
ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Научная статья

УДК 621.311, 662.76, 504.064.4; DOI: 10.61260/1998-8990-2024-2-159-170

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ГАЗИФИКАЦИИ ДРЕВЕСНЫХ И РАСТИТЕЛЬНЫХ ОТХОДОВ

Ветров Игорь Марсельевич.

Тюменское высшее военно-инженерное командное училище им. Маршала инженерных войск А.И. Прошлякова, г. Тюмень, Россия.

Шемякина Ирина Евгеньевна.

Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного,
Санкт-Петербург, Россия.

✉ **Медведева Людмила Владимировна.**

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия

✉ luvmed@mail.ru

Аннотация. Проведено сопоставление результатов расчета по разработанной теплофизической модели состава для исследования термической газификации древесных и растительных отходов – возобновляемых природных энергетических ресурсов в газогенераторе с обратным процессом горения и принудительным паровоздушным дутьем, который позволяет добиться минимального образования побочного продукта – смолы. На основе теплофизической модели определяются оптимальные расходы твердого топлива – древесных и растительных отходов и окислителя – атмосферного воздуха. Работа может быть использована техническими инженерами на предприятиях России, а также других стран по экологически чистой утилизации древесных и растительных отходов в автономных энерготехнологических установках с газогенераторами горения для выработки тепловой и электрической энергии потребителю. В частности, на деревоперерабатывающих и сельскохозяйственных предприятиях Тюменской области скапливаются большие объемы древесных и растительных отходов, которые являются дополнительным дешевым источником энергии.

Ключевые слова: экологическая безопасность, теплофизическая модель, газогенератор, древесные и растительные отходы, генераторный газ

Для цитирования: Ветров И.М., Шемякина И.Е., Медведева Л.В. Теплофизическая модель и результаты экспериментального исследования газификации древесных и растительных отходов // Проблемы управления рисками в техносфере. 2024. № 2 (70). С. 159–170. DOI: 10.61260/1998-8990-2024-2-159-170.

Scientific article

THERMAL PHYSICAL MODEL AND RESULTS OF EXPERIMENTAL STUDY OF GASIFICATION OF WOOD AND PLANT WASTES**Vetrov Igor M.****Tyumen higher military engineering command school named after Marshal of engineering troops A.I. Proshlyakov, Tyumen, Russia.****Shemyakina Irina E.****Military academy of communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny, Saint-Petersburg, Russia.**✉ **Medvedeva Lyudmila V.****Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia**✉ **lavlmed@mail.ru**

Abstract. The article compares the calculation results using the developed thermophysical composition model for the study of thermal gasification of wood and plant waste – renewable natural energy resources in a gas generator with the reverse combustion process and forced steam-air blast, which allows to achieve minimal formation of a by-product – resin. Based on the thermophysical model, the optimal consumption of solid fuel – wood and plant waste and oxidizer – atmospheric air is determined. The work can be used by technical engineers at enterprises in Russia and abroad for the environmentally friendly disposal of wood and plant waste in autonomous energy technology installations with combustion gas generators to generate thermal and electrical energy for the consumer. In particular, large volumes of wood and plant waste accumulate at wood processing and agricultural enterprises in the Tyumen region, which are an additional cheap source of energy.

Keywords: environmental safety, thermophysical model, gas generator, wood and plant waste, generator gas

For citation: Vetrov I.M., Shemyakina I.E., Medvedeva L.V. Thermal physical model and results of experimental study of gasification of wood and plant wastes // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2024. № 2 (70). P. 159–170. DOI: 10.61260/1998-8990-2024-2-159-170.

Введение

Предварительная газификация измельченных древесных и растительных отходов (ДРО) – возобновляемых ресурсов в газогенераторах (ГГР) горения на примере автомобильного типа позволяет добиться их высокой полноты сгорания и значительной экономии расхода применительно к энерготехнологическим установкам (ЭТУ) для выработки тепловой и электрической энергии. ДРО относятся к наиболее дешевому, легко газифицируемому, малозольному виду твердого топлива и возобновляемым источникам энергии в природе.

В настоящее время в мире проводятся научные исследования для решения проблемы утилизации ДРО в модернизированных ГГР горения [1–9].

ГГР на ДРО с прямым процессом термической газификации не могут обеспечить получение топливного генераторного газа (ГГ) с минимальным содержанием смолы. Существенное снижение содержания смолы обеспечивается в ГГР с обратным процессом газификации.

Целью проведенного авторами исследования является сопоставление результатов расчета состава и параметров продуктов газификации с результатами экспериментального исследования процесса газификации ДРО в созданном ранее ГГР горения.

Методы исследования

В процессе исследования авторами проанализирован накопленный в мире практический опыт и научные исследования по проблеме газификации ДРО.

В работе [10] приведено описание способа получения из древесных отходов высококалорийного ГТ с целью производства электрической энергии и тепла.

В работе [11] приведен анализ влияния материалов руды на выход и состав газообразных продуктов, которые получены паровой газификацией древесных опилок в реакторе с псевдоожиженным слоем. Доказывают возможность получать обогащенный метаном газ из древесных отходов в результате применения дешевого катализатора на основе мартеновского шлака.

В работе [12] представлен обзор исследований по газификации древесных отходов и синтез-газ (ГТ) считают одним из наиболее эффективных методов утилизации данных отходов, который широко применяется в химической промышленности. Авторами разработана физическая и математическая модель прямоточного способа газификации древесных отходов.

В работе [13] приведено описание процесса исследований работы газификатора древесных отходов, процессов, которые протекают в нем, дальнейшего использования ГТ для выработки электрической энергии и результаты этих исследований.

В работе [14] древесные отходы рассмотрены авторами в качестве альтернативного возобновляемого перспективного источника энергии с целью производства электроэнергии тепла на котельных и электростанциях.

В работе [15] авторы приводят результаты численного исследования процесса обращенной слоевой газификации древесных отходов на установках небольшой мощности с целью выбора оптимального соотношения «активный материал/древесное топливо» и определения минимальной активности материала, при которой добавление его к топливу становится эффективным.

В работе [16] авторы анализируют и рассматривают основные энергетические показатели производства электроэнергии из древесных отходов. Авторы описывают расчет установленной мощности генерирующего оборудования с учетом доступных топливных ресурсов и энергетических характеристик термохимических процессов получения энергии из древесины в контексте использования в системах распределенной генерации в увязке с центрами электрических нагрузок. Представляют результаты оценивания энергетического потенциала древесных отходов по основным лесозаготовительным районам на примере районов Калининградской обл.

В работе [17] авторами предложен эффективный путь использования древесных отходов посредством термохимической конверсии в составе газогенераторных энергетических установок с улучшенными экологическими характеристиками. Оцениванием стоимости электроэнергии, полученной в результате использования разных видов топлива, авторы показывают преимущества в использовании древесных отходов. Авторами обоснован вывод: трехступенчатая газификация за счет высокого коэффициента полезного действия (КПД) процесса является перспективной технологией по переработке биомассы, с помощью которой можно получать ГТ с минимальным количеством смолы.

В работе [18] приведено описание процесса преобразования отходов лесопереработки (древесная кора разных видов пород деревьев) в водород методом двухстадийного пиролиза и обоснован вывод о целесообразности использования коры березы и осины для производства водорода методом двухстадийной пиролитической конверсии.

В настоящем исследовании расчетное исследование процесса газификации проведено на основе уравнений материального и теплового баланса.

В ГТР с обратным процессом газификации обычно образуется низкокалорийный ГТ с низшей рабочей теплотворной способностью $Q_p^*(ГТ) = 4000 \div 6500 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}$, состоящий

в основном из смеси газов: CO – 10–30 %, H_2 – 10–25 %, CH_4 – 1–5 %, CO_2 – 5–20 %, N_2 – 35–65 %, O_2 – 0,5–5 %, Ar – 0,5–5 % в пересчете на объем сухого газа [1, 5, 6].

В качестве прототипа теплофизической модели взяты расчеты материального и теплового баланса Н.Н. Доброхотова, В.Е. Грум-Гржимайло, Б.А. Пагануци, И.С. Мезина [1, 5, 6] для проектирования ГГР, в которых предварительно задается состав ГГ для 1 кмоль. В материальном балансе производится расчет расхода газифицируемого твердого топлива – ДРО, окислителя топлива – воздуха, продуктов газификации – ГГ, влаги, негазифицированного углерода топлива и золы. В тепловом балансе производится расчет теплотворной способности топлива и вырабатываемого из него ГГ, расхода тепловой мощности при полном сгорании топлива, потерь через стенки ГГР, на выходе из ГГР нагретого ГГ, на недожиг углерода и испарение влаги из топлива, температур по зонам газификации в ГГР, КПД и тепловой мощности (A) ГГР.

Отличительной особенностью и преимуществом разработанной модели является предварительное задавание расходов газифицируемых ДРО и подаваемого в ГГР воздуха, варьирование расхода которого позволяет проследить динамику (рис. 1) и обеспечить максимальные величины теплотворной способности вырабатываемого ГГ и КПД ГГР [1, 6]. Состав и параметры продуктов газификации определяются в результате расчетов.

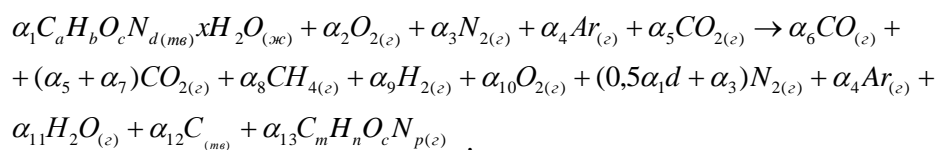
Результаты исследования и их обсуждение

Уравнение материального баланса представлено в виде:

$$G(T)_Z^W + G(L) = G(P),$$

где $G(T)_Z^W = G(T) + G(Z)_T + G(W)_T$ – массовый расход исходного влажного зольного твердого топлива; $G(T)$ – массовый расход сухого беззольного топлива; $G(Z)_T = G(T)_Z^W A^p$ – массовый расход древесной золы топлива; $G(W)_T = G(T)_Z^W W^p$ – массовый расход влаги топлива; $G(L)$ – массовый расход подаваемого сухого атмосферного воздуха в ГГР; $G(P) = G(GT)^{rw} + G(C)_T^{net} + G(Z)_T + G(C_m H_n O_o N_p)$ – массовый расход продуктов газификации: $G(GT)^{rw}$ – массовый расход влажного ГГ; $G(C)_T^{net}$ – массовый расход негазифицированного углерода топлива; $G(C_m H_n O_o N_p)$ – массовый расход продуктов пиролиза (смола, метанол, уксусная кислота и др.) с минимально допустимым содержанием.

Реакция термохимической газификации влажных ДРО в ГГР с воздушным дутьем имеет следующий вид:



В качестве газифицируемого твердого топлива взята сосновая щепка с элементным составом [5, 6]: $\varphi(C)_T = 0,5030$; $\varphi(O)_T = 0,4339$; $\varphi(H)_T = 0,0611$; $\varphi(N)_T = 0,002$.

Расход газифицируемых ДРО с эффективной влажностью $W^p = 0,1$ и зольностью $A^p = 0,01$ задан, например, равным: $G(T)_Z^W = 25,93 \frac{кг}{ч}$.

Оптимальный расход воздуха в ГГР определялся на основе вариантных расчетов, результаты которых представлены на рис. 1. Оптимальный расход воздуха находится в диапазоне $G(L)^a = (37,8 \div 38,3) \frac{кг}{ч}$. В качестве расчетного принят расход воздуха $G(L) = 38,2 \frac{кг}{ч}$.

В результате выполненного исследования найден расход вырабатываемого влажного ГГ:

$$G(\Gamma)^{\Gamma W} = G(T)_z^w + G(L) - G(Z)_T - G(C)_T^{np} - G(C_m H_n O_c N_p)^{np} = 63,57 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}.$$

Расход вырабатываемого ГГ в пересчете на сухой равен:

$$G(\Gamma)^{\Gamma} = G(\Gamma)^{\Gamma W} - G(H_2O)^{\Gamma W} = 61,17 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}.$$

Мольные доли газов во влажном ГГ составляют:

$$\begin{aligned} \mu(CO)^{\Gamma W} &= 0,243; \mu(CO_2)^{\Gamma W} = 0,081; \mu(CH_4)^{\Gamma W} = 0,024; \mu(N_2)^{\Gamma W} = 0,381; \mu(H_2)^{\Gamma W} = 0,212; \\ \mu(Ar)^{\Gamma W} &= 0,004; \mu(O_2)^{\Gamma W} = 0,005; \mu(H_2O)^{\Gamma W} = 0,049. \end{aligned}$$

Мольные доли газов $CH_4, O_2, CO, CO_2, H_2, N_2, Ar$ в сухом ГГ составляют:

$$\begin{aligned} \mu(CO)^{\Gamma} &= 0,256; \mu(CO_2)^{\Gamma} = 0,086; \mu(CH_4)^{\Gamma} = 0,025; \mu(N_2)^{\Gamma} = 0,401; \\ \mu(H_2)^{\Gamma} &= 0,223; \mu(Ar)^{\Gamma} = 0,005; \mu(O_2)^{\Gamma} = 0,005. \end{aligned}$$

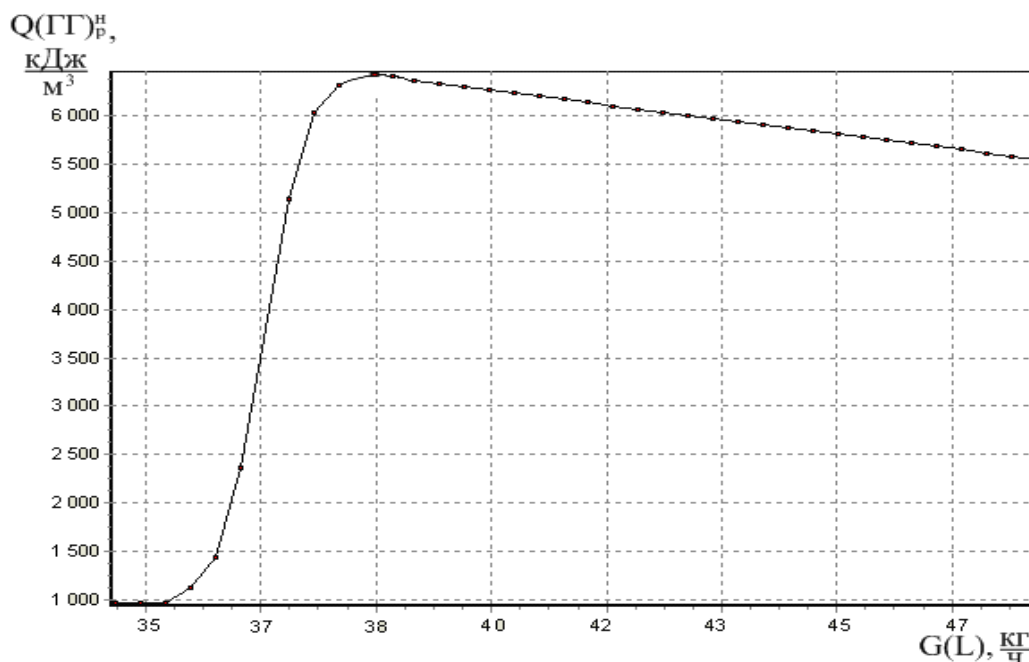


Рис. 1. Зависимость теплотворной способности газообразного топлива (ГГ) (Q_p^n (ГГ), $\frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}$) от расхода подаваемого в ГГР воздуха ($G(L)$, $\frac{\text{кг}}{\text{ч}}$)

При анализе отдельных составляющих в уравнении теплового баланса принимались следующие зависимости.

Низшая рабочая теплотворная способность ДРО с влажностью $W^p = 0,1$ определялась по формуле Д.И. Менделеева и равна [5, 6]:

$$Q_p^n(T)_z^w = 4,19(8100\varphi(C)_T + 24600\varphi(H)_T - 2600\varphi(O)_T - 600W^p) = 18391 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Низшая рабочая теплотворная способность сухого и влажного ГГ в соответствии с работами [1, 5] равна:

$$Q_p^n(\Gamma\Gamma)^\Gamma = 4,19(2580\mu(\text{H}_2)^\Gamma + 3045\mu(\text{CO})^\Gamma + 8517\mu(\text{CH}_4)^\Gamma) = 6569 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3};$$

$$Q_p^w(\Gamma\Gamma)^{\Gamma w} = 4,19(2580\mu(\text{H}_2)^{\Gamma w} + 3045\mu(\text{CO})^{\Gamma w} + 8517\mu(\text{CH}_4)^{\Gamma w}) = 6249 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}.$$

Тепловая мощность, выделившаяся при полном сгорании массы твердых ДРО, равна: $Q^T = Q_p^n(\Gamma\Gamma)_z^w G(\Gamma\Gamma)_z^w = 476787 \frac{\text{кДж}}{\text{ч}}$. Тепловая мощность, выделившаяся при полном сгорании выработанного сухого ГГ, равна $Q^G = \frac{Q_p^n(\Gamma\Gamma)G(\Gamma\Gamma)}{\rho(\Gamma\Gamma)^\Gamma} = 381626 \frac{\text{кДж}}{\text{ч}}$. Поглощенная тепловая мощность на испарение влаги и образовавшейся воды из ДРО равна $Q(\text{H}_2\text{O})^{\text{исп}} = G(\text{H}_2\text{O})Q(\text{H}_2\text{O}, \text{ж} \rightarrow \text{г}) = 33871 \frac{\text{кДж}}{\text{ч}}$. Потери тепловой мощности на недожиг древесных отходов (ДО) приняты равными $Q^{\text{нед.}} = 0,005Q^T = 2384 \frac{\text{кДж}}{\text{ч}}$. Внешние потери тепловой мощности через стенки ГГР приняты равными $Q^{\text{вн.}} = 0,015Q^T = 7152 \frac{\text{кДж}}{\text{ч}}$ [1, 5, 6]. Экспериментально внешние потери тепловой мощности через стенки ГГР определяются также по следующей формуле:

$$Q^{\text{вн.}} = 3600\alpha F(\bar{T}_f - \bar{T}_i),$$

где 3600 – коэффициент для перевода времени в часы, $\frac{\text{с}}{\text{ч}}$; α – коэффициент теплоотдачи с поверхности ГГР, $\frac{\text{кДж}}{\text{м}^2 \cdot \text{К} \cdot \text{с}}$; F – площадь поверхности теплоотдачи ГГР, м^2 ; \bar{T}_f – средняя температура поверхности ГГР, К ; \bar{T}_i – средняя температура окружающей среды, К .

Принимаем условие, что ГГР до газификации ДО был предварительно подогрет до соответствующих температур по зонам.

Принимаем условие, что влага ДРО имеет начальную температуру $T(W_T)^n = 273 \text{ К}$ и подогревается в ГГР до температуры кипения $T(W_T)^k = 373 \text{ К}$. Затраченная тепловая мощность на подогрев влаги ДО равна:

$$Q(W_T)^{\text{под}} = \bar{C}_p^{\text{ж}}(W_T)G(W_T)(T(W_T)^k - T(W_T)^n) = 1089 \frac{\text{кДж}}{\text{ч}},$$

где $\bar{C}_p^{\text{ж}}(W_T) = 4,2 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ – теплоемкость воды [1, 6].

Принимаем условие, что газифицируемые ДРО в пересчете на сухие зольные имеют начальную температуру $T(T_z)^n = 273 \text{ К}$ и подогреваются в бункере ГГР в процессе газификации до температуры начала их разложения $T(T_z)^k = 403 \text{ К}$, а затем газифицируются. Затраченная тепловая мощность на подогрев ДРО в пересчете на сухие зольные равна:

$$Q(T_z)^{\text{под}} = \bar{C}_p(T_z)G(T_z)(T(T_z)^k - T(T_z)^n) = 5156 \frac{\text{кДж}}{\text{ч}},$$

где $\bar{C}_p(T_z) = 1,7 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ – теплоемкость сухих зольных ДО [6].

Принимаем, что подаваемый в ГГР сухой воздух имеет начальную температуру $T(L)^0 = 273 \text{ К}$ и по данным эксперимента [1, 6] подогревается от ГГР в воздушном поясе до температуры $T(L)^{нод} = 393 \text{ К}$. Затраченная тепловая мощность на подогрев воздуха равна:

$$Q(L)^{нод} = \overline{C_p^r}(L)G(L)\Delta T = 4583 \frac{\text{кДж}}{\text{ч}}.$$

Температура ГГ при выходе из ГГР определяется из уравнения теплового баланса:

$$Q^T - Q^r - Q^{\text{нед}} - Q(\text{H}_2\text{O})^{\text{исп}} - Q^{\text{вн}} - Q(T)_z^{\text{под}} - Q(W)_T^{\text{под}} - Q(L)^{\text{под}} - \\ - Q(\text{ГГР})^{\text{под}} - T^{\text{гв}}n(\text{ГГ})^{\text{гв}}C_p^{\text{гв}} = Q_{\text{нод}} - \sum_{j=1}^m J_{\text{вх}j}^* G_{\text{вх}j} + \sum_{i=1}^n J_{\text{вых}i}^* G_{\text{вых}i} = 0, \quad (1)$$

где $Q_{\text{нод}} = Q^T - Q^r - Q^{\text{нед}}$ – подведенная тепловая мощность к ГГР, $\frac{\text{кДж}}{\text{М}^3}$; $J_{\text{вх}j}^*$ – энтальпия входящего j -го компонента рабочего тела, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$; $J_{\text{вых}i}^*$ – энтальпия выходящего i -го компонента рабочего тела, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$; $G_{\text{вх}j}$ – массовый расход входящего j -го компонента рабочего тела, $\frac{\text{кг}}{\text{ч}}$; $G_{\text{вых}i}$ – массовый расход выходящего i -го компонента рабочего тела, $\frac{\text{кг}}{\text{ч}}$.

Из уравнения (1) найдена температура выходящего влажного ГГ из ГГР, равная $T^{\text{гв}} = 481 \text{ К}$.

Температуру влажного ГГ на выходе из зоны восстановления находим из уравнения:

$$Q^T - Q^r - Q^{\text{нед}} - T^{\text{гв}}G(\text{ГГ})^{\text{гв}}C_p^{\text{гв}} = 0.$$

Температуру ГГ в зоне окисления находим из уравнения:

$$Q^T - Q^r - Q^{\text{нед}} - G(\text{ГГ})_o^r C_p^r (\text{ГГ})_o^r T^o = 0,$$

откуда $T^o = 1480 \text{ К}$.

При данной температуре процесс газификации ДРО протекает активно, что способствует существенному повышению теплотворной способности ГГ.

Тепловая мощность ГГР равна:

$$A(\text{ГГР}) = \frac{Q^r}{3600} = 106 \text{ кВт}. \quad (2)$$

КПД ГГР без использования отходящей тепловой мощности из ГГР равен:

$$\eta(\text{ГГР}) = \frac{Q^r}{Q^T} = 0,800.$$

Проведем сопоставление результатов расчета состава и параметров продуктов газификации с результатами экспериментального исследования процесса газификации ДРО в ГГР.

На рис. 2 представлена графическая зависимость температуры ГГ в бункере ГГР на глубинах 0,2 м и 0,5 м, на выходе из ГГР от времени эксперимента. Как видно из рис. 2, максимальная температура в бункере ГГР составила 543÷593 К и в среднем согласуется

с принятой для расчетов. На выходе из ГГР температура составила $453\div 573$ К, которая согласуется с расчетной.

В период проведения эксперимента температура воздуха на улице находилась в пределах $275\div 278$ К, а в проветриваемом рабочем помещении $281\div 288$ К. В процессе термической газификации ДРО температура на поверхности воздухоподводящего пояса ГГР под теплоизоляционным слоем повышалась в нижней части до 463 К, в средней до 413 К и в верхней до 353 К. В среднем экспериментальные тепловые потери с поверхности ГГР близки к расчетным.

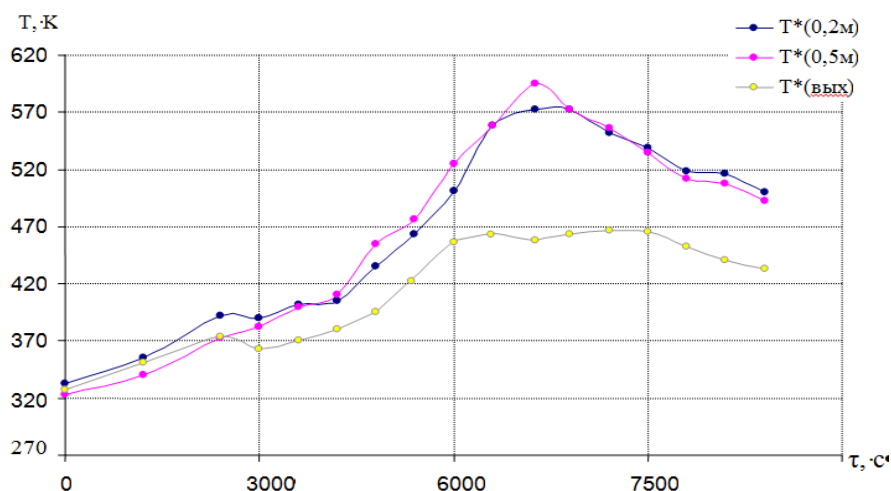


Рис. 2. Зависимость температуры (Т, К) в бункере на глубине на выходе из ГГР от времени (τ, с) проведения эксперимента

На рис. 3 представлена графическая зависимость температуры (Т, К) в зоне окисления ГГР от времени (t, с) эксперимента. Эффективная температура в зоне окисления соответствовала расчетам по модели и была равной порядка $1273\div 1453$ К. Температура в зоне восстановления также соответствовала расчетам по модели и была равна порядка $963\div 993$ К.

Расход сухого воздуха в ГГР был отрегулирован и составил $G(L) = 38 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}$, что практически равно расчетному расходу воздуха для максимальной мощности ГГР $A(\text{ГГР}) = 106 \text{ кВт}$. Расход газифицируемого твердого топлива в ГГР составил $G(T)_Z^{\text{в}}(\text{эксп.}) = 21 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}$ вместо расчетного $G(T)_Z^{\text{в}} = 25,93 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}$.

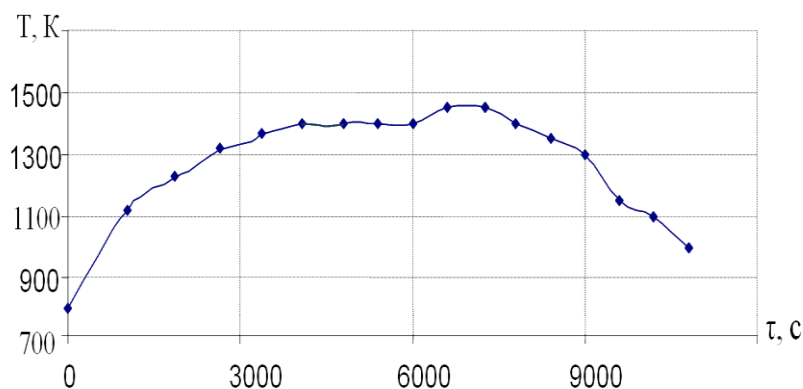


Рис. 3. Зависимость температуры (Т, К) в зоне окисления ГГР от времени (τ, с) проведения эксперимента

Заключение

Экспериментально уточнена интенсивность газификации измельченного твердого топлива в виде сосновой щепы с площади $F = 0,05 \text{ м}^2$ зеркала горения ГГР, которая зависит от особенностей конструкции ГГР, вида, влажности, степени измельченной ДРО и др. Она составила $E_s = 373,8 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2 \cdot \text{ч}}$ вместо принятой для расчетов $E = 450 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2 \cdot \text{ч}}$ [1, 6]. Поэтому найденная экспериментальная величина интенсивности термической газификации ДРО является наиболее достоверной.

Состав полученного влажного ГГ удовлетворительно согласовывался с расчетным [19]. Количественный состав углекислого газа (CO_2) и влаги (H_2O) во влажном ГГ определялся в адсорбционном аппарате методом прецизионной гравиметрии [5, 6]. Количественный состав угарного газа (CO) определялся с помощью высокочувствительных индикаторных трубок ГХ4СО-02. Количественный состав газов метана (CH_4) и газа кислорода (O_2) определялся в газоанализаторе МХТИ-3. Состав остальных газов – азота (N_2) и аргона (Ar) рассчитывался по теплофизической модели [5, 6]. Экспериментальный расход влажного ГГ составил $G(\text{ГГ})_s^{\text{гв}} = 59,5 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}$. Экспериментальная тепловая мощность ГГР по сжиганию влажного ГГ близка к расчетной (2) и равна:

$$A_s = \frac{G(\text{ГГ})_s^{\text{гв}} Q_p^{\text{н}}}{3600} = 103,3 \text{ кВт}.$$

Для повышения КПД ГГР, как одного из важных узлов ЭТУ, предлагается следующее:

1. Уменьшить внешние теплотери через стенки ГГР в окружающую среду с 1,5 % до 1,0 % от суммарной тепловой мощности за счет применения специальной герметичной теплоизоляции, которая будет равна:

$$Q^{*_{\text{вн}}} = 0,01 Q^{\text{г}} = 4768 \frac{\text{кДж}}{\text{ч}}.$$

2. Предварительно подогревать в теплообменнике отходящими из ЭТУ нагретыми продуктами сгорания подаваемые в ГГР сухой атмосферный воздух до температуры $T^*(L)^{\text{к}} = 423 \text{ К}$, влагу газифицируемых влажных ДРО до температуры кипения воды. $T^*(\text{H}_2\text{O})^{\text{к}} = 373,15 \text{ К}$, а газифицируемые ДРО в пересчете на сухие зольные до температуры начала разложения $T^*(T_z)^{\text{к}} = 403 \text{ К}$ с начальной температур, тепловая мощность которых будет равна:

$$Q^*(L)^{\text{под}} = 5773 \frac{\text{кДж}}{\text{ч}}; Q^*(W_T)^{\text{под}} = 1089 \frac{\text{кДж}}{\text{ч}}; Q^*(T_z)^{\text{под}} = 5156 \frac{\text{кДж}}{\text{ч}}.$$

3. Использовать тепловую мощность выходящего нагретого влажного ГГ из ГГР и превращения не менее 95 % расхода его водяных паров в жидкую фазу в теплообменнике ЭТУ, которые будут равны:

$$Q^{*\text{гв}} = Q^{\text{г}} - Q^{\text{г}} - Q(\text{H}_2\text{O})^{\text{исп}} - Q^{\text{исп}} - Q^{*\text{вн}} + Q^*(T_z)^{\text{под}} + Q^*(W_T)^{\text{под}} + Q^*(L)^{\text{под}} = 66156 \frac{\text{кДж}}{\text{ч}};$$

$$Q^*(W)^{\text{гв}} = 0,95(G(\text{ГГ})_s^{\text{гв}} - G(\text{ГГ}))Q(\text{H}_2\text{O}, \text{г} \rightarrow \text{ж}) = 5549 \frac{\text{кДж}}{\text{ч}}.$$

КПД ГГР с использованием отходящих тепловых мощностей из ЭТУ равен:

$$\eta^*(ГГР) = \frac{Q^r + Q^{*ГВ} + Q^*(W)^{ГВ}}{Q^r} = 0,951.$$

Таким образом, проведенное сопоставление результатов расчета по разработанной теплофизической модели состава и параметров продуктов газификации с результатами экспериментального исследования процесса газификации ДРО в созданном ранее ГГР показали их удовлетворительную сходимость, позволили провести определенную корректировку по интенсивности газификации ДРО в виде сосновой щепы. На основе обобщения результатов исследования предложены пути повышения КПД ГГР до величины, равной не менее $\eta=0,95$.

Список источников

1. Лямин В.А. Газификация древесины. М.: Изд-во «Лесная промышленность», 1967. 262 с.
2. Трупов Е.С. Эффективность использования ресурсов низкосортной древесины // Лесное хозяйство. 2002. № 6. С. 29–30.
3. Технические средства для получения тепловой и электрической энергии на основе возобновляемых и местных видов топлива / Н.И. Бохан [и др.]. Минск: БАТУ, 2004. С. 12–14.
4. Опытнo-промышленная газогенераторная установка с обратным горением на твердом топливе / А.Б. Шабаров [и др.] // Модернизация образования в условиях глобализации. Тюмень: Изд-во ТГУ, 2005. С. 188–123.
5. Испытание, исследование газогенераторной установки на вторичных древесных ресурсах с прямым и обратным процессом горения: отчет по НИР. Тюмень: Изд-во ТюмГУ, 2007. 29 с.
6. Вулф Дж. Автомобили и прогресс: бразильский поиск современности. NY: Oxford UP, 2010. С. 108.
7. Лафонтен Х., Циммерман Ф.П. Конструкция упрощенного генератора древесного газа для заправки двигателей внутреннего сгорания при аварийной ситуации с нефтью. URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Construction_of_a_Simplified_Wood_Gas_Generator_For_Fueling_Internal_Combustion_Engines_in_a_Petroleum_Emergency.pdf (дата обращения: 26.02.2024).
8. Северная Корея работает на дровяных грузовиках. URL: <https://grist.org/technology/2011-07-18-north-korea-runs-on-wood-burning-trucks/> (дата обращения: 27.02.2024).
9. Сунгри-58 / ГАЗ-51 – Грузовик для сжигания древесины. URL: <https://www.flickr.com/browser/upgrade/> (дата обращения: 28.02.2024).
10. Филипычев Е.Н. Энергия из древесных отходов // Наука и новые технологии. 2004. № 8 (48).
11. Кузнецов Б.Н., Щипко М.Л. Газификация древесных отходов в обогащенный метаном топливный газ // Журнал СФУ. Химия. 2009. № 2 (3). С. 210–218.
12. Газификация древесных отходов / Р.Г. Сафин [и др.] // Вестник Казанского технологического университета. 2014.
13. Шишулькин С.Ю., Буянтуев С.Л., Старинский И.В. Газификация древесины с последующей выработкой электрической энергии // Вестник Бурятского государственного университета. Химия. Физика. 2017. Вып. № 2-3.
14. Кондрашина В.О., Ушакова А.Г. Изучение процесса газификации формованных древесных отходов // Химия и химическая технология: Достижения и перспективы: IV Всерос. конф. Кемерово: КГТУ, 2018.

15. Донской И.Г. Математическое моделирование газификации древесины смолистых продуктов на частицах активных компонентов // Известия вузов. Проблемы энергетики. Т. 20. 2018. № 11-12. С. 107–117.

16. Харитонов М.С., Шульгин В.И. Перспективы использования древесных отходов в системах распределенной генерации на территории Калининградской области // Вестник молодежной науки. Калининград: Калининградский гос. техн. ун-т, 2020.

17. Марченко О., Соломин С., Козлов А. Возможности использования древесных отходов в энергетике России // Экология и промышленность России. 2019. № 23 (6). С. 17–21. DOI: 10.18412/1816-0395-2019-6-17-21.

18. Зайченко В.М., Фалеева Ю.М. Преобразование отходов лесопереработки в водород методом двухстадийного пиролиза // СОК. 2022. № 4. С. 66–68.

19. Ветров И.М., Шемякина И.Е. Анализ автономных энергоустановок // Молодой ученый. 2022. № S13-1 (408-1). С. 6–8.

References

1. Lyamin V.A. Gazifikaciya drevesiny. M.: Izd-vo «Lesnaya promyshlennost'», 1967. 262 s.
2. Trupov E.S. Effektivnost' ispol'zovaniya resursov nizkosortnoj drevesiny // Lesnoe hozyajstvo. 2002. № 6. S. 29–30.
3. Tekhnicheskie sredstva dlya polucheniya teplovoj i elektricheskoy energii na osnove vozobnovlyаемых i mestnyh vidov topliva / N.I. Bohan [i dr.]. Minsk: BATU, 2004. S. 12–14.
4. Opytno-promyshlennaya gazogeneratornaya ustanovka s obratnym gorenem na tverdom toplive / A.B. Shabarov [i dr.] // Modernizaciya obrazovaniya v usloviyah globalizacii. Tyumen': Izd-vo TGU, 2005. S. 188–123.
5. Ispytanie, issledovanie gazogeneratornoj ustanovki na vtorichnyh drevesnyh resursah s pryamym i obratnym processom goreniya: otchet po NIR. Tyumen': Izd-vo TyumGU, 2007. 29 s.
6. Vulf Dzh. Avtomobili i progress: brazil'skij poisk sovremennosti. NY: Oxford UP, 2010. S. 108.
7. Lafonten H., Cimmerman G.P. Konstrukciya uproschennogo generatora drevesnogo gaza dlya zapravki dvigatelej vnutrennego sgoraniya pri avarijnoj situacii s neft'yu. URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Construction_of_a_Simplified_Wood_Gas_Generator_For_Fueling_Internal_Combustion_Engines_in_a_Petroleum_Emergency.pdf (data obrashcheniya: 26.02.2024).
8. Severnaya Koreya rabotaet na drovyanyh gruzovikah. URL: <https://grist.org/technology/2011-07-18-north-korea-runs-on-wood-burning-trucks/> (data obrashcheniya: 27.02.2024).
9. Sungri-58 / GAZ-51 – Gruzovik dlya szhiganiya drevesiny. URL: <https://www.flickr.com/browser/upgrade/> (data obrashcheniya: 28.02.2024).
10. Filipychev E.N. Energiya iz drevesnyh othodov // Nauka i novye tekhnologii. 2004. № 8 (48).
11. Kuznecov B.N., Shchipko M.L. Gazifikaciya drevesnyh othodov v obogashchennyj metanom toplivnyj gaz // Zhurnal SFU. Himiya. 2009. № 2 (3). S. 210–218.
12. Gazifikaciya drevesnyh othodov / R.G. Safin [i dr.] // Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta. 2014.
13. Shishul'kin S.Yu., Buyantuev S.L., Starinskij I.V. Gazifikaciya drevesiny s posleduyushchej vyrabotkoj elektricheskoy energii // Vestnik Buryatskogo gosudarstvennogo universiteta. Himiya. Fizika. 2017. Vyp. № 2-3.
14. Kondrashina V.O., Ushakova A.G. Izuchenie processa gazifikacii formovannyh drevesnyh othodov // Himiya i himicheskaya tekhnologiya: Dostizheniya i perspektivy: IV Vseros. konf. Kemerovo: KGTU, 2018.

15. Donskoj I.G. Matematicheskoe modelirovanie gazifikacii drevesiny smolistyh produktov na chasticah aktivnyh komponentov // Izvestia vuzov. Problemy energetiki. T. 20. № 11-12. 2018. С. 107–117.

16. Haritonov M.S., Shul'gin V.I. Perspektivy ispol'zovaniya drevesnyh othodov v sistemah raspredelennoj generacii na territorii Kaliningradskoj oblasti // Vestnik molodezhnoj nauki. Kaliningrad: Kaliningradskij gos. tekhn. un-t, 2020.

17. Marchenko O., Solomin S., Kozlov A. Vozmozhnosti ispol'zovaniya drevesnyh othodov v energetike Rossii // Ekologiya i promyshlennost' Rossii. 2019. № 23 (6). S. 17–21. DOI: 10.18412/1816-0395-2019-6-17-21.

18. Zajchenko V.M., Faleeva Yu.M. Preobrazovanie othodov lesopererabotki v vodorod metodom dvuhstadijnogo piroliza // SOK. 2022. № 4. S. 66–68.

19. Vetrov I.M., Shemyakina I.E. Analiz avtonomnyh energoustanovok // Molodoj uchenyj. 2022. № S13-1 (408-1). S. 6–8.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 10.03.2024; одобрена после рецензирования: 11.04.2024; принята к публикации: 19.04.2024

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 10.03.2024; approved after review: 11.04.2024; accepted for publication: 19.04.2024

Информация об авторах:

Ветров Игорь Марсельевич, доцент кафедры естественнонаучных и общепрофессиональных дисциплин Тюменского высшего военно-инженерного командного училища им. Маршала инженерных войск А.И. Прошлякова (625001, г. Тюмень, ул. Льва Толстого, д. 1), кандидат химических наук, e-mail: Imv15050@yandex.ru

Шемякина Ирина Евгеньевна, доцент кафедры математики и инженерной графики Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного (194064, Санкт-Петербург, К-64, Тихорецкий пр., д. 3), кандидат педагогических наук, e-mail: iri@mail.ru, SPIN-код: 3699-1243

Медведева Людмила Владимировна, профессор кафедры физико-технических основ обеспечения пожарной безопасности Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), доктор педагогических наук, профессор, заслуженный работник высшей школы, e-mail: luvlmed@mail.ru, SPIN-код: 9487-3042

Information about the authors:

Vetrov Igor M., associate professor of the department of natural sciences and general professional disciplines of the tyumen higher military engineering command school named after Marshal of engineering troops A.I. Proshlyakov (625001, Tyumen, Lva Tolstogo str., 1), candidate of chemical sciences, e-mail: Imv15050@yandex.ru

Shemyakina Irina E., associate professor of mathematics and engineering schedules of the Military academy of communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny (194064, Saint-Petersburg, K-64, Tikhoretsky ave., 3), candidate of pedagogical sciences, e-mail: iri@mail.ru, SPIN: 3699-1243

Medvedeva Lyudmila V., professor of the department of physical and technical fundamentals of fire safety of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), doctor of pedagogical sciences, professor, honored worker of higher education, e-mail: luvlmed@mail.ru, SPIN: 9487-3042