

УДК 662.76: [662.63 + 620.92]

ГАЗОГЕНЕРАТОРНЫЕ ПЛИТЫ НА БИОМАССЕ****В.П. Клюс, С.В. Клюс, Н.М. Жовмир, А.Г. Дидковская***Институт возобновляемой энергетики НАН Украины
д. 20А, ул. Гната Хоткевича, Киев, 02094, Украина
тел./факс: (044) 206-28-09; e-mail: biomassa@ukr.net

doi: 10.15518/isjaee.2018.25-30.060-072

Заключение совета рецензентов: 21.06.18 Заключение совета экспертов: 05.07.18 Принято к публикации: 19.07.18

Работа относится к области исследований термохимических процессов преобразования биомассы в энергию, в частности, созданию газогенераторных плит на биомассе для приготовления пищи. Благодаря высокой энергоэффективности и экологичности, газогенераторные плиты существенно превосходят традиционные печи прямого сжигания биомассы. Представлен теоретический анализ процессов газификации и горения топлива в плите (в данном случае обращенный микрогазификатор с открытым верхом). Газификация осуществляется в вертикальном микрогазификаторе плотного слоя топлива с зажиганием топлива сверху и подачей воздуха снизу. Термические процессы, протекающие в микрогазификаторе, можно разделить на три этапа: частичная газификация биотоплива, полная газификация полученного биоугля, прямое горение биоугля. Для экспериментальных исследований были созданы пилотные образцы ряда плит с объемом реактора 5,5–9,7 л и проведены их испытания на различных видах биотоплива (пеллеты из древесины хвойных пород, обрезки сосновых пиломатериалов, щепки из древесины лиственных пород, брикеты из соломы, шелуха подсолнечника, шелуха гречихи). В результате испытаний установлено, что КПД плит составляет около 30 %, что примерно в 3 раза больше, чем у традиционных печей прямого сжигания, предназначенных для приготовления пищи, а средняя тепловая мощность газогенераторных плит составила 0,71–1,78 кВт, что соответствует тепловой мощности бытовых плит на природном газе. Расход топлива и удельная интенсивность горения топлива определяются подачей воздуха. Для ориентировочных расчетов можно принять расход топлива 1 кг/час. Удельная интенсивность горения для исследованных видов топлива изменялась в диапазоне 27,5–60,6 кг/(м² · час). Теплоизоляция корпуса плиты позволяет не только существенно сократить тепловые потери в окружающую среду, но и избежать ожогов при случайном прикосновении человека к плите.

Плиты имеют следующие преимущества: экологичность; экономичность; мобильность. Потребителями плит могут быть жители негазифицированных районов, дачники, туристы.

Ключевые слова: плита бытовая; биотопливо; газификация; горение; энергоэффективность; экологичность.

BIOMASS GAS GENERATOR STOVES***V.P. Klius, S.V. Klius, N.M. Zhovmir, A.G. Didkovska***The Institute of Renewable Energy of Ukraine National Academy of Sciences
20A Gnata Chotkevicha str., Kyiv, Ukraine 02094
tel.: (044)206 28 09, e-mail: biomassa@ukr.net

doi: 10.15518/isjaee.2018.25-30.060-072

Referred 21 June 2018 Received in revised form 5 July 2018 Accepted 19 July 2018

The work refers to the field of thermochemical processes of the biomass conversion into energy, in particular to the creation of gas-generator stoves operating on biomass for cooking. In view of the high energy efficiency and environmental friendliness gas-burning stoves significantly exceed the traditional direct combustion biomass kilns. The theoretical analysis of the processes of gasification and combustion of fuel flowing in the stove is considered. The

*Клюс В.П., Клюс С.В., Жовмир Н.М., Дидковская А.Г. Газогенераторные плиты на биомассе // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE), 2018;25-30:60-72.



stove is considered as a reversed microgasifier with an open top. Gasification is carried out in a vertical microgasifier of a dense layer of fuel with fuel ignition from above and air supply from below. The thermal processes taking place in the microgasifier can be divided into three stages: partial gasification of biofuel, complete gasification of the biochar obtained, direct combustion of the biochar. The pilot samples of a number of stoves with a reactor volume of 5.5 to 9.7 liters were made and pilot tests were carried out for the various types of biofuel (pellets from softwood, trimmed pine saw-timbers, wood chips from hardwood, briquettes from straw, sunflower husks, buckwheat husks).

As a result of the tests it was found that the efficiency of the stoves is about 30% which is approximately 3 times more than that of traditional direct combustion furnaces, and the average thermal power of the gas-generator stoves was 0.71–1.78 kW which corresponds to the thermal power of household stoves operating on natural gas. The fuel consumption and the specific burning rate of the fuel are determined by the air supply. For approximate calculations, you can take a fuel consumption of 1 kg / hour. The specific intensity of combustion for the tested fuels varied in the range 27.5–60.6 kg / (m² · h). The use of the thermal insulation of the hull makes it possible not only to reduce significantly heat losses to the environment but also to avoid burns if the person touches the stove accidentally.

The stoves have the following advantages: ecological compatibility; the economy; mobility.

Prospective consumers of stoves are the residents of non-gasified areas, summer residents, tourists.

Keywords: household stove, biofuel, gasification, combustion, energy efficiency, ecological compatibility.



Владимир Павлович Ключ
Volodymyr Klius

Сведения об авторе: канд. техн. наук, старший научный сотрудник, зав. отделом возобновляемых органических энергоносителей ИВЭ НАН Украины.

Образование: Московский институт химического машиностроения (1971 г.).

Область научных интересов: биоэнергетика; переработка органических отходов.

Публикации: 86, в том числе 28 патентов.
ORCID: 0000-0001-8536-3211

Information about the author: Ph.D. in Engineering, Senior Researcher, Head of Department of Renewable Organic Energy Carriers, IRE NAS of Ukraine.

Education: Moscow Institute of Chemical Engineering, 1971.

Research interests: bioenergy; organic waste processing.

Publications: 86, including 28 patents.
ORCID: 0000-0001-8536-3211



Сергей Владимирович Ключ
Sergiy Klius

Сведения об авторе: канд. техн. наук, старший научный сотрудник отдела возобновляемых органических энергоносителей ИВЭ НАН Украины.

Образование: Сумской государственный университет (2010 г.).

Область научных интересов: биоэнергетика; биоуголь; газификация.

Публикации: 17, в том числе 4 патента.
ORCID: 0000-0002-5804-4925

Information about the author: Ph.D. in Engineering, Senior Researcher, Department of Renewable Organic Energy Carriers, IRE NAS of Ukraine.

Education: Sumy State University, 2010.

Research interests: bioenergy; biocoal; gasification.

Publications: 17, including 4 patents.
ORCID: 0000-0002-5804-4925



Николай Михайлович Жовмир
Mykola Zhovmir

Сведения об авторе: канд. техн. наук, старший научный сотрудник отдела возобновляемых органических энергоносителей ИВЭ НАН Украины, доцент кафедры возобновляемых источников энергии Киевского политехнического института.

Образование: Киевский политехнический институт (1980 г.).

Область научных интересов: теплоэнергетика; биоэнергетика; сжигание и термохимическая переработка биомассы.

Публикации: 100, в том числе 7 патентов.
ORCID: 000-0001-6514-7474

Information about the author: Ph.D. in Engineering, Senior Researcher at the Department of Renewable Organic Energy Carriers, IRE NAS of Ukraine, Associate Professor of the Department of Renewable Energy Sources of Kyiv Polytechnic Institute.

Education: Kyiv Polytechnic Institute, 1980.

Research interests: thermal power engineering; bioenergetics; combustion and thermochemical processing of biomass.

Publications: 100, including 7 patents.
ORCID: 000-0001-6514-7474





Анна Георгиевна
Дидковская
Anna Didkovska

Сведения об авторе: канд. техн. наук, научный сотрудник отдела возобновляемых органических энергоносителей ИВЭ НАН Украины.

Образование: Национальный авиационный университет (2002 г.).

Область научных интересов: нетрадиционная энергетика; биоэнергетика.

Публикации: 30, в том числе 1 патент.
ORCID: 0000-0002-8314-9606

Information about the author: Ph.D. in Engineering, Researcher of the Department of Renewable Organic Energy Carriers, IRE NAS of Ukraine.

Education: National Aviation University, 2002.

Research interests: non-traditional energy; bioenergy.

Publications: 30, including 1 patent.
ORCID: 0000-0002-8314-9606

1. Введение

Почти половина населения планеты для приготовления пищи сжигает древесину и растительные отходы на открытом огне или в печах типа «буржуйка». Дым, сажа, окись углерода, выделяющиеся при горении, воздействуют на дыхательные пути и являются такими же вредными, как и дым от курения. Наиболее подвержено воздействию бытового дыма население развивающихся стран, особенно женщины, занимающиеся приготовлением пищи. По данным организации «Глобальный альянс чистых кухонных плит» ежегодно в мире от заболеваний, вызванных бытовым дымом, умирает 4 млн человек [1]. Кроме того, печи типа «буржуйка» имеют низкий

КПД (8 ÷ 12 %), что приводит к расходованию большого количества биомассы, нехватка которой наблюдается в некоторых странах Африки [2].

Поиски новых технологий чистого сжигания биомассы в бытовых печах ведутся по двум направлениям: либо совершенствование конструкций классических печей прямого сжигания биомассы (например, оборудование фирм DUVAL (Франция), TEVA (Турция), KALVIS (Литва) и др.); либо создание бытовых плит, в которых используется новый способ газификации топлива, известный как TLUD-газификация [3]. Аппарат TLUD-газификации представляет собой микрогазификатор – плиту, в которой реализуется обращенный процесс частичной или полной газификации биомассы (рис. 1 и 2).

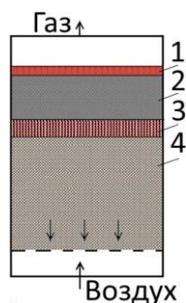


Рис. 1 – Схема процесса частичной газификации
1 – зона розжига топлива; 2 – слой биоугля;
3 – зона горения; 4 – слой биотоплива

Fig. 1 – The scheme of partial gasification process:
1 – fuel ignition zone; 2 – biochar layer; 3 – combustion zone;
4 – biofuel layer



Рис. 2 – Газификации пеллет в реакторе из кварцевого стекла

Fig. 2 – The pellets gasification in quartz glass reactor

Газогенераторные плиты получили распространение в странах с жарким климатом (Юго-Восточная Азия, Африка, Латинская Америка), в которых пищу готовят в основном на открытом воздухе. Среди создателей плит можно выделить Paul S. Anderson (США) и Alexis T. Belonio (Филиппины). В газогенераторных плитах происходит предварительная газификация биотоплива, а затем сжигание горючего газа, в результате эти плиты являются более экологичными и энергоэффективными. Правительства ряда стран (Китай, Индия, Бангладеш) поощряют использование газогенераторных плит как средства, позволяющего снизить воздействие вредного бытового дыма на людей и сократить расходование биомассы на приготовление пищи.

Потребность в газогенераторных плитах существует и в европейских странах, особенно в странах бывшего СССР. Прежде всего, в этих плитах нуждаются жители негазифицированных районов, а также потребители, которые по экономическим причинам вынуждены переходить с дорогого газа на местные виды топлива. Кроме того, газогенераторные плиты могут использоваться дачниками, туристами и другими потребителями. Следует отметить, что при замене газа биомассой сократятся выбросы парниковых газов, что приведет к улучшению экологической ситуации на местности.

В последние годы украинскими учеными проведены экспериментальные и теоретические исследования газификации биотоплива в газогенераторах с

подвижной зоной газификации. Определены основные характеристики процесса слоевой газификации: интенсивность газификации, скорость движения зоны горения, температура в зоне горения, выход биоугля, состав и теплота сгорания горючего газа, КПД процесса и др. [4–13]. Однако эти характеристики относятся к закрытым газогенераторам. Данных о работе микрогазификаторов с открытым верхом (газогенераторных плит) в русскоязычной литературе не найдено. В англоязычной литературе имеются

лишь отрывочные данные, полученные при газификации рисовой шелухи и других специфических видов топлива [3].

В Институте возобновляемой энергетики НАН Украины впервые в отечественной практике были разработаны газогенераторные плиты на биомассе, предназначенные для работы в странах с умеренным и холодным климатом. Настоящая статья посвящена исследованию новых конструкций газогенераторных плит.

Список обозначений	
<i>Буквы латинского алфавита</i>	
c_1	Удельная теплоемкость воды
c_2	Удельная теплоемкость металла кастрюли
m	Масса кастрюли с водой
m_1	Масса воды в кастрюле
m_2	Масса кастрюли с крышкой
m_3	Масса топлива, загруженного в плиту
t_1	Начальная температура воды в кастрюле
t_{2max}	Максимально достигнутая температура воды в кастрюле
Q_i	Нижняя теплота сгорания используемого топлива
\bar{Q}	Средняя полезная тепловая мощность плиты
Q	Средняя затрачиваемая тепловая мощность плиты по энергии израсходованного топлива
V_i	Расход газа
<i>Буквы греческого алфавита</i>	
η	КПД плиты
τ_{max}	Время нагрева воды
<i>Индексы нижние</i>	
1, 2, 3	Порядок обозначений
i	Текущее значение
max	Максимальное значение

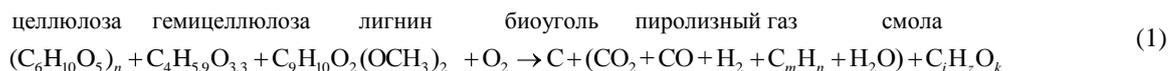
2. Теоретическая часть

Газификация осуществляется в вертикальном микрогазификаторе плотного слоя топлива с зажиганием топлива сверху и подачей воздуха снизу. Термическая обработка частиц биотоплива осуществляется в зоне горения летучих веществ, которая движется вниз навстречу потоку воздуха, поэтому данную технологию ряд авторов называет «газификация с обратной тепловой волной» [6, 7, 14–17]. Тепловая волна перемещается примерно с постоянной скоростью по неподвижному слою биотоплива от сечения, где осуществляется зажигание. Через определенное время эта волна достигает противоположного сечения (колосниковой решетки), через которое в микрогазификатор вводится дутье. Если в этот момент не

прекратить подачу воздуха, то происходит зажигание образовавшегося биоугля, и волна начинает двигаться в обратном направлении в режиме полной газификации с прямым дутьем [18, 19].

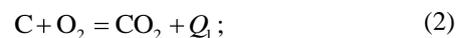
При уменьшении количества биоугля в реакторе увеличивается избыток воздуха, поэтому процесс газификации постепенно переходит в прямое горение оставшегося биоугля. После его завершения на колосниковой решетке остается только зола. Таким образом, термические процессы, протекающие в микрогазификаторе, проходят в три этапа: частичная газификация биотоплива, полная газификация полученного биоугля, прямое горение биоугля.

Процесс термического разложения биомассы можно выразить следующим схематическим уравнением:

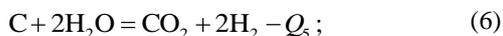
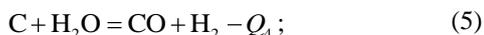


Механизм взаимодействия биоугля с газами до настоящего времени не имеет однозначной трактовки [20, 21]. При описании химического реагирования углерода с газами обычно ограничиваются следующими реакциями [22, 23]:

– окислительными:



– восстановительными:



В газовой фазе возможно протекание таких реакций, как:



Образовавшийся по этим реакциям газ частично сгорает в реакторе, чем обеспечивается автотермичность процесса. Оставшийся газ сжигается в горячем состоянии в горелке или поступает на охлаждение для подачи потребителям в холодном состоянии.

3. Экспериментальная часть

3.1. Создание плит

Были созданы пилотные образцы газогенераторных плит (рис. 3). Стоимость плит составила 50 ÷ 200 дол. США.



Рис. 3 – Фотография газогенераторных плит
Fig. 3 – The photography of the gas generator stoves

В табл. 1 представлены технические характеристики плит.

Технические характеристики плит
The technical specifications of the stoves

Таблица 1

Table 1

Параметры	«Вогник С»	«Вогник В»	«Вогник 1В»	«Вогник 2В»	«Таня»
1. Объем реактора, л	5,5	4,3	9,0	9,4	2x9,7
2. Диаметр реактора, мм	170	150	150	190	150
3. Высота реактора, мм	180	245	500	330	550
4. Вид топлива	пеллеты, щепа, гранулы, дрова				
5. Фракция топлива, мм	5–25	5–25	5–25	5–200	5–200
6. Влажность топлива, %	≤ 20	≤ 30	≤ 30	≤ 30	≤ 30
7. Загрузка топлива, кг	≤ 3,6	≤ 2,8	≤ 5,8	≤ 6,1	≤ 2x6,3
8. Подача воздуха	самотяга				
9. Вес (без топлива), кг	3,5	6,5	8,0	11,0	20,0

Плиты различаются размерами реактора микрогазификатора. Плита «Таня» имеет 2 реактора и выполнена в корпусе газовой плиты советского производства.

На рис. 4 представлена принципиальная схема плиты «Вогник В», конструкция которой запатентована [14].

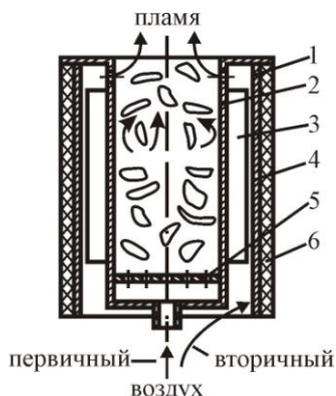


Рис. 4 – Схема плиты «Вогник В»: 1 – корпус; 2 – реактор; 3 – пластины радиатора; 4 – щелевой канал; 5 – колосниковая решетка; 6 – теплоизоляция

Fig. 4 – The scheme of the stove “Vognyk B”: 1 – furnace body; 2 – reactor; 3 – radiator plates; 4 – slot channel; 5 – fire grate; 6 – thermal insulation

Отличительными особенностями конструкции плиты являются: установка пластин радиатора на реакторе; установка теплоизоляции на корпусе; установка в реакторе колосниковой решетки. В результате этих усовершенствований больше нагревается вторичный воздух, поступающий на сжигание газа. Известно, что при нагревании воздуха, поступающего на сжигание, увеличивается температура пламени, а следовательно, возрастает КПД. Выполнение дна реактора сплошным и установка внутри колосниковой решетки позволяют организовать принудительную подачу воздуха в реактор от вентилятора. Таким образом, в плите можно использовать влажное топливо мелкой фракции ($5 \div 7$ мм), обладающее большим гидравлическим сопротивлением, которое невозможно газифицировать за счет самотяги. Благодаря наличию теплоизоляции плита может функционировать и зимой.

Плита работает следующим образом. В реактор загружается топливо, например щепа, и зажигается

сверху. Под колосниковую решетку подается воздух от воздуходувки. Образуется зона горения летучих веществ топлива, которая движется вниз. Большая часть образовавшегося газа поднимается вверх, где смешивается с вторичным воздухом, который благодаря самотяге проходит через щелевой канал, подогревается и входит в реактор через кольцевой пояс отверстий. Возле этих отверстий внутри реактора происходит сжигание газа. На стадии окислительного пиролиза пламя имеет желто-оранжевую окраску, а на стадии газификации биоугля – голубую, с небольшой примесью оранжевого.

3.2. Методика испытания плит

Методика испытания плиты с целью определения КПД заключается в сжигании навески топлива с заранее определенными техническими характеристиками для нагрева кастрюли с водой, масса которых известна, с измерением начальной и максимально достигнутой температурой воды. При разработке методики испытания бытовых газогенераторных плит ориентировались на требования [24] к испытанию бытовых газовых плит.

Для проведения испытаний плит были заготовлены пеллеты из древесины хвойных пород, обрезки сосновых пиломатериалов, щепа из древесины лиственных пород, брикеты цилиндрические соломенные, шелуха семян подсолнечника и гречихи.

Пробы топлива для определения содержания влаги и золы отбирали в соответствии со стандартом [25], содержание общей влаги определяли в соответствии с требованиями [26], содержание золы в сухой аналитической пробе – по [27] и пересчитывали на содержание золы в рабочей массе топлива.

Низшую теплоту сгорания топлива оценивали расчетным методом, используя справочные данные о низшей теплоте сгорания при известном содержании влаги и золы для древесины хвойных пород, древесины лиственных пород и соломы [28], шелухи семян подсолнечника и гречихи [29]. Расчет производили с помощью экспериментально установленных авторами данной статьи значений содержания общей влаги и золы по зависимости, рекомендованной в [30]. Полученные технические характеристики использованных видов топлива приведены в табл. 2.

Таблица 2

Технические характеристики топлив, использованных при испытании плит

Table 2

The technical specifications of the fuels used at the tests of domestic stoves

Вид топлива	Размеры частиц топлива, (мм)	Содержание влаги, (% вес.)	Зольность, (% вес.)	Низшая теплота сгорания, (кДж/кг)
Пеллеты из древесины хвойных пород	6x(3 ÷ 40)	8,98	0,69	17 090
Обрезки сосновых пиломатериалов	10x40x(50 ÷ 150)	7,68	0,40	17 420
Щепа из древесины лиственных пород	(5 ÷ 10)x10x(1 ÷ 2)	12,73	1,25	15 990
Брикеты из соломы	Ø80x80	11,05	7,75	14 780
Шелуха подсолнечника	2x8x0,5	11,75	3,50	16 010
Шелуха гречихи	3x3x0,5	8,73	1,91	16 560

Испытания плит проводили под навесом, имеющим ограждения с трех сторон, что обеспечивает защиту плиты от нарушения горения из-за порывов ветра, рассеивание продуктов сгорания в атмосферном воздухе и предотвращает ухудшение качества воздуха в зоне нахождения людей. Температура атмосферного воздуха во время испытаний составляла $16 \div 18$ °С.

Перед испытанием топливник плиты и колосниковую решетку очищали от остатков топлива и золы после предыдущего эксперимента и давали возможность остыть до температуры окружающего воздуха. Плиту устанавливали на ровную площадку с твердым основанием, обеспечивая вертикальное положение ее корпуса.

Для проведения испытаний готовили навески топлива по 0,250 кг для загрузки в плиты «Вогник С» и «Вогник В» и 1,000 кг для плиты «Вогник 2В» со

взвешиванием на весах типа SF-400 с дискретностью 1 г. Топливо перемешивали и распределяли по поверхности колосниковой решетки горстями, не допуская падения топлива для предотвращения уплотнения слоя и сегрегации частиц по размеру.

Топливо в плите разжигали с помощью порции запального дизельного топлива ($3 \div 5$ г), открывали заслонку на патрубке входа воздуха и включали дутьевой вентилятор. После того, как пламя занимало около половины площади слоя биотоплива, устанавливали опорную решетку и на нее ставили кастрюлю с водой.

Наружная поверхность кастрюли должна быть сухой и чистой, не допускается наличие отложений смол и сажи. На внутренней поверхности не должно быть накипи. Для испытаний использовали малую и большую кастрюли, характеристики которых приведены в табл. 3.

Характеристики кастрюль, использованных при испытании плит

Таблица 3

Table 3

The characteristics of pots used at the tests of the domestic stoves

Шифр кастрюли	Материал кастрюли и крышки	Размеры кастрюли, мм			Масса кастрюли с крышкой, кг	Максимальная масса воды в кастрюле, кг
		Диаметр внутренний	Высота	Толщина стенки		
малая	алюминий	246	85	2	0,864	3,9
большая	нерж. сталь	270	325	1	2,419	18,3

В крышке кастрюли имеется отверстие диаметром 3,5 мм для установки термопары типа К, выполненной в корпусе из нержавеющей стали диаметром 3 мм с длиной погружаемой части 200 мм, что обеспечивает возможность размещения конца термопары близко к середине толщ воды. Термопара компенсационным проводом подключена к цифровому милливольтметру типа DT838 с индикацией результата измерения с дискретностью 1 °С. Схема измерения милливольтметра учитывает температуру холодных концов термопары.

В малую кастрюлю, которую использовали при испытаниях плит «Вогник С» и «Вогник В», заливали $3,200 \div 3,300$ кг воды, а в большую кастрюлю, которую применяли при испытаниях плиты «Вогник 2В», заливали от 12,000 кг до 15,500 кг. Температура заливаемой холодной воды составляла $16 \div 18$ °С. В ходе предварительных экспериментов массу воды в кастрюле подбирали такой, чтобы при выгорании загруженной навески топлива максимальная температура воды составляла около $90 \div 95$ °С. При этом время горения топлива и температуру воды измеряли сразу после установки кастрюли на плиту и далее через каждые 3 мин до завершения роста температуры.

Плиты «Вогник С» и «Вогник В» также испытывали при их установке на открытом пространстве между зданиями. Воду нагревали в большой кастрюле, в которую заливали 12 кг воды с температурой 25 °С. Вес загруженного топлива составлял: пел-

леты – 0,700 кг; щепа – 0,550 кг; шелуха гречихи – 0,685 кг; шелуха подсолнечника – 0,413 кг. Во время испытаний температура атмосферного воздуха составляла $25 \div 30$ °С. При этом порывы ветра достигали $2 \div 5$ м/с и срывали пламя над плитой, однако после прекращения порывов ветра пламя над плитой восстанавливалось самостоятельно, без вмешательства человека.

3.3. Методика обработки экспериментальных данных.

Расчет коэффициента полезного действия плит

Коэффициент полезного действия плиты η определяли как отношение полезно использованной теплоты на нагревание кастрюли и содержащейся в ней воды к энергии потребленного топлива. Расчет производили с помощью полученных экспериментальных данных по зависимости:

$$\eta = \frac{(c_1 m_1 + c_2 m_2)(t_{2\max} - t_1)}{m_3 Q_i} 100\%, \quad (12)$$

где c_1 – удельная теплоемкость воды, кДж/(кг°С); c_2 – удельная теплоемкость металла кастрюли, кДж/(кг°С); m_1 – масса воды в кастрюле, кг; m_2 – масса кастрюли с крышкой, кг; m_3 – масса топлива,



загруженного в плиту, кг; t_1 – начальная температура воды в кастрюле, °C; t_{2max} – максимальная достигнутая температура воды в кастрюле, °C; Q_i – низшая теплота сгорания используемого топлива, кДж/кг.

3.4. Определение тепловой мощности

Среднюю полезную тепловую мощность плиты \bar{Q} рассчитывали как тепловую мощность, полезно воспринимаемую нагреваемой кастрюлей с водой за период времени от установки кастрюли на плиту до момента достижения водой максимальной температуры по зависимости:

$$\bar{Q} = \frac{(c_1 m_1 + c_2 m_2)(t_{2max} - t_1)}{\tau_{max}}, \text{ кВт}, \quad (13)$$

где τ_{max} – продолжительность периода времени от установки кастрюли на плиту до достижения водой максимальной температуры, с.

Текущую полезную тепловую мощность плиты определяли как среднюю тепловую мощность, полезно воспринимаемую нагреваемой кастрюлей с водой за каждый период между измерениями температуры воды.

Обычно газовые плиты характеризуются затрачиваемой тепловой мощностью, то есть мощностью, которая рассчитывается как количество выделенного тепла от сгорания топлива, отнесенное ко времени работы плиты. Применительно к газогенераторным плитам из-за неравномерности горения топлива можно определять среднюю затрачиваемую тепловую мощность плиты по энергии израсходованного топлива:

$$Q = \frac{m_3 Q_i}{\tau_{max}}, \text{ кВт}. \quad (14)$$

Следует отметить, что в момент достижения водой в кастрюле максимальной температуры горение топлива в газогенераторной плите еще не завершалось – наблюдалось свечение коксового остатка, однако тепловосприятие нагретой кастрюли было уже меньше ее тепловых потерь, что и обуславливает снижение температуры воды при продолжении эксперимента.

4. Результаты эксперимента

Полученные данные о коэффициентах полезного действия и средней затрачиваемой тепловой мощности (по энергии использованного топлива) для испытанных плит приведены в табл. 4.

Таблица 4
Коэффициент полезного действия и средняя затрачиваемая тепловая мощность газогенераторных плит

Table 4
Coefficient of efficiency and average thermal power of gas-generating stoves

Вид топлива	Плита «Вогник С»				Плита «Вогник В»				Плита «Вогник 2 В»	
	А		Б		А		Б		А	
	η , %	Q , кВт	η , %	Q , кВт	η , %	Q , кВт	η , %	Q , кВт	η , %	Q , кВт
Пеллеты из древесины хвойных пород	27,9	2,90,82	23,4	3,90,92	25,4	3,00,75	23,0	5,61,29	28,1	6,31,78
Щепа из древесины лиственных пород	12,8*	5,50,71	–	–	25,8	3,20,82	24,7	6,41,57	30,8	4,41,37
Шелуха подсолнечника	–	–	–	–	–	–	28,5	3,50,99	26,0**	5,61,45
Шелуха гречихи	–	–	–	–	–	–	29,5	3,91,16	–	–
Обрезки сосновых пиломатериалов	–	–	–	–	–	–	–	–	25,6	5,21,33
Брикет соломенный с растопочной щепой	–	–	–	–	–	–	–	–	21,2***	4,81,01

Примечания: А – испытания под навесом; Б – испытания на открытом воздухе; * – нарушение процесса из-за недостаточной тяги; ** – нарушение процесса из-за кратерного горения; *** – нарушение процесса из-за ограниченной диффузии воздуха в тело брикета.

На рис. 5 представлены графики изменения текущей полезной тепловой мощности плит, на рис. 6 – графики нагревания воды на плите «Вогник 2 В». В плитах периодического действия конечная температура воды определяется соотношением массы использованного топлива и массы воды в кастрюле. При большой загрузке топлива вода может закипать,

что демонстрируется кривой 1 на рис. 6. Последующее снижение температуры достигалось за счёт добавления в кастрюлю дополнительной порции холодной воды, и после локального минимума наблюдалось дальнейшее повышение температуры до завершения эксперимента. Все другие эксперименты проводились при меньшей загрузке топлива в плиту.

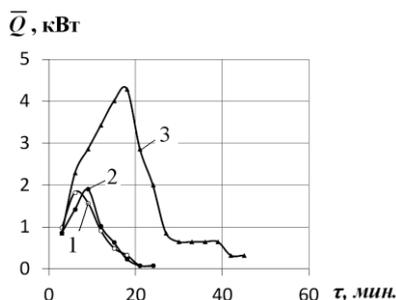


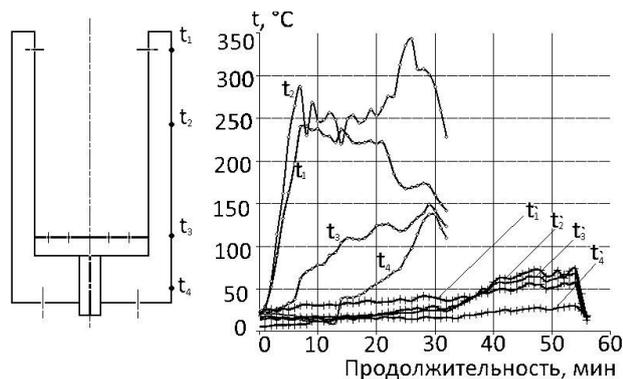
Рис. 5 – Текущая полезная тепловая мощность плит при испытаниях под навесом:
1 – плита «Вогник С»; 2 – плита «Вогник В»;
3 – плита «Вогник 2В»

Fig. 5 – The change of the current heat output of domestic pyrolytic stoves during burning of wood pellets charge under the shed:
1 – the small pyrolytic stove “Vognyk C”; 2 – the small pyrolytic stove “Vognyk B”; 3 – the large pyrolytic stove “Vognyk 2B”

По результатам испытаний интенсивность горения топлив составила: пеллеты – $27,5 \div 47,1$ кг/(м²·час); обрезки сосновых пиломатериалов – $38,0 \div 65,0$ кг/(м²·час); щепа – $31,5 \div 60,6$ кг/(м²·час); брикеты из соломы – $38,7 \div 62,0$ кг/(м²·час); шелуха семян подсолнечника – $33,1 \div 48,2$ кг/(м²·час); шелуха гречихи – $35,5 \div 51,4$ кг/(м²·час).

Топливо сгорало полностью до золы за исключением брикетов из соломы. При сжигании соломенных брикетов затруднена диффузия воздуха в тело брикета ввиду его большой уплотненности, поэтому на колосниковой решетке остается около 11 % коксозольного остатка от веса загруженных брикетов.

При испытаниях плит также производили измерения температуры их внешнего корпуса, поскольку это



На графиках видно, что на плите без теплоизоляции максимальная температура нагрева корпуса в разных сечениях изменялась в пределах $140 \div 340$ °С. Такие высокие температуры свидетельствуют о больших тепловых потерях в окружающую среду, а также опасности для людей. При установке теплоизоля-

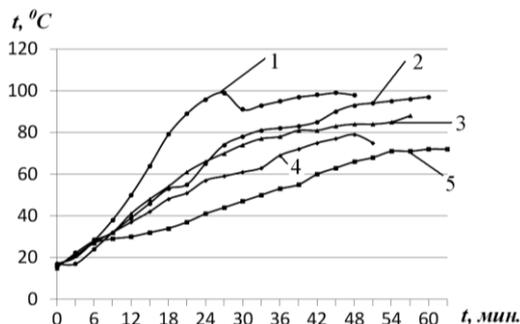


Рис. 6 – Графики нагревания воды на плите «Вогник 2В»: 1 – пеллеты; 2 – щепа; 3 – шелуха подсолнечника; 4 – обрезки сосновых пиломатериалов; 5 – брикеты из соломы

Fig. 6 – The graphs of heating the water on the stove “Vognyk 2B”: 1 – granules; 2 – chips; 3 – sunflower husk; 4 – trimming of pine timber; 5 – straw briquettes

влияет на энергетическую эффективность плит и безопасность их использования.

4.1. Определение температуры стенки корпуса плиты

Температура стенки определялась на плите «Вогник 2В» при ее работе на щепе. Для измерения температуры на боковой стенке плиты закреплялись четыре термопары типа К. Измерения производили для плиты без теплоизоляции и плиты с теплоизоляцией. В качестве теплоизоляции применяли вермикулит диаметром частиц $3 \div 8$ мм. Толщина теплоизоляции составляла 35 мм. На рис. 7 представлены схемы плиты и графики изменения температуры (t_1-t_4) стенки.

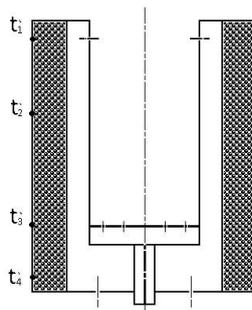


Рис. 7 – Графики изменения температуры стенки плиты «Вогник 2В»: верхние графики – для плиты без теплоизоляции, а нижние – с теплоизоляцией
Fig. 7 – The graphs of the wall temperature change of the stove “Vognyk 2B”: the upper plots are for the slab without heat insulation, and the lower ones are with heat insulation

ции максимальная температура кожуха существенно снизилась – до $40 \div 70$ °С.

4.2. Сравнительная оценка определения КПД бытовой газовой плиты на природном газе

Для сравнения КПД газогенераторной плиты на биотопливе и бытовой на природном газе определял-

ся КПД большой конфорки газовой плиты советского производства «Электа» 1980 г. выпуска. Согласно [24], КПД составляет не менее 52 %. Для испытаний использовали малые конусные и цилиндрические алюминиевые кастрюли с крышками, с максимальной массой воды 3,9 кг (см. табл. 3). В кастрюли заливали по 3 кг воды с температурой 18 °С. Вода нагревалась до температуры 80 °С. Время нагрева составило 12,5 мин. и 13 мин. соответственно, расход газа – 42 л и 41 л соответственно. Расход газа определялся по бытовому счетчику, теплота сгорания газа по данным сайта «Ахтырканафтогаз» составила 35,87 МДж/м³. Вычисление КПД производили по формуле, приведенной в [24]:

$$\eta = 4,186 \cdot 10^{-3} \cdot m \frac{t_{2\max} - t_1}{V_i \cdot Q_i} \cdot 100\%, \quad (15)$$

где ($m = m_1 + 0,213m_2$) – масса кастрюли с водой, кг; V_i – расход газа, м³/час; Q_i – низшая теплота сгорания газа, МДж/м³.

Результаты расчетов КПД для конусной кастрюли составили 41,2 %, для цилиндрической – 41,9 %, то есть форма посуды несущественно влияет на КПД. Значение КПД устаревшей газовой плиты оказалось меньше, чем установлено нормативами для современных газовых плит.

4.3. Обсуждение полученных результатов

Необходимым условием работы газогенераторных плит является надежная фильтрация воздуха через слой топлива в зону горения летучих веществ. Поступление воздуха может осуществляться путем самотяги или принудительно при помощи вентилятора.

Плита «Вогник С» на самотяге удовлетворительно работает на пеллетах. На мелкофракционной щепе происходит нарушение процесса из-за кратерного горения. Поэтому для плит на самотяге рекомендуется использовать те виды топлива, которые имеют однородную фракцию (пеллеты, крупная щепа, скорлупа грецкого ореха, косточки персика, сливы, абрикосы). Кроме того, возможно применение дров, поверх которых засыпается слой крупной щепы. Мелкофракционные виды топлива (опилки, стружка, лузга) в плите «Вогник С» горят плохо.

Плиты «Вогник В» и «Вогник 2В» с принудительной подачей воздуха удовлетворительно работают на всех испытанных видах топлива: топливо сгорает полностью, выход коксозольного остатка составляет 2 ÷ 5 %, за исключением брикетов соломенных, у которых выход коксозольного остатка составил 11 %. В связи с этим сжигание брикетов больших размеров в

этих плитах не рекомендуется ввиду ограниченной диффузии воздуха в тело брикета.

Рассмотрим показатели работы плит.

Расход топлива и удельная интенсивность горения топлива определяются подачей воздуха. Подачу воздуха поддерживали таким образом, чтобы пламя равномерно охватывало поверхность кастрюли. Наименьший расход топлива был у пеллет в плите «Вогник С» (0,625 кг/час), а наибольший – в плите «Вогник В» (1,37 кг/час). Для ориентировочных расчетов расход топлива можно принять равным 1 кг/час.

Удельная интенсивность горения для исследованных видов топлива изменялась в диапазоне 27,5 ÷ 62,0,6 кг/(м² · час). По данным работы [6], такая интенсивность горения соответствует удельному расходу воздуха дутья 25 ÷ 70 м³/(м² · час). В экспериментах расход воздуха не контролировался.

КПД плит на разных видах топлива составил 23,0 ÷ 30,8 %. Как и следовало ожидать, КПД плит на открытом воздухе был несколько меньшим, чем под навесом. Если учесть, что часть энергии топлива расходуется на его газификацию (КПД газификации составляет примерно 90 % [6]), то полученные значения КПД вполне удовлетворительны и на 30 % меньше, чем КПД устаревшей плиты на природном газе. По данным работы [3] КПД газогенераторных плит на рисовой шелухе составляет 21,3–21,6 %, а расход шелухи – 2 кг/час.

Средняя полезная тепловая мощность плит составила: «Вогник С» – 0,71 ÷ 0,92 кВт; «Вогник В» – 0,75–1,57 кВт; «Вогник 2В» – 1,01 ÷ 1,78 кВт. Наибольшая текущая мощность развивается на протяжении первого (30 ÷ 40 %) периода горения топлива. Эти значения мощности соответствуют мощности горелки плиты на природном газе.

Применение теплоизоляции корпуса плиты позволяет не только существенно сократить тепловые потери в окружающую среду, но и избежать ожогов при случайном прикосновении человека к плите. Так, при установке теплоизоляции из вермикулита температура стенки снизилась до 40 ÷ 70 °С.

5. Заключение

Разработаны и исследованы газогенераторные плиты на биомассе, предназначенные для приготовления пищи. Плиты имеют следующие преимущества:

1. Энергоэффективность. КПД плит «Вогник» примерно в 3 раза больше, чем у обычной «буржуйки», а расход топлива – в 3 раза меньше.
2. Экологичность. Генераторный газ сгорает без дыма, сажи и копоти; уменьшается риск респираторных заболеваний.



3. Экономичность. Стоимость и вес плит в 2 ÷ 4 раза меньше, чем «буржуйки»; используется дешевое топливо – отходы биомассы.

4. Мобильность. Плиты переносные; мощность вентилятора составляет 1 ÷ 2 Вт; питание от аккумулятора – 12 V или от сети.

Разработанные отечественные образцы газогенераторных плит на биомассе целесообразно использовать для приготовления пищи на открытом воздухе вместо малоэффективных печей типа «буржуйка».

Список литературы

[1] Глобальный альянс за чистые кулинарные изделия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cleancookstoves.org>. – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 25.01.2018).

[2] Твайделл, Дж. Возобновляемые источники энергии / Дж. Твайделл. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 391 с.

[3] Alexis, T. Belonio. Rice husk gas stove handbook / T. Belonio Alexis. – Philippines: Изд-во Central Philippine University, 2005. – 153 p.

[4] Карп, И.Н. Исследование и внедрение процессов газификации углей и биомассы с целью замещения природного газа [Текст] / И.Н. Карп [и др.] // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2014. – № 4. – С. 3–11.

[5] Кремнева К.В. Повышение эффективности двухстадийного процесса газификации мелкодисперсной биомассы для когенерационных установок малой мощности: Автореф. дис. канд. техн. наук. Днепро, 2015.

[6] Ключ С.В. Энергоэффективное преобразование биомассы в горючий газ и биоуголь в газогенераторах плотного слоя топлива: Автореф. дис. канд. техн. наук. Киев, 2016.

[7] Пьяных К.Е. Развитие научных основ технологий замещения природного газа альтернативными топливами: Автореф. дис. докт. техн. наук. Киев, 2017.

[8] Забарный, Г.Н. Использование растительных отходов для производства энергии [Текст] / Г.Н. Забарный, С.В. Ключ, Д.С. Довженко // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEЕ). – 2011. – № 8. – С. 100–106.

[9] Ключ, С.В. Оценка и прогноз потенциала твердого биотоплива Украины [Текст] / С.В. Ключ, Г.Н. Забарный // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2011. – № 2 (24). – С. 8–13.

[10] Кремнева, Е.В. Разработка энергосберегающей технологии двухстадийной газификации биомассы для когенерационных установок [Текст] / Е.В.

Кремнева // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – № 6/8 (72). – С. 40–47.

[11] Кремнева, Е.В. Исследование процесса пиролиза биомассы в плотном слое с учетом вторичной реакции разложения смолы / Е.В. Кремнева // Техническая теплофизика и промышленная теплоэнергетика: сборник научных трудов. – Днепропетровск, 2011. – Вып. 3. – С. 142–154.

[12] Карп, И.Н. Результаты лабораторных и промышленных испытаний газогенераторов периодического типа действия [Текст] / И.Н. Карп [и др.] // Инженерно-физический журнал. – 2015. – Т. 88. – № 3. – С. 722–729.

[13] Пьяных, К.Е. Газификация как метод переработки отходов [Текст] / К.Е. Пьяных // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2015. – № 2. – С. 12–17.

[14] Пат.122843 Украина, МПК (2017.01) F 24 В 1/00; F 24 С 15/00. Плита бытовая газогенераторная / Ключ В.П., Ключ С.В.; заявитель и патентообладатель Институт возобновляемой энергетики Национальной академии наук Украины. – № u 201708607; заявл. 23.08.2017; опубл. 25.01.2018, Бюл. № 2. – 4 с.

[15] Исламов, С.Р. О новой концепции использования угля [Текст] / С.Р. Исламов // Уголь. – 2007. – № 5. – С. 67–69.

[16] Степанов, С.Г. Технология совмещенного производства полукокса и горючего газа и угля [Текст] / С.Г. Степанов, С.Р. Исламов, А.Б. Морозов // Уголь. – 2002. – № 6. – С. 27–29.

[17] Исламов, С.Р. Энерготехнологическая переработка углей / С.Р. Исламов. – Красноярск: Поликор, 2010. – 224 с.

[18] Исламов С.Р. Энергоэффективное использование бурых углей на основе концепции «Термококс»: Автореф. дис. докт. техн. наук. Красноярск, 2010.

[19] Гроо А.А. Интенсификация процессов тепло- и массообмена при слоевой газификации угля с использованием обратного дутья: Автореф. дис. канд. техн. наук. Новосибирск, 2007.

[20] Померанцев, В.В. Основы практической теории горения / В.В. Померанцев. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 312 с.

[21] Яворский, И.А. Физико-химические основы горения твердых ископаемых топлив и графитов / И.А. Яворский. – Новосибирск: Наука, 1973. – 291 с.

[22] Канторович, Б.В. Основы теории горения и газификации твердого топлива / Б.В. Канторович. – М.: Изд-во АН СССР, 1958. – 593 с.

[23] Лавров, Н.В. Введение в теорию горения и газификации топлива / Н.В. Лавров, А.П. Шурыгин. – М.: Изд-во АН СССР, 1962. – 215 с.



[24] ГОСТ Р 50696-2006. Приборы газовые бытовые для приготовления пищи. Общие технические требования и методы испытаний. – Введ. 2007-01-01. – М.: Стандартинформ, 2006. – 76 с.

[25] ГОСТ Р 54212-2010. Биотопливо твердое. Методы подготовки проб. – Введ. 2012-07-01. – М.: Стандартинформ, 2012. – 15 с.

[26] ГОСТ Р 54186-2010. Биотопливо твердое. Определение содержания влаги высушиванием. Часть 1. Общая влага. Стандартный метод. – Введ. 2012-07-01. – М.: Стандартинформ, 2012. – 7 с.

[27] ГОСТ Р 54185-2010. Биотопливо твердое. Определение зольности. – Введ. 2012-07-01. – М.: Стандартинформ, 2012. – 8 с.

[28] ГОСТ Р 54220-2010. Биотопливо твердое. Технические характеристики и классы топлива. Часть 1. Общие требования. – Введ. 2012-07-01. – М.: Стандартинформ, 2012. – 42 с.

[29] Осьмак, А.А. Растительная биомасса как органическое топливо [Текст] / А.А. Осьмак, А.А. Серегин // Восточно-Европейский журнал передовых технологий (ISSN 1729-3774). – 2014. – Т. 2/8(68). – С. 57–61.

[30] Тепловой расчет котлов (нормативный метод). – 3-е изд. – СПб: Изд-во НПО ЦКТИ, 1998. – 256 с.

References

[1] The Global Alliance for the Clean Culinary Products [E-resource]. Available on: <http://www.cleancookstoves.org>. – The title from the screen (25.01.2018) (in Eng.).

[2] Twidell J., Wear A. Renewable energy sources (Vozobnovlyaemye istochniki energii). Moscow: Energoatomizdat Publ., 1990; 391 p. (in Russ.).

[3] Belonio A.T. Rice husk gas stove handbook. Central Philippine University, 2005; 153 p. (in Eng.).

[4] Karp I.N., Martsevoj E.P., Pianykh K.E., Antoshchuk T.A., Pianykh K.K. An investigation and introduction of gasification processes for coals and biomass with the aim of replacing of natural gas (Issledovanie i vnedrenie processov gazifikatsii uglei i biomassy s tsel'u zameshcheniya prirodnogo gaza). *Energotehnologii i resursosberejenie*, 2014;(4):3–11(in Russ.).

[5] Kremneva K.V. Increasing the efficiency of a two stage gasification process of finely dispersed biomass for cogeneration units of low power (Pidvyshchennja efektyvnosti dvostadijnogo protsesu gazyfikatsii dribnodispersnoi biomasy dlja kogeneratsijnyh ustanovok maloi potuzhnosti): Avtoref. dis. kand. teh. nauk. Dnipro, 2015 (in Ukr.).

[6] Klius S.V. Energy-efficient conversion of biomass into gas fuel and biocoal in dense layer bed gasifier (Energoefektivne peretvorennya biomasy v gorjuchyj gaz i biovugillja v gazogeneratorach shchil'nogo sharu palyva): Avtoref. dis. kand. teh. nauk. Kyiv, 2016 (in Ukr.).

[7] Pianykh K.E. Development of scientific bases of technologies for replacing of natural gas with alternative fuels (Rozvytok naukovykh osnov tekhnologij zamishchennja pryrodnogo gazu alternatyvnymy palyvamy): Avtoref. dis. dokt. teh. nauk. Kyiv, 2017 (in Ukr.).

[8] Zabarny G.N., Klius S.V., Dovzhenko D.S. The use of the plant waste for the energy production (Ispolzovanie rastitelnyh otkhodov dla proizvodstva energii). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*, 2011;(8):100–106 (in Russ.).

[9] Klius S.V., Zabarny G.N. Estimation and forecast of the solid biofuel potential in Ukraine (Otsenka i prognoz potentsiala tvordogo biotopliva Ukrainy). *The compressor and power engineering (Kompresornoje i energeticheskoje mashinostrojenije)*, 2011;2(24):8–13 (in Russ.).

[10] Kremneva E.V. Development of energy-saving technology of bi-phase biomass gasification for cogeneration plants (Razrabotka energosberegayushchei tehnologii dvuhstadiinoi gazifikatsii biomassy dla kogeneratsionnyh ustanovok). *East-European Journal of Advanced Technologies*, 2014;6/8(72):40–47 (in Russ.).

[11] Kremneva E.V. An investigation of the process of pyrolysis of biomass in a dense layer, taking into account the secondary reaction of decomposition of resin (Issledovanie protsessu piroliza biomassy v plotnom sloe s uchotom vtorichnoi reaktsii razlozheniya smoly). *Technical Thermophysics and Industrial Heat Power Engineering: a collection of scientific papers (Technicheskaya teplofizika i promyshlennaya teploenergetika: sbornik nauchnyh trudov)*, 2011;(3):142–154 (in Russ.).

[12] Karp I.N., Pianykh K.E., Antoshchuk T.A., Ly-senko A.A. The results of laboratory and industrial tests of gas generators of periodic type action (Rezultaty laboratornyh i promyshlennyh ispytaniy gazogeneratorov periodicheskogo tipa deistviya). *Engineering and Physics Journal (Inzhenerno-fizicheskii zhurnal)*, 2015;88(3):722–729 (in Russ.).

[13] Pjanykh K.E. Gasification as a method of waste treatment (Gazifikatsiya kak metod pererabotki otkhodov). *Energotehnologii i resursosberejenie*, 2015;(2):12–17 (in Russ.).

[14] Klius V.P., Klius S.V.; the applicant and the patent holder The Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine. Patent



122843 Ukraine, IPC (2017.01) F 24 B 1/00; F 24 C 15/00. The household gas-generator stove (Plita bytovaja gazogeneratornaja) / 2018, Bul. no. 2; 4 p. (in Russ.).

[15] Islamov S.R. On the new concept of coal use (O novoi kontseptsii ispolzovaniya uglya). *Coal (Ugol')*, 2007;(5):67–69 (in Russ.).

[16] Stepanov S.G., Islamov S.R., Morozov A.B. The technology of combined production of semi-coke and combustible gas and coal (Tehnologiya sovmeshchonnogo proizvodstva polukoksa i goryuchego gaza i uglya). *Coal (Ugol')*, 2002;(6):27–29 (in Russ.).

[17] Islamov S.R. The energotechnological processing of coals (Energotechnologicheskaya pererabotka uglei). – Krasnoyarsk: Polikor Publ., 2010; 224 p. (in Russ.).

[18] Islamov S.R. An energy-efficient use of brown coal based on the concept of “Thermocox” (Energoeffektivnoe ispolzovanie buryh uglei na osnove kontseptsii “Termokoks”): Avtoref. dis. dokt. tech. nauk. Krasnoyarsk, 2010 (in Russ.).

[19] Groo A.A. The intensification of heat and mass transfer processes at layer coal gasification using reverse blowing (Intensifikatsiya protsessov teplo- i massoobmena pri sloevoi gazifikatsii uglya s ispolzovaniem obratnogo dut'a): Avtoref. dis. kand. tech. nauk. Novosibirsk, 2007 (in Russ.).

[20] Pomerantsev V.V., Arefiev K.I., Ahmedov D.B. Fundamentals of Practical Combustion Theory (Osnovy prakticheskoi teorii goreniya). Leningrad: Energoatomizdat Publ., 1986; 312 p. (in Russ.).

[21] Yavorsky I.A. The physical and chemical bases of combustion of solid fuels and graphites (Fiziko-himicheskie osnovy goreniya tverdykh iskopaemykh topliv i grafitov). Novosibirsk: Nauka Publ., 1973; 291 p. (in Russ.).

[22] Kantorovich B.V. Fundamentals of the theory of combustion and gasification of solid fuel (Osnovy teorii goreniya i gazifikatsii tverdogo topliva). Moscow: Izd. AN SSSR Publ, 1958; 593 p. (in Russ.).

[23] Lavrov N.V., Shurygin A.P. Introduction to the theory of combustion and gasification of fuel (Vvedenie

v teoriyu goreniya i gazifikatsii topliva). Moscow: Izd. AN SSSR Publ, 1962; 215 p. (in Russ.).

[24] GOST R 50696-2006. Gas domestic appliances for cooking. General technical requirements and test methods (Pribory gazovye bytovye dlya prigotovleniya pishchi. Obshchie tehicheskie trebovaniya i metody ispytaniy). Impl. 2007-01-01. Moscow: Standardinform Publ., 2006; 76 p. (in Russ.).

[25] GOST R 54212-2010. Solid biofuel. The methods of sample preparation (Biotoplivo tverdoe. Metody podgotovki prob). Enter. 2012-07-01. Moscow: Standardinform Publ., 2012; 15 p. (in Russ.).

[26] Solid biofuel. The determination of moisture content by drying. Part 1. Total moisture. Standard method: GOST R 54186-2010 (EN 14774-1: 2009) (Biotoplivo tverdoe. Opredelenie sodержaniya vlagi vysushivaniem. Chast' 1. Obshchaya vlaga. Standartnyi metod: GOST R 54186-2010 (EN 14774-1: 2009). Impl. 2012-07-01. Moscow: Standardinform Publ., 2012; 7 p. (in Russ.).

[27] Solid biofuel. The definition of ash content: GOST R 54185-2010 (EN 14775: 2009) (Biotoplivo tverdoe. Opredelenie zol'nosti: GOST R 54185 - 2010 (EN 14775: 2009). Impl. 2012-07-01. Moscow: Standardinform Publ., 2012; 8 p. (in Russ.).

[28] Solid biofuel. Specifications and fuel classes. Part 1. General requirements: GOST R 54220-2010 (EN 14961-1: 2010) (Biotoplivo tverdoe. Tehicheskie harakteristiki i klassy topliva. Chast' 1. Obshchie trebovaniya: GOST R 54220-2010 (EN 14961-1:2010). Impl. 2012-07-01. Moscow: Standardinform Publ., 2012; 42 p. (in Russ.).

[29] Osmak A.A., Seregin A.A. The vegetable biomass as an organic fuel (Rastitelnaya biomassa kak organicheskoe toplivo). *East European Journal of Advanced Technologies*, 2014;2/8(68):57–61 (in Russ.).

[30] The thermal calculation of boilers (normative method) (Teplovoi raschet kotlov (normativnyi metod). – 3rd ed. SPb: Publishing house of NPO CKTI (Izd-vo NPO CKTI), 1998; 256 p. (in Russ.).

Транслитерация по BSI

