах Садрtdинова А.Р., Саттаровой З.Г., Хисамеевой А.Р., выполненные по руководством Тимербаева Н.Ф. [25÷28] более подробно представлены результаты этих исследований, серия разработок направленных на совершенствование технологий и аппаратурных оформлений термической переработки различных видов отходов путем газификации.

На рис. 3 приведен алгоритм выбора конструкции газогенератора исходя из свойств и вида древесных отходов. После ввода исходных данных, на 1-ой ступени проверяется наличие в древесных отходах полимерных включений. При наличии полимерных соединений  $C_{п} \neq 0$  выбирается газогенератор со встроенной топкой, затем проверяется требование по качеству генераторного газа, если требуется синтез-газ, то выбирается газогенератор с паровой конверсией угля. При отсутствии полимерных включений проверяется необходимость утилизации сдвучных газов или легких углеводов, При  $C_{л.у.} \neq 0$  выбирается газогенератор с дополнительным подводом горючего и древесного угля. Далее проверяется влажность отходов и наличие экстрактивных

веществ в древесных отходах. При малом влагосодержании  $U < U_{пр}$  или высоком содержании в древесных отходах экстрактивных веществ рекомендуется газогенератор с кондуктивным подводом тепла. Для высоковлажных мелкодисперсных древесных отходов  $d_2 < [d_2]$  рекомендуется газогенератор с механическим ворошителем. При больших производительностях установки  $Q > [Q]$  рекомендуется выбирать газогенератор с кондуктивно-конвективным подводом тепла, применять режим противотока целесообразно при малых производительностях установки  $B < [B]$ .



**Рис. 3 – Алгоритм выбора типа газификатора в зависимости от вида перерабатываемого сырья**

Работа А.Р. Хисамеевой [27], направленная на совмещение процессов газификации с процессом каталитического синтеза, положила в основу нового научного направления – переработки древесных отходов в новые синтетические вещества: метанол, диметиловый эфир, моторное топливо, органические растворители и т.д. [29,35].

## Литература

1. Р.Р. Сафин, Р.Г. Сафин Анализ современного состояния лесопромышленного комплекса и перспективы его развития на базе кафедр лесотехнического профиля КГТУ // Вестник Казанского технологического университета. – 2010 г. - №4 - С. 120-130.
2. Р.Г. Сафин, Р.Р. Сафин Перспективы развития лесопромышленного комплекса Республики Татарстан на базе научных разработок кафедр лесотехнического профиля КНИТУ // Деревообрабатывающая промышленность. – 2012 г. - №3 – С. 22-27.
3. А.Н. Грачев, В.Н. Башкиров, Р.Г. Сафин Использование методов приближения при моделировании процесса термической переработки древесных отходов // Химия и химическая технология. 2004 г. – Т.47. - № 10 с.137-140.
4. Патент РФ № 2232348. Установка для термической переработки твердых отходов / Сафин Р.Г., Башкиров В.Н., Грачев А.Н. и др. – Бюл. № 18, 2004 г.
5. А.Н. Грачев Совершенствование техники и технологии процесса термической переработки древесных отходов // Автореферат дисс. канд. техн. наук, Казанский государственный технологический университет, Иваново, 2005 г. – 16 с.

6. Патент РФ № 2274851, МПК G01N 25/50. Устройство для определения параметров воспламенения и горения твердых материалов / Н.Ф. Тимербаев, А.Н. Грачев, Р.Р. Сафин и др.; патентообладатель НТЦ РТО; опубл. 20.04.2006
7. Н.Ф. Тимербаев Экспериментальный стенд для исследования процесса сжигания древесных частиц. – Успехи в химии и химической технологии. / Казань Т.XVIII №3(43). – 2004. – С.95-97
8. Н.Ф. Тимербаев повышение эффективности энергетического использования древесных отходов / Автореферат дисс. канд. техн. наук, Казанский государственный технологический университет, Иваново, 2007 г. – 16 с.
9. Патент РФ № 2256686, МПК C10B 1/04. Углевывжигательная печь / Н.Ф. Тимербаев, А.Н. Грачев, Р.Г. Сафин и др.; патентообладатель НТЦ РТО; опубл. 20.07.2005
10. Р.Г. Сафин, Р.Р. Сафин, И.В. Валеев Экспериментальное исследование влияния давления при пиролизе древесины // Вестник Казан. технол. ун-та. – 2005. № 1. – С. 256-260.
11. Р.Г. Сафин, Р.Р. Сафин, И.В. Валеев Математическое моделирование процесса пиролиза древесины при регулировании давления среды // Вестник Казан. технол. ун-та. – 2005. № 2. – С. 168-174.
12. Т.Д. Исхаков, А.Н. Грачев, Р.Г. Сафин К вопросу утилизации отработанных деревянных шпал / Известия Самарского научного центра РАН Самара. – 2008. – С.21-24
13. А.Н. Грачев Разработка методов расчета технологии и оборудования пироэнергетической переработки древесины в жидкие продукты / Автореферат дисс. докт. техн. наук, Казань: КГТУ, 2012. – 36 с
14. Н.Ф. Тимербаев Техника и технологии термической переработки отходов деревообрабатывающей промышленности: монография / Н.Ф. Тимербаев, Р.Г. Сафин, З.Г. Саттарова; М-во образ. и науки России, Казан. нац. исслед. технол. ун-т. – Казань: КНИТУ, 2010-172 с.
15. Н.Ф. Тимербаев Совершенствование техники и технологии процесса газификации высоковлажных древесных отходов: монография / Н.Ф. Тимербаев, Р.Г. Сафин, А.Р. Хисамеева, Т.Д. Исхаков; М-во образ. и науки России, Казан. нац. исслед. технол. ун-т. – Казань: КНИТУ, 2012-95 с.
16. Н.Ф. Тимербаев Комплексная энерготехнологическая переработка древесных отходов с применением прямоточной газификации: монография / Н.Ф. Тимербаев; М-во образ. и науки России, Казан. нац. исслед. технол. ун-т. – Казань: КНИТУ, 2011 – 248 с.
17. Н.Ф. Тимербаев Математическое описание процесса термической переработки влажных древесных отходов методом прямоточной газификации / Н.Ф. Тимербаев // Вестник Казан. технол. ун-та. 2012. - № 1. – с. 101-105
18. Baker, E.G., L.K. Mudge and O.H. Mitchell, 1984. Oxygen. Steam gasification of wood in a fixed-bed gasifier. Ind. and Eng. Chem. Proc. Des. and Dev., 23: 4, 725-728.
19. Kansa, E.J., H.E. Perlee and R.F. Chaiken, 1977. Mathematical model of wood pyrolysis including internal forced convection. Combustion and Flame, 29:311-324.
20. Havens, J.A., H.T. Hashemi and L.E. Brown, 1972. A Mathematical Model of the Thermal Decomposition of Wood. Combust. Sci. and Technol., 5:91-98.
21. Н.Ф. Тимербаев, Р.Г. Сафин, А.Р. Садурдинов, А.Р. Хисамеева Моделирование процесса прямоточной газификации древесных отходов // Вестник Казан. технол. ун-та. – 2011. - №7 - С. 75-79.
22. Н.Ф. Тимербаев, Р.Г. Сафин, А.Р. Хисамеева Газификация органических видов топлива // Вестник Казан. технол. ун-та. – 2011. - №1 - С. 326-329.
23. Н.Ф. Тимербаев, Р.Г. Сафин, З.Г. Саттарова, Д.А. Ахметова Исследование восстановительной зоны процесса газификации древесных отходов // Вестник Казан. технол. ун-та. – 2011. - №8 - С. 90-96.
24. Р.Г. Сафин, Н.Ф. Тимербаев, А.Р. Хисамеева, Д.А. Ахметова Газификация влажных древесных отходов // Вестник Казанского технологического университета. – 2012 г. - №17 - С. 195-199.
25. А.Р. Садурдинов Совершенствование техники и технологии процесса газификации отходов деревообработки / Автореферат дисс. канд. техн. наук, Казанский государственный технологический университет, Казань, 2011 г. – 16 с.
26. З.Г. Саттарова Совершенствование технологии переработки древесных отходов в генераторный газ / Автореферат дисс. канд. техн. наук, Казанский государственный технологический университет, Казань, 2013 г. – 16 с.
27. А.Р. Хисамеева Разработка техники и технологии термохимической переработки влажных древесных отходов в метанол / Автореферат дисс. канд. техн. наук, Казанский государственный технологический университет, Казань, 2013 г. – 16 с.
28. Н.Ф. Тимербаев Комплексная энерготехнологическая переработка древесных отходов с применением прямоточной газификации / Автореф. дисс. докт. техн. наук, Казань: КГТУ, 2012. – 38 с.
29. Патент РФ № 2507238. Способ получения синтез-газа из древесных отходов / Н.Ф. Тимербаев, Р.Г. Сафин, З.Г. Саттарова, Л.М. Исмагилова и др. патентообладатель КНИТУ, опубликовано 20.02.2014 Бюл. № 5.
30. Патент № 2478604 Способ получения метанола КНИТУ опубликовано 10.04.2013 Бюл. № 10.
31. Н.Ф. Тимербаев, Р.Г. Сафин, З.Г. Саттарова, Т.Х. Галеев Разработка технологии получения моторного топлива из отходов деревообработки // Вестник Казан. технол. ун-та. – 2012. - №11 - С. 205-207.
32. Н.Ф. Тимербаев, Р.Г. Сафин, Т.Х. Галеев Разработка технологии получения метанола из древесных отходов // Вестник Казан. технол. ун-та. – 2013. - №3 - С. 168-170.
33. Н.Ф. Тимербаев, Р.Г. Сафин, Л.М. Исмагилова Технология переработки древесных отходов в диметиловый эфир // Вестник Казан. технол. ун-та. – 2013. - №7 - С. 95-97.
34. Н.Ф. Тимербаев, Р.Г. Сафин, Д.А. Ахметова, А.Г. Мухаметзянова Разработка технологии переработки высоковлажных древесных отходов с целью получения моторного топлива // Вестник Казан. технол. ун-та. – 2013. - №19 - С. 211-213.
35. Н.Ф. Тимербаев, Т.Х. Галеев производство метанола из древесных отходов // Вестник Казан. технол. ун-та. – 2013. - №1 - С. 12-15.

© Р. Г. Сафин – д.т.н., проф., зав. каф. переработки древесных материалов КНИТУ, safin@kstu.ru; Н. Ф. Тимербаев – д.т.н., проф. той же кафедры; Д. А. Ахметова – к.т.н., доц. той же кафедры; Р. Р. Зиятдинов – к.т.н., доц. той же кафедры; А. Р. Хабибуллина – магистрант той же кафедры.