

УДК 621.43

DOI: 10.36979/1694-500X-2024-24-8-76-83

ПРИМЕНЕНИЕ ГАЗОГЕНЕРАТОРОВ В КАЧЕСТВЕ ИСТОЧНИКОВ ТОПЛИВА ДЛЯ ГАЗОПОРШНЕВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Д.А. Костин, И.О. Кудашева, А.В. Разуваев

Аннотация. Описывается применение газогенераторов в качестве источников возобновляемого топлива для энергетических комплексов на базе двигателей внутреннего сгорания. Преимущество таких энергетических комплексов заключается в том, что газогенератор позволяет не только утилизировать отходы производства, получать тепловую энергию, но и вырабатывать электроэнергию. Приводится описание расчета получаемого генераторного газа (синтез-газа) в зависимости от состава исходного сырья. Определив значения количества составляющих компонентов получаемого синтез-газа: CO , CO_2 , H_2 , H_2O и N_2 , можно сделать вывод о его качестве. Следовательно, по результатам расчетов можно подобрать наиболее оптимальный вид исходного топлива для газогенератора – жидкого или твердого (дрова, древесный уголь, каменный уголь, бурый уголь, кокс, топливные пеллеты).

Ключевые слова: энергетический комплекс; двигатель внутреннего сгорания; газогенератор; пиролиз.

ГАЗ ГЕНЕРАТОРЛОРУН ГАЗ ПОРШЕНДИК ЭНЕРГЕТИКАЛЫК КОМПЛЕКСТЕР УЧУН ОТУН БУЛАГЫ КАТАРЫ КОЛДОНУУ

Костин Д.А., Кудашева И.О., Разуваев А.В.

Аннотация. Макалада ичтен күйүүчү кыймылдаткычтардын негизиндеги энергетикалык комплекстер үчүн кайра жаралуучу отун булактары катары газ генераторлорун колдонуу чагылдырылган. Мындай энергетикалык комплекстердин артыкчылыгы газ генератору өндүрүш калдыктарын кайра иштетүүгө жана жылуулук энергиясын алууга гана эмес, ошол эле учурда электр энергиясын өндүрүүгө да мүмкүндүк берет. Макалада чийки заттын курамына жараша пайда болгон генератор газын (синтез газы) эсептөө чагылдырылат. Алынган синтез газынын компоненттеринин санынын маанилерин аныктоо менен: CO , CO_2 , H_2 , H_2O жана N_2 , анын сапаты жөнүндө тыянак чыгарууга болот. Демек, эсептөөлөрдүн жыйынтыгы боюнча – суюк же катуу газ генератору (отун, көмүр, көмүр, күрөң көмүр, кокс, күйүүчү май гранулдары) үчүн баштапкы отундун эң оптималдуу түрүн тандоого болот.

Түйүндүү сөздөр: энергетикалык комплекс; ичтен күйүүчү кыймылдаткыч; газ генератору; пиролиз.

THE USE OF GAS GENERATORS AS FUEL SOURCES FOR GAS-PISTON POWER COMPLEXES

D.A. Kostin, I.O. Kudasheva, A.V. Razuvaev

Abstract. The authors describe the use of the gasifiers as sources of renewable fuel for power complexes based on internal combustion engines. The advantage of such energy complexes lies in the fact that the gas generator allows not only to dispose of production waste, to receive thermal energy, but also to generate electricity at the same time. The article describes the calculation of the resulting generator gas (synthesis gas) depending on the composition of the feedstock. Having determined the values of the number of components of the resulting synthesis gas: CO , CO_2 , H_2 , H_2O and N_2 , we can conclude about its quality. Therefore, based on the results of calculations, it is possible to choose the most optimal type of starting fuel for a gas generator – liquid or solid (firewood, charcoal, coal, brown coal, coke, fuel pellets).

Keywords: power complex; internal combustion engines; gasifier; pyrolysis.

В современных сложных геополитических и экономических условиях особую важность приобретает обеспечение энергетической безопасности различных объектов, будь то промышленные предприятия или бытовые учреждения. Одним из наиболее перспективных средств в этой сфере являются решения малой энергетики, основанные на использовании поршневых двигателей. Они позволяют обеспечить постоянное и резервное электроснабжение различных объектов и являются особенно актуальными в настоящее время [1].

Основное преимущество таких энергетических установок – их относительная независимость от централизованных систем. Наиболее эффективными в этом случае являются газопоршневые малые ТЭЦ, или мини-ТЭЦ, которые обеспечивают комбинированную выработку электрической и тепловой энергии за счет утилизации тепловых потерь (принцип когенерации). Применение альтернативных видов топлива, таких как биогаз, попутный газ нефтяных месторождений, сжиженные углеводородные газы и генераторный газ, также способствует повышению эффективности таких установок. Рассмотрим последнюю установку более подробно.

Наиболее часто встречающийся вариант энергоустановок подобного типа – газогенератор, работающий совместно с электростанцией (рисунок 1). Преимущество их заключается в том, что газогенератор позволяет не только утилизировать отходы производства, получать тепловую энергию, но и вырабатывать электроэнергию [2].

При этом тепловая энергия может быть получена и от генераторного газа, который на выходе из газогенератора имеет температуру около 600 °С. При помощи теплообменника газ охлаждается до температуры, необходимой для нормального процесса работы двигателя внутреннего сгорания – 40 °С [2]. Полученное тепло может быть направлено для отопления и горячего водоснабжения объекта.

Генераторный газ (синтез-газ), полученный путем газификации, выступает в качестве экологического вида топлива. Основными горючими компонентами получаемого генераторного газа являются водород H_2 , оксид углерода CO , метан CH_4 , и непредельные углеводороды C_xH_x , а его теплотворная способность составляет 800–1000 ккал/м³ [3]. Чтобы получить генераторный газ, можно газифицировать любой материал, содержащий углерод: газообразные и жидкие углеводороды, уголь, торф, биомассу, промышленные и бытовые отходы. В связи с этим, выбор топлива для газификации не представляет абсолютно никакой сложности. Среди прочих достоинств генераторного газа можно выделить следующее: смешивая генераторный газ с необходимым количеством воздуха, первый сгорает, развивая почти все возможное тепло. В то время как для того, чтобы достичь такого эффекта сгорания другим видам твердого топлива, требуется огромный его избыток.

Рассмотрим конструкцию газогенератора, которая включает в себя зоны сушки и пиролиза (рисунок 2). В зоне сушки происходит испарение влаги, а в зоне пиролиза образуются летучие горючие

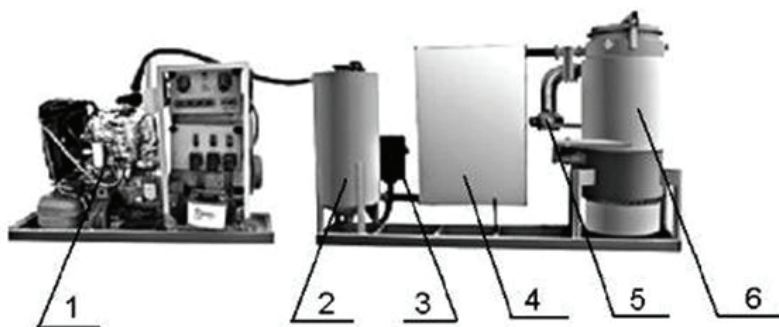


Рисунок 1 – Газогенераторная твердотопливная электростанция:

- 1 – газопоршневая электростанция; 2 – фильтр-влагоотделитель 3 – фильтр тонкой очистки;
4 – бойлер (охладитель газа); 5 – вентилятор; 6 – газогенератор

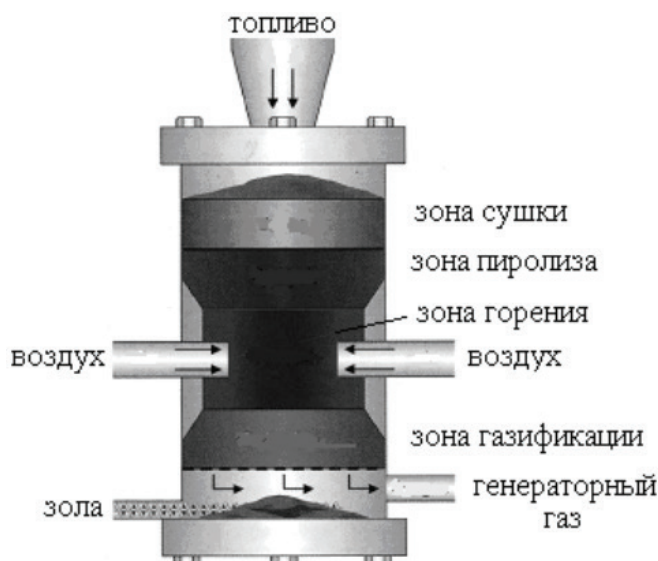


Рисунок 2 – Общий вид газогенератора обратного процесса

газы. Эти процессы происходят благодаря свободной конвекции горючих газообразных продуктов. Особую важность имеет эффективность теплопроводности слоя топлива в процессе газификации. Парогазовая смесь, образовавшаяся в этих зонах, затем перемещается сверху вниз вдоль газогенератора, пройдя через высокотемпературный очаг горения топлива.

В зоне горения происходит разложение веществ. Газ проходит процесс очистки от паров смол и активных пиролизных кислот, что является важным этапом. При этом необходимо учитывать наличие углистого остатка в топливе. Газ, обтекая частицы, газифицирует их и обогащается продуктами газификации. Затем полученный генераторный газ выходит из нижней части газогенератора через патрубок.

Газификацию можно осуществлять двумя способами – прямым и обратным. В прямом процессе воздух подается снизу, а газ отбирается сверху. Однако не все компоненты топлива участвуют в этом процессе. В зоне сухой перегонки образуются летучие горючие газы, а в зоне сушки содержится гигроскопическая влага топлива. Оба этих участка находятся выше зоны газификации. Формирование газа происходит в активном слое топлива, поэтому при его отборе летучие газы и всю гигроскопическую влагу только добавляют к нему, не принимая участие в процессе образования газа [4].

При обратном процессе газификации гигроскопическая влага и элементы, содержащиеся в топливе, участвуют в образовании газа, что оказывает влияние на его состав. Эта особенность обусловлена отсутствием удаления испарившейся влаги из бункера (зоны сушки) и продуктов сухой перегонки (зоны сухой перегонки). Обратный процесс является наиболее распространенным.

Однако следует учесть, что эффективность работы газопоршневых мини-ТЭЦ зависит от качества используемого топлива. Если качество топлива снижается, мощность энергоустановки уменьшается [3].

Поэтому важным является расчет состава получаемого газа, который зависит от вида используемого топлива в газогенераторе. Рассмотрим один из методов расчета, разработанный профессором Н.Н. Доброхотовым [4].

Один из важных параметров для расчета – объем влажного газа, который представляет собой объем газа, получаемый при газификации 1 кг топлива вместе с водяными парами. Этот параметр показывает количество генераторного газа, получаемое при газификации топлива. Расчет проводится для получения 100 моль влажного газа [4].

Еще одним важным параметром является состав синтез-газа – какие основные компоненты в него входят. Содержание газа следующее: CO , CO_2 , H_2 , H_2O и N_2 , т. е.

$$CO + CO_2 + H_2 + H_2O + N_2 = 100\% .$$

В расчетном составе газа метан не включен в перечень компонентов. Однако поскольку метан является одним из компонентов генераторного газа, необходимо внести изменения в расчетный состав газа. Содержание метана в газе зависит от выбора типа дутья, в данном случае используется воздушное дутье, поэтому можно принять, что содержание метана в газе составляет примерно 1,5 % [4].

Еще одним важным параметром является состав рабочего топлива. Топливо содержит углерод, водород, кислород, влагу и золу [4]. Поэтому для расчета необходимо учитывать состав топлива:

$$C^p + H^p + O^p + W^p + A^p = 100\% ,$$

где C^p – расчетное количество углерода; H^p – расчетное количество водорода; O^p – расчетное количество кислорода; W^p – расчетное количество влаги; A^p – расчетное количество золы.

Далее необходимо составить уравнения для определения компонентов состава газа (CO , CO_2 , H_2 , H_2O и N_2) и выход $v_{в.г.}$ влажного газа из 1 кг топлива.

Эти уравнения опираются на тепловой и материальный баланс процесса газификации. Неотъемлемой частью баланса является константа равновесия газа, которая зависит от того, с какой температурой он выходит из активного слоя топлива [4].

Исходя из закона сохранения материи в материальном балансе, можно составить уравнения: баланса углерода, баланса водорода и баланса кислорода. Эти уравнения учитывают переход элементов углерода C^p , водорода H_2^p , кислорода O_2^p , составляющих элементарный состав топлива, и кислорода O_2^A и азота N_2^A , входящих в состав воздуха, в газ.

В первую очередь рассмотрим составление уравнения баланса углерода. Для составления этого уравнения необходимо ввести понятие недожога – неполного сгорания топлива. Из этого понятия следует, что углерод C^p сгорает не полностью. Поэтому, чтобы прийти к более точному результату, необходимо исключить потери углерода $\delta\%$ с недожогом в золе, CO и CO_2 – именно в таком виде углерод переходит в газ.

Для определения содержания C^p в молях необходимо выполнить следующие действия.

Определить объем получаемого газа:

$$V_{в.г.} = 100 \cdot 22,4 \text{ нм}^3,$$

где 22,4 – объем 1 моля газа в л при температуре 0° и давлении 760 мм рт. ст.

Количество топлива, необходимого для получения $V_{в.г.}$ газа:

$$G_T = \frac{V_{в.г.}}{v_{в.г.}} = \frac{100 \cdot 22,4}{v_{в.г.}}, \text{ кг},$$

где $V_{в.г.}$ – объем получаемого газа; $v_{в.г.}$ – выход влажного газа из 1 кг топлива.

Количество углерода, содержащегося в рабочем топливе:

$$C_o^\delta = \frac{G_T \cdot C^p}{100},$$

где C^p – содержание углерода в топливе в %.

Для выражения количества углерода в рабочем топливе в молях необходимо разделить общую массу углерода на его молекулярную массу:

$$C_o^\delta = \frac{G_T \cdot C^P}{100 \cdot 12} = \frac{100 \cdot 22,4 \cdot C^P}{V_{A,\bar{A}} \cdot 100 \cdot 12} = \frac{1,867C^P}{V_{A,\bar{A}}}. \quad (1)$$

Объемное содержание CO и CO₂ соответствует содержанию в молях.

Составим уравнение баланса углерода с учетом недожога:

$$\frac{1,867C^P}{V_{A,\bar{A}}} \cdot \left(\frac{100 - \delta}{100} \right) = CO + CO_2. \quad (2)$$

Действительное количество углерода, которое расходуется на образование газа:

$$\tilde{N}_A^\delta = \left(\frac{100 - \delta}{100} \right). \quad (3)$$

Окончательное уравнение баланса углерода:

$$\frac{1,867\tilde{N}_A^\delta}{V_{A,\bar{A}}} = \tilde{N}I_1 + \tilde{N}I_2. \quad (4)$$

Теперь перейдем к уравнению баланса водорода. Водород, участвующий в процессе газификации – это водород \hat{I}_w^δ , находящийся в составе топлива в виде гигроскопической влаги, и свободный водород H^P топлива. Водород является неотъемлемой составляющей топлива, используемого в газификации. Водород, связанный в неразложившемся паре H_2O и свободный водород газа H_2 – именно в таком виде водород переходит в газ.

В образующемся в процессе газификации недожженном коксе также содержится водород. Этим количеством водорода можно пренебречь.

Дальнейшие действия аналогичны используемым при составлении уравнения баланса углерода.

Свободный водород, содержащийся в топливе, в молях:

$$\hat{I}_o^\delta = \frac{G_T \cdot H^P}{100 \cdot 2} = \frac{100 \cdot 22,4 \cdot H^P}{V_{A,\bar{A}} \cdot 100 \cdot 2} = \frac{11,2 \cdot H^P}{V_{A,\bar{A}}}. \quad (5)$$

Количество водорода в молях, связанного во влаге топлива:

$$\hat{I}_w^\delta = \frac{100 \cdot 22,4 \cdot W^P}{V_{A,\bar{A}} \cdot 100 \cdot 18} = \frac{1,214 \cdot W^P}{V_{A,\bar{A}}}. \quad (6)$$

Используя закон сохранения материи в материальном балансе, составим уравнение баланса водорода в молях:

$$\frac{11,2 \cdot H^P}{V_{A,\bar{A}}} + \frac{1,214 \cdot W^P}{V_{A,\bar{A}}} = H_2 + H_2O. \quad (7)$$

Уравнение баланса кислорода. Кислород, участвующий в газификации, содержится в воздухе, подаваемом через дутье, и в топливе в качестве одного из его компонентов. Именно так кислород попадает в газ. Рассмотрим кислород, содержащийся в рабочем топливе. Следует учитывать, что кислород в составе топлива находится в двух видах: \hat{I}_w^P – кислород, связанный во влаге топлива и \hat{I}_w^P – кислород горючей массы.

Количество кислорода, содержащегося в горючей массе рабочего топлива в молях:

$$\hat{I}_o^P = \frac{G_T \cdot O^P}{100 \cdot 32} = \frac{100 \cdot 22,4 \cdot O^P}{V_{A,\bar{A}} \cdot 100 \cdot 32} = \frac{0,7 \cdot O^P}{V_{A,\bar{A}}}. \quad (8)$$

Количество кислорода, связанного во влаге топлива, в молях:

$$\hat{I}_w^p = \frac{0,5 \cdot 100 \cdot 22,4 \cdot W^p}{V_{\text{А.А.}} \cdot 100 \cdot 18} = \frac{0,622 \cdot W^p}{V_{\text{А.А.}}} \quad (9)$$

Далее определим количество кислорода из воздуха. Предположим, что весь азот поступает только с воздухом:

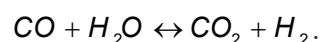
$$\hat{I}_2^B = \frac{0,21 \cdot 100 \cdot N_2}{0,79 \cdot 100} = 0,266 \cdot N_2 \quad (10)$$

CO_2 , CO и H_2O – компоненты генераторного газа, в состав которого входит кислород.

Уравнение баланса кислорода в молях:

$$\frac{0,7 \cdot O^p}{V_{\text{А.А.}}} + \frac{0,622 \cdot W^p}{V_{\text{А.А.}}} + 0,266 \cdot N_2 = CO_2 + 0,5(CO + H_2O) \quad (11)$$

Рассмотрим следующую обратимую реакцию:



Между четырьмя компонентами CO , H_2O , CO_2 и H_2 устанавливается равновесное состояние, которое зависит от температуры.

Поскольку парциальные давления газов пропорциональны их объемным содержаниям в смеси, то константа равновесия для этой реакции будет:

$$K_p = \frac{CO \cdot H_2O}{CO_2 \cdot H_2} \quad (12)$$

Уравнение (12) используем в дальнейших расчетах. Примем допущение, что состав газа при выходе из слоя устанавливается равновесным состоянием реакции водяного газа. Равновесное состояние водяного газа можно достичь в газогенераторах при константе $K_p = 1,7 \div 2,5$, т. е. при температуре выше 1000°C .

Для получения уравнения баланса азота рассмотрим тепловой баланс процесса газификации.

Условный КПД газогенератора с учетом потерь тепла в процессе газификации:

$$\eta_{\text{А}} = \frac{V_{\text{А.А.}} \cdot Q_i^{\text{А.А.}}}{Q_i^{\delta}} \quad (13)$$

где $Q_i^{\text{А.А.}}$ – теплотворность влажного газа; $v_{\text{в.г.}}$ – выход влажного газа из 1 кг топлива.

Теплотворность влажного газа:

$$Q_H^{B.G.} = 30,5 \cdot CO + 25,7 \cdot H_2 \quad (14)$$

Подставив данное выражение (14) в уравнение условного КПД газогенератора (13), получим уравнение теплового баланса:

$$\frac{Q_i^{\delta}}{V_{\text{А.А.}}} \eta_{\text{А}} = 30,5 \cdot \tilde{N}\hat{I} + 25,7 \cdot \hat{I}_2 \quad (15)$$

Уравнение баланса азота получим из баланса состава газа:

$$100 - (\tilde{N}\hat{I} + CO_2 + H_2 + H_2O) = N_2 \quad (16)$$

Решая совместно шесть уравнений (4), (7), (11), (12), (14) и (15), определим состав газа и выход его из 1 кг топлива.

Для упрощения дальнейших преобразований введем следующие обозначения: $CO = x$; $CO_2 = y$; $H_2 = z$; $H_2O = u$ и $N_2 = n$.

С учетом введенных обозначений, указанные уравнения можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 1) \quad & \frac{1,867 \tilde{N}_A^\circ}{V_{A,\bar{A}}} = \delta + \delta'; \\
 2) \quad & \frac{11,2 \cdot H^P}{V_{A,\bar{A}}} + \frac{1,214 \cdot W^P}{V_{A,\bar{A}}} = z + y; \\
 3) \quad & \frac{0,7 \cdot O^P}{V_{A,\bar{A}}} + \frac{0,622 \cdot W^P}{V_{A,\bar{A}}} + 0,266 \cdot N_2 = y + 0,5(x + u); \\
 4) \quad & K_p = \frac{x \cdot u}{y \cdot z}; \\
 5) \quad & \frac{Q_i^\circ}{V_{A,\bar{A}}} \eta_{\bar{A}} = 30,5 \cdot x + 25,7 \cdot z; \\
 6) \quad & 100 - (x + y + z + u) = n.
 \end{aligned}$$

Решение данной системы уравнений ведём в следующем порядке.

Из первого уравнения:

$$y = \frac{1,867 \tilde{N}_A^\circ}{V_{A,\bar{A}}} - x. \quad (17)$$

Из пятого уравнения:

$$z = \frac{Q_i^\circ}{V_{A,\bar{A}} \cdot 25,7} \eta_{\bar{A}} - \frac{30,5}{25,7} x. \quad (18)$$

Вычитая из пятого уравнения второе, находим:

$$\frac{Q_i^\circ}{V_{A,\bar{A}} \cdot 25,7} \eta_{\bar{A}} - \frac{11,2 \cdot H^P}{V_{A,\bar{A}}} - \frac{1,214 \cdot W^P}{V_{A,\bar{A}}} = \frac{30,5}{25,7} x - u. \quad (19)$$

Преобразуем третье уравнение. Для этого нужно умножить правую и левую части на 2, заменить в правой части y по уравнению (17), а в левой части n по шестому уравнению, исключая из него $x + y$ и $z + u$ согласно первому и второму уравнениям, и затем сложить производное уравнение с уравнением (19).

Тогда получим:

$$\frac{1,4 \cdot O^P}{V_{A,\bar{A}}} + 53,2 - \frac{0,622 \cdot W^P}{V_{A,\bar{A}}} - \frac{4,72 \cdot \tilde{N}_A^\circ}{V_{A,\bar{A}}} - \frac{17,2 \cdot H^P}{V_{A,\bar{A}}} + \frac{Q_i^\circ}{V_{A,\bar{A}} \cdot 25,7} \eta_{\bar{A}} = \frac{30,5}{25,7} x - x.$$

Отсюда

$$x = \frac{0,0389 \cdot Q_i^\circ \cdot \eta_{\bar{A}} + 1,4 \cdot O^P - 4,72 \cdot C_A^\circ - 17,2 \cdot H^P - 0,622 \cdot W^P + 53,2 \cdot V_{A,\bar{A}}}{0,186 \cdot V_{A,\bar{A}}}. \quad (20)$$

Из уравнения (19) определим u и подставим его значение и значения y и z по уравнениям (17) и (18) в четвертое уравнение.

Тогда

$$K_p = \frac{x \cdot v_{A.A.} \cdot [25,7(11,2 \cdot H^p + 1,214 \cdot W^p) + 30,5 \cdot x \cdot v_{A.A.} - Q_i \cdot \eta_A]}{(1,867\tilde{N}_A^{\delta} - x \cdot v_{A.A.}) \cdot (Q_i^{\delta} \cdot \eta_A - 30,5 \cdot x \cdot v_{A.A.})},$$

отсюда получаем квадратное уравнение относительно $x \cdot v_{в.г.}$:

$$x^2 \cdot v_{B.T.}^2 \cdot 30,5(K_p - 1) - x \cdot v_{B.T.} [30,5 \cdot 1,867C_D^p \cdot K_p + Q_n^p \cdot \eta_r (K_p - 1) + 25,7(11,2 \cdot H^p + 1,214 \cdot W^p)] + Q_n^p \cdot \eta_r \cdot 1,867C_D^p \cdot K_p = 0. \quad (21)$$

Для решения этого уравнения, примем, что

$$r = x \cdot v_{A.A.}. \quad (22)$$

Тогда уравнение (19) можно записать в следующем виде:

$$r^2 \cdot 30,5(K_p - 1) - r \cdot [30,5 \cdot 1,867C_D^p \cdot K_p + Q_n^p \cdot \eta_r (K_p - 1) + 25,7(11,2 \cdot H^p + 1,214 \cdot W^p)] + Q_n^p \cdot \eta_r \cdot 1,867C_D^p \cdot K_p = 0. \quad (23)$$

После определения r из уравнения (23), получим два уравнения (20) и (22) с двумя неизвестными, позволяющее сначала определить x и $v_{в.г.}$, а затем и все остальные неизвестные.

Таким образом, определив значения количества составляющих CO , H_2O , CO_2 и H_2 , можно сделать вывод о качестве получаемого синтез-газа. Следовательно, по результатам расчетов можно подобрать наиболее оптимальный вид исходного топлива для газогенератора – жидкого или твердого (дрова, древесный уголь, каменный уголь, бурый уголь, кокс, топливные пеллеты).

Дальнейшим этапом исследований является расчет количества метана, входящего в состав синтез-газа, что также влияет на эффективность работы газопоршневого энергетического комплекса.

Поступила: 14.12.23; рецензирована: 28.12.23; принята: 15.01.24.

Литература

1. Разуваев А.В. Актуальность энергетической безопасности объектов различной инфраструктуры / А.В. Разуваев, Н.В. Краснолудский, Д.А. Костин // Современные технологии и автоматизация в технике, управлении и образовании. Сб. тр. V межд. научно-практич. конф. Балаково, 15 декабря 2022 г. Балаковский инженерно-технологический ин-т (филиал) Национального исследовательского ядерного ун-та «МИФИ». Том I. Балаково: Нац. исслед. ядерный ун-т «МИФИ». Балаковский инженерно-технологический ин-т, 2023. С. 138–145.
2. Киприянов Ф.А. Использование газогенератора совместно с электростанцией / Ф.А. Киприянов // Современная техника и технологии. 2017. № 3. URL: <https://technology.snauka.ru/2017/03/12525> (дата обращения: 03.12.2023).
3. Газогенераторы как источники возобновляемого топлива / А.В. Разуваев, Д.А. Костин, И.О. Кудашева, Е.Д. Фролов // Современные технологии и автоматизация в технике, управлении и образовании: сб. трудов V межд. научно-практ. конф. Балаково, 15 декабря 2022 г. / Балаковский инженерно-технологический ин-т (филиал) Национального исследовательского ядерного ун-та «МИФИ». Том I. Балаково: Нац. исслед. ядерный ун-т «МИФИ». Балаковский инженерно-технологический ин-т, 2023. С. 131–138.
4. Алешина А.С. Газификация твердого топлива: учеб. пособие / А.С. Алешина, В.В. Сергеев. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. 202 с.