

УДК 661.183.2:662.742

## АППАРАТ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ АКТИВИРОВАННОГО УГЛЯ НА МИНИ-ТЭС

Афанасьева Ольга Валерьевна<sup>1</sup>,  
eccolga@mail.ru

Мингалеева Гузель Рашидовна<sup>1</sup>,  
mingaleeva-gr@mail.ru

<sup>1</sup> Казанский государственный энергетический университет,  
Россия, 420066, Казань, ул. Красносельская, 51.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью разработки технологических решений и аппаратурного оформления производства побочных продуктов на объектах малой распределенной энергетики. Большинство описанных в литературе и представленных на рынке объектов малой энергетики ориентированы на получение тепловой и электрической энергии, т. е. на работу по принципу когенерации. Получение побочных продуктов путем термической переработки твердого топлива позволит оптимизировать систему производства тепловой и электрической энергии на мини-ТЭС, повысить эффективность использования топлива, решить экологические проблемы, а также обеспечить ценными химическими продуктами близлежащие районы и потребителей.

**Цель:** разработать конструкцию и провести расчет аппарата малой мощности для получения активированного угля на мини-ТЭС.  
**Объект:** аппарат малой мощности для получения активированного угля путем термической переработки твердого углеродсодержащего сырья в кипящем слое.

**Методы:** гидродинамический расчет изотермических струй в кипящем слое, тепловой расчет, расчет параметров газораспределительной решетки.

**Результаты.** Разработана конструкция аппарата малой мощности для получения активированного угля на мини-ТЭС. В качестве прототипа установки выбрана конструкция реактора с кипящим слоем. Активатор представляет собой герметичный аппарат с перфорированной газораспределительной решеткой. Для рассматриваемого активатора выбрана наиболее простая перфорированная решетка с вертикальной ориентацией круглых отверстий, вогнутая к центру. Уголь поступает сверху через загрузочный патрубок и распределяется слоем на газораспределительной решетке, подача пара на активацию угля осуществляется в режиме струйного псевдооживления через форсунки. Горячие газы, в качестве которых используются продукты сгорания топлива, подаются под решетку и приводят слой в псевдооживленное состояние. Проведен гидродинамический и тепловой расчет аппарата, а именно определена критическая скорость начала псевдооживления, степень расширения слоя, расход продуктов сгорания, расчет изотермической струи в псевдооживленном слое, определены параметры газораспределительной решетки: длина газового факела струи, площадь живого сечения решетки.

### Ключевые слова:

Объект малой распределенной энергетики, твердое топливо, побочные продукты, активированный уголь, активатор.

### Введение

Объекты малой распределенной энергетики – мини-ТЭС, производящие тепловую и электрическую энергию, являются оптимальным вариантом для обеспечения собственных нужд потребителей в энергоснабжении. Большинство данных объектов, представленных как типовые решения для внедрения и описанных в литературных источниках, ориентировано под использование природного газа, однако для многих регионов нашей страны, как и других стран, для производства энергии используется твердое топливо – уголь, торф, биомасса и промышленные отходы. В литературе представлено относительно небольшое количество технологических решений для работы мини-ТЭС на твердом топливе [1–4]. Среди них встречаются исследования и разработки, где помимо производства тепловой и электрической энергии рассматривается возможность получения ценной побочной продукции – активированного угля, полукокса, золошлаковых материалов, товарной серы [5–8].

Помимо экономического эффекта, когда реализация побочных продуктов позволяет стабилизиро-

вать себестоимость производимой энергии на мини-ТЭС, решается и экологическая проблема использования твердого топлива. Экологическая составляющая до сих пор остается одним из сдерживающих факторов активного внедрения станций малой мощности, работающих на угле или другом виде твердого топлива, так как объекты распределенной генерации максимально близко располагаются к потребителям и выбросы вредных веществ должны иметь «нулевые» значения. Производство побочной продукции, в том числе путем утилизации вредных выбросов на мини-ТЭС, например, как в случае получения золошлаковых материалов из золы и шлака, позволит решить данную проблему.

Ввиду отсутствия широкого распространения объектов малой энергетики, работающих на твердом топливе, вопросы технологии получения из угля ценных побочных продуктов в условиях мини-ТЭС и серийного производства оборудования малой мощности, ориентированного на переработку твердого топлива, до конца не решены. В этой связи исследования, посвященные разработке технологий и аппаратов для термической переработки

твердого топлива с целью получения побочных продуктов в условиях малых электростанций, являются актуальными и требуют тщательной проработки, что и является целью данной работы.

#### Получение активированного угля на мини-ТЭС

На протяжении последних трех лет в нашей стране наблюдается подъем производства активированных углей. В 2017 г. в России было произведено 10468 т активированных углей, что на 10,8 % выше объема производства предыдущего года [9]. Направления использования активированных углей охватывают различные отрасли промышленности, основными из которых являются: химическая (химические волокна, красители, химические реактивы), металлургическая (цветная и черная металлургия), газо- и нефтеперерабатывающая промышленность (разделение и очистка технологических потоков), очистка газовых выбросов (рекуперация растворителей, очистка газов) [10, 11].

Для получения активированного угля могут использоваться различные виды сырья: от традиционных – древесины, торфа, каменных и бурых углей, до скорлупы различных видов орехов, ячменной соломы, осадков сточных вод, жидкой нефтяной фракции, летучей золы, изношенных резиновых покрышек [12–16]. Несмотря на то, что в научных исследованиях последних лет все большее внимание уделяется нетрадиционным видам сырья, использование торфа, древесины и угольного топлива нашло наибольшее промышленное применение.

Проведенный анализ методов получения сорбентов из углеродсодержащего сырья показал возможность использования каменного угля, который является топливом при производстве тепловой и электрической энергии на малых автономных тепловых электростанциях, в качестве сырья для получения активированного угля.

Сортность угля является одним из основных показателей при выборе режимных параметров процесса активирования. Так, для углей с высоким содержанием смолы и летучих компонентов необходима предварительная обработка (измельчение, брикетирование, рассеивание, окисление) в виду их спекаемости при высоких температурах. Такие требования не предъявляются к антрациту, однако перед его активированием необходимо провести измельчение, брикетирование со связующим, повторное измельчение и уже затем карбонизацию и активирование. Угли с высоким содержанием летучих веществ перед активированием подвергают дроблению и промывке разбавленной минеральной кислотой (например, соляная, серная кислоты) [17].

Исследования, касающиеся процесса получения активированного угля из каменноугольного сырья, отражены в литературных источниках как российских, так и зарубежных авторов [18–20]. Процесс включает, как правило, проведение двух

основных этапов – карбонизации и активирования. Известны химические и парогазовые методы активирования [21–23]. Для торфа и древесных опилок, которые являются некарбонизованными продуктами, предпочтительными являются методы химического активирования, а для карбонизованного сырья – каменных и древесных углей – парогазовое активирование. В качестве реагентов используется кислород, водяной пар и углекислый газ. Температура процесса достигает 800–1000 °С, поэтому для его проведения необходимо специальное оборудование. Реакторы газового активирования должны удовлетворять следующим требованиям:

- обеспечивать интенсивное взаимодействие активизирующих газов и углеродсодержащих веществ;
- поддерживать высокую температуру нагрева реакционного материала;
- обеспечивать эффективное использование тепловой энергии реакционного газа.

Всем этим показателям отвечают такие конструкции печей, как шахтные, многополочные, вращающиеся, а также реакторы с кипящим и движущимся слоем.

В рамках данной работы в качестве базовой модели выбран реактор с кипящим слоем. Эксплуатация подобных аппаратов обладает следующими несомненными преимуществами:

- подача сырья в реактор осуществляется непрерывно;
- интенсивное перемешивание и высокий коэффициент теплопередачи в слое обеспечивают изотермический режим в зоне реакции;
- температура в слое регулируется достаточно просто – за счет отвода тепла из зоны реакции;
- за счет интенсификации процесса сокращается время активирования;
- реактор данного типа имеет высокую производительность.

Реактор с кипящим слоем – герметичная цилиндрическая либо прямоугольная реакционная камера, в нижней части которой расположена газораспределительная решетка с отверстиями, через которые поступают газы на активацию. Форма и расположение отверстий, а также наличие различных вставок в газораспределительной решетке выбирается с учетом особенностей данного процесса.

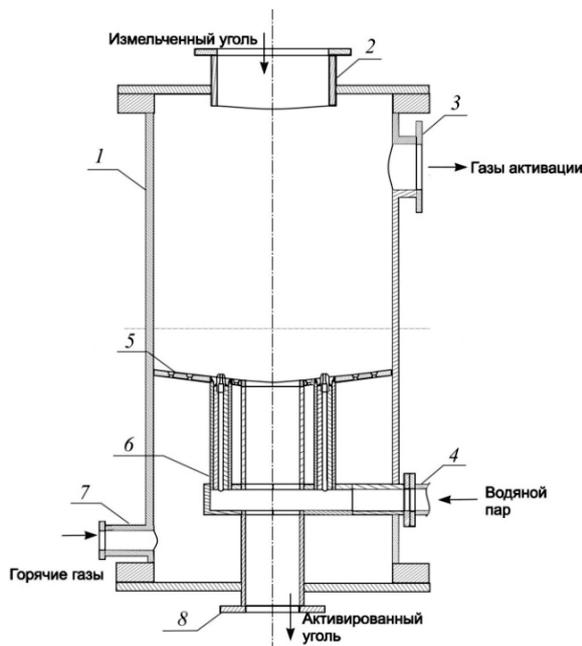
Для разрабатываемого активатора выбрана наиболее простая перфорированная решетка с вертикальной ориентацией круглых отверстий, вогнутая к центру. При прохождении газораспределительного устройства формируются турбулентные струи оживающего агента, которые приводят слой в псевдооживленное состояние.

Условия взаимодействия фаз в слое зависят от таких параметров, как режим истечения, дальность струй и степень их стесненности в прорешечной зоне. Для поддержания режима псевдооживления в слое и температуры 750–900 °С под газораспределительную решетку подаются продук-

ты сгорания. Одновременно осуществляется подача пара на активацию в виде одной или нескольких струй через форсунки. За счет этого обеспечивается улучшение качества слоя и интенсификация тепло-массообменных процессов.

### Конструкция аппарата для получения активированного угля

В данной работе представлена конструкция активатора, который может использоваться на угольной мини-ТЭС для получения активированного угля (рисунок).



**Рисунок.** Активатор для производства активированного угля на мини-ТЭС: 1 – корпус; 2 – патрубок для подачи измельченного угля; 3 – патрубок для отвода газов активации; 4 – коллектор для подачи водяного пара; 5 – газораспределительная решетка; 6 – форсунки; 7 – патрубок для подачи горячих газов; 8 – труба для отвода активированного угля

**Figure.** Activator for production of activated carbon at mini thermal power plants: 1 is the case; 2 is the pipe for feeding crushed coal; 3 is the pipe for removal of activation gases; 4 is the collector for supplying water vapor; 5 is the gas distribution grid; 6 are the injectors; 7 is the pipe for supplying hot gases; 8 is the pipe for removal of activated carbon

Принцип работы аппарата следующий. Предварительно измельченный в углеразмольной молотковой мельнице и подсушенный уголь поступает через верхний загрузочный патрубок – 2 в активатор – 1 и распределяется слоем на газораспределительной решетке – 5. Под решетку подаются горячие газы, в качестве которых могут использоваться продукты сгорания топлива, полученные в специальной топке. Проходя через отверстия газораспределительной решетки, газы приводят слой в псевдооживленное состояние. В результате теплообмена между газами и углем частицы угля нагрева-

ются до температуры активации. В коллектор – 4, расположенный под решеткой, подается водяной пар, который через форсунки – 6, установленные в отверстиях газораспределительной решетки, поступает в кипящий (псевдооживленный) слой угля.

Форсунки в количестве 6 штук расположены в отверстиях газораспределительной решетки по окружности на равном расстоянии от центра активатора. Газораспределительная решетка содержит 48 отверстий, расположенных по трем concentрическим окружностям. На окружности наибольшего радиуса находится 24 отверстия, среднего – 16, наименьшего – 8 отверстий. При нагреве в парогазовой среде из частиц угля выделяются летучие и образуются микропоры. В результате образуется активированный уголь.

Образующиеся газы активации удаляются через боковой патрубок – 3, расположенный в верхней части активатора. Под действием силы тяжести частицы угля, поступающие сверху, постепенно перемещаются в нижнюю часть слоя. Время нахождения частиц в активаторе должно соответствовать времени активации угля. Для удаления готового активированного угля газораспределительная решетка имеет уклон к центру, за счет чего частицы скатываются в трубу – 8 и отводятся из активатора при помощи шнека.

### Расчет реактора-активатора

Расчет активатора включает следующие основные блоки: гидродинамический расчет, расчет изотермической струи в псевдооживленном слое, тепловой расчет, расчет параметров газораспределительной решетки.

В табл. 1 представлены основные исходные данные для расчета.

**Таблица 1.** Исходные данные для расчета активатора  
**Table 1.** Basic data for calculation of the activator

Наименование показателя Indicator name	Единицы измерения Units	Значение Value
Производительность активатора Activator performance	кг/ч kg/h	226,8
Дисперсный состав угля по фракциям (мм) Dispersed composition of coal fractions (mm)	%	1,0 17,4 56,2 24,0 1,4
Температура в активаторе Temperature in the activator	К	1023–1173
Температура продуктов сгорания Temperature of combustion products	К	1473
Время активации Activation time	ч/ч	1–4
Начальная температура угля Coal initial temperature $T_i$	К	293
Высота слоя Layer height $H_{c0}$	м/м	0,5

Гидродинамический расчет аппарата с кипящим (псевдооживленным) слоем для получения активированного угля выполняется исходя из условия, что псевдооживление в аппарате создается путем подвода горячих газов (продуктов сгорания) и подачи их в основные отверстия газораспределительной решетки [24].

1. Определяем эквивалентный диаметр частиц псевдооживленного слоя, учитывая средний размер частиц каждой фракции  $d_i$  и процентное массовое содержание частиц данной фракции  $x_i$ :

$$\frac{1}{d_a} = \sum \frac{x_i}{d_i}. \quad (1)$$

2. Находим минимальное значение скорости газа, при которой обеспечивается интенсивное перемешивание частиц в кипящем слое, вычислив предварительно критерий Архимеда и критерий Рейнольдса.

Условия существования стационарного кипящего слоя: ограниченный интервал скоростей потока  $u_{кр} < u < u_{вит}$  от начала псевдооживления до выноса всех частиц в трубу.

Критерий Архимеда определяется по формуле:

$$Ar = \frac{g \cdot d_a^3 \cdot \rho_r - \rho_{п.сг}}{v_{п.сг}^2 \cdot \rho_{п.сг}}, \quad (2)$$

где  $\rho_r$  – плотность твердой фазы (исходного угля);  $\rho_{п.сг}$  и  $v_{п.сг}$  – плотность и кинематическая вязкость горячих газов соответственно.

3. Критическая скорость начала псевдооживления определяется в зависимости от критерия Рейнольдса:

$$u_{кр} = \frac{Re_{кр} \cdot v_a}{d_a}. \quad (3)$$

Критерий Рейнольдса вычисляется по найденному ранее критерию Архимеда:

$$Re_{кр} = \frac{Ar}{1400 + 5,22\sqrt{Ar}}. \quad (4)$$

4. Для обеспечения интенсивного перемешивания в кипящем слое определяется оптимальная по теплообмену рабочая скорость потока:

$$u_{опт} = \frac{Re_{r(опт)} \cdot v_{п.сг}}{d}, \quad (5)$$

где

$$Re_{r(опт)} = \frac{Ar}{18 + 5,22\sqrt{Ar}}. \quad (6)$$

5. Число псевдооживления находим как отношение:

$$n = \frac{u_{опт}}{u_{кр}}. \quad (7)$$

6. Вычисляем критерий Рейнольдса для скорости витания частицы:

$$Re_{вит} = \frac{Ar}{18 + 0,61\sqrt{Ar}}. \quad (8)$$

7. Скорость витания частицы угля равна:

$$u_{вит} = \frac{Re_{вит} \cdot v_{п.сг}}{d}. \quad (9)$$

8. Определяем порозность слоя, применяя закон расширения однородного псевдооживленного слоя, для оптимальной скорости частицы:

$$\varepsilon_{сл} = \left( \frac{18Re + 0,36Re^2}{Ar} \right)^{0,21}. \quad (10)$$

9. Степень расширения слоя вычисляется по отношению:

$$\frac{H_{сл}}{H_{сл0}} = \frac{1 - \varepsilon_{сл0}}{1 - \varepsilon_{сл}}, \quad (11)$$

где  $H_{сл0}$  и  $\varepsilon_{сл0}$  – высота и порозность неподвижного слоя (до начала псевдооживления);  $H_{сл}$  – высота псевдооживленного слоя.

10. Определяем расход оживающего газа (продуктов сгорания) в расчете на  $1 \text{ м}^2$  площади поперечного сечения аппарата,  $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ :

$$\dot{G}_r = u_{опт} \rho_{п.сг}. \quad (12)$$

Результаты расчета представлены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты гидродинамического расчета  
Table 2. Results of hydrodynamic calculation

Параметр Parameter	Значение Value
Эквивалентный диаметр частиц псевдооживленного слоя, мм Equivalent particle diameter of the fluidized bed, mm	2,12
Критическая скорость начала псевдооживления, м/с Critical velocity of fluidization onset, m/s	0,69
Оптимальная по теплообмену рабочая скорость потока $Re_m$ , м/с Optimum heat exchange working flow rate, m/s	2,17
Число псевдооживления/Fluidization number	3,15
Скорость витания частицы, м/с Rate of particle movement, m/s	1,54
Степень расширения слоя/Expansion layer $H_{сл}/H_{сл0}$	1,224
Расход продуктов сгорания $\dot{G}_r, \text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ Consumption of combustion products, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	0,499

Расчет изотермической струи в псевдооживленном слое угля проводится по методике Бувича Ю.А., исходя из условия подачи водяного пара в виде отдельных струй в предварительно оживленный слой частиц угля [25].

1. Вычисляем критерий Архимеда для частицы угля в потоке пара:

$$Ar = \frac{g \cdot d_a^3 \cdot \rho_r - \rho_{п}}{v_{п}^2 \cdot \rho_{п}}, \quad (13)$$

где  $\rho_{п}$  и  $v_{п}$  – плотность и кинематическая вязкость водяного пара при заданных температуре и давлении соответственно.

2. Определяем скорость на границе газового факела:

$$U_b = \frac{\eta \frac{Ar}{18 + 0,61\sqrt{Ar}} v}{d_a}, \quad (14)$$

где  $\eta=0,8$  для всех струй.

3. Критерий Галилея рассчитываем по эквивалентному диаметру частиц угля:

$$Ga = \frac{gd_a^3}{\nu^2}. \quad (15)$$

4. Коэффициент струи  $C_1$  определяется по формуле:

$$C_1 = 0,46Ga^{0,1}. \quad (16)$$

5. Средняя плотность зоны «газ – твердые частицы» может быть рассчитана по приближенной зависимости:

$$\rho'_n / \rho_{n0} = 0,34 - 0,035d_s. \quad (17)$$

6. Коэффициент  $C_2$  определяется в зависимости от  $C_1$  и средней плотности зоны «газ – твердые частицы»:

$$C_2 = C_1 \sqrt{\rho_r / \rho'_n}. \quad (18)$$

7. Длина газового факела струи рассчитывается по соотношению:

$$Y_\phi = \frac{U_0 r_0}{0,366 U_b C_1}, \quad (19)$$

где  $U_0$  – скорость истечения пара из отверстия, м/с;  $r_0$  – радиус отверстия, м.

8. Определяем абсциссу начального сечения факела струи:

$$Y_n = 1,75 r_0 / C_1. \quad (20)$$

9. Определяем абсциссу переходного сечения факела струи:

$$Y_{ii} = 3,28 r_0 / C_1. \quad (21)$$

Результаты расчета по формулам (13)–(21) приведены в табл. 3.

Таблица 3. Результаты расчета изотермической струи в псевдооживленном слое

Table 3. Results of calculation of the isothermal jet in the fluidized bed

Параметр Parameter	Значение Value
Критерий Архимеда для частицы угля в потоке пара Archimedes criterion for coal particles in steam flow	7,72·10 <sup>3</sup>
Скорость на границе газового факела, м/с Speed at the gas torch border, m/s	2,76
Критерий Галилея/Galilean criterion	20,2
Коэффициент струи/Jet ratio: $C_1$ $C_2$	0,62 0,04
Длина газового факела струи, мм Length of the gas jet torch, mm	1277
Абсцисса/Abscissa: начального сечения, мм/initial section, mm переходного сечения, мм/cross section, mm	28,2 52,9
Безразмерная осевая скорость в газовом факеле круглой струи Dimensionless axial velocity in a gas jet of a circular jet	0,2

10. Для ряда значений скорости на оси струи  $U_{mi}$  (от 0,835  $U_0$  до  $U_b$ ) при известных  $U_b$ ,  $C_1$ ,  $C_2$  и  $\rho_n$

рассчитываем среднюю плотность сечения струи  $\rho_{cp}$  и толщину пограничного слоя  $b_i$ :

$$\sqrt{\frac{\rho_{cp}}{\rho_0}} = \frac{C_1}{C_1 \cdot A + C_2}, \quad (22)$$

$$b_i = \frac{U_0 r_0}{0,366 \sqrt{\rho_{cp} / \rho_0} U_{mi}}, \quad (23)$$

где  $U_m$  определяется по эмпирическим зависимостям; параметр  $A$  вычисляется по соотношению:

$$A = \frac{U_m - U_b}{U_m + U_b}. \quad (24)$$

11. Толщина факела струи в различных сечениях струи определяется по формуле:

$$b_{\phi y} = \frac{U_m - U_b}{U_m - U_b} C_1 y, \quad (25)$$

где  $y$  – высота струи, т. е. расстояние от выхода до  $i$ -го сечения струи по вертикали.

12. Определяем профиль скорости в газовом факеле струи:

$$\Delta U / \Delta U_m = 1 - [1 - (1 - x/b_\phi)^{1,5}]^2, \quad (26)$$

где  $x$  – расстояние от оси струи по горизонтали.

Результаты расчетов по формулам (22)–(26) представлены в табл. 4.

Таблица 4. Результаты расчетов основных параметров струи  
Table 4. Results of calculations of the jet main parameters

$U_m$ , М/с (m/s)	$U_m/U_0$	А	$\rho_{cp}$ , кг/м <sup>3</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	$b_i$	$y_i$		$b_{\phi i}$
					мм/mm		
66,8	0,835	0,92	0,43	32,34	52,98	30,22	
40	0,5	0,87	0,48	51,12	88,22	47,59	
30	0,38	0,83	0,52	65,48	118,07	60,76	
20	0,25	0,76	0,62	89,95	175,96	82,91	
10	0,13	0,57	1,05	138,24	351,40	124,19	
3	0,04	0,04	37,25	77,37	1193,92	29,61	

Результаты определения профиля скорости в газовом факеле струи приведены в табл. 5.

Таблица 5. Результаты расчетов профиля скорости в факеле струи

Table 5. Results of calculations of the velocity profile in the jet plume

$x$ , мм/mm	0	10	20	40	60	80	100	120
$\Delta U / \Delta U_m$	1	0,986	0,946	0,805	0,605	0,379	0,165	0,012
$\Delta U$ , м/с (m/s)	120	118,3	113,5	96,6	72,6	45,5	19,8	1,44
$U = \Delta U + U_b$ , м/с (m/s)	122,8	121,1	116,3	99,4	75,4	48,2	22,6	4,2

Тепловой расчет аппарата для производства активированного угля проводится на основе теплового баланса аппарата, в который входят следующие составляющие:

$$Q_y + Q_{исп} + Q_{пвх} + Q_{псг} + Q_{х.р} = Q_{пак} + Q_{а.у} + \Delta Q_{пот},$$

которые могут быть определены по следующим формулам:

- теплота поступающего угля

$$Q_y = G_T \cdot Q_n^p \cdot \left( \frac{1 + W^p}{100} \right); \quad (27)$$

- теплота испарения влаги угля

$$Q_{исп} = G_T \cdot \left( \frac{W_{физ}^p}{100} \right) \cdot \varphi \cdot c_{исп.вл} \cdot T; \quad (28)$$

- теплота поступающего водяного пара

$$Q_{п.вх} = G_{п.} \cdot c_{п.} \cdot T; \quad (29)$$

- теплота паров активации

$$Q_{п.ак} = G_{п.а} \cdot c_{п.} \cdot T + G_T \cdot \frac{V^r}{100} \cdot c_{лет} \cdot T_{лет}; \quad (30)$$

- теплота образующегося активированного угля

$$Q_{а.у} = G_T \cdot \left( 1 - \frac{V^r}{100} \right) \cdot Q_k^p \cdot \left( \frac{1 + W^p}{100} \right); \quad (31)$$

- теплота химических реакций активации

$$Q_{х.р} = G_T \cdot \Delta H_{х.р}; \quad (32)$$

- теплота продуктов сгорания

$$Q_{п.ср} = (Q_{п.ак} + Q_{а.у} \pm Q_{х.р} + \Delta Q) - Q_T - Q_{исп}; \quad (33)$$

- расход продуктов сгорания

$$G_{п.ср} = \frac{Q_{п.ср}}{c_{п.ср} \cdot T_{п.ср}}. \quad (34)$$

В формулах (27)–(34) используются следующие величины:  $G_T$  – расход угля на активацию, кг/с;  $Q_n^p$  – низшая теплотворная способность рабочего топлива, кДж/кг;  $W^p$  – влажность угля на рабочую массу;  $W_{физ}^p$  – влажность угля на рабочую массу;  $c_{исп.вл}$ ,  $T$  – теплоемкость и температура испаренной влаги соответственно, кДж/(кг·К), К;  $V^r$  – выход летучих, %;  $c_{лет}$ ,  $T_{лет}$  – теплоемкость и температура летучих соответственно, кДж/(кг·К), К;  $Q_k^p$  – низшая теплота сгорания активированного угля (кокса);  $Q_{х.р}$  – теплота химических реакций, Дж/с;  $\Delta Q_{пот}$  – потери, Дж/с;  $\Delta H_{х.р}$  – теплота химических реакций в аппарате, Дж/кг;  $\varphi$  – доля физически связанной влаги, которая участвует в образовании летучих. Результаты теплового расчета приведены в табл. 6. Расход продуктов сгорания составляет 0,33 кг/с.

Таблица 6. Результаты теплового расчета

Table 6. Results of thermal calculation

Параметр Parameter	Значение, кДж/с Value, kJ/s
Теплота поступающего угля/Incoming coal heat	1512
Теплота испарения влаги угля Coal moisture evaporation heat	19
Теплота поступающего водяного пара Incoming steam heat	65
Теплота паров активации/Activation vapor heat	87
Теплота образующегося активированного угля Generated activated carbon heat	1323
Теплота химических реакций активации Chemical activation reaction heat	517
Теплота продуктов сгорания Combustion products heat	596

Результаты расчетов, представленные в табл. 2–6, позволяют определить конструктивные и режимные параметры аппарата для получения активированного угля, а также характеристики вспомогательного оборудования.

По расчетной оценочной формуле, предложенной О.М. Тодесом и О.Б. Читовичем, определяем коэффициент температуропроводности кипящего слоя [24]:

$$a = D_{см} = \frac{1}{60} \sqrt{gL^3} \left( \frac{u}{u_{кр}} - 1 \right). \quad (35)$$

С учетом того, что в формуле (35)  $L$  – это длина аппарата, а в активаторе в качестве линейной (геометрической) характеристики используется высота слоя  $H_{сл}$ , данное уравнение представим в следующем виде:

$$a = D_{см} = \frac{1}{60} \sqrt{gH_{сл0}^3} \left( \frac{u_{опт}}{u_{кр}} - 1 \right).$$

Расчет параметров газораспределительной решетки проводится по формулам (1)–(19) с учетом того, что под газораспределительную решетку подается горячий газ (продукты сгорания) и параметры пара в данных формулах заменяются на параметры газа.

По определенному из теплового баланса расходу продуктов сгорания рассчитывается площадь живого сечения газораспределительной решетки:

$$F_{сеч} = \frac{G_{п.ср}}{U_0 \cdot \rho_{п.ср}}.$$

На основе полученного значения живого сечения решетки выбирается количество и диаметр отверстий ( $N_{отв}=48$ ,  $d_{отв}=22$  мм). Результаты расчета представлены в табл. 7.

Таблица 7. Результаты расчета параметров газораспределительной решетки

Table 7. Results of calculation of the gas distribution grid parameters

Параметр Parameter	Значение Value
Эффективный коэффициент температуропроводности Effective coefficient of thermal diffusivity	0,16
Критерий Архимеда для частицы угля в потоке газа Archimedes criterion for coal particles in a gas stream	$1,4 \cdot 10^4$
Скорость на границе газового факела, м/с Speed at the gas torch border, m/s	12,33
Критерий Галилея/Galilean criterion	21,1
Коэффициент струи/Jet ratio $C_1$	0,62
Средняя плотность зоны «газ – твердые частицы», кг/м <sup>3</sup> Average density of the zone «gas – solid particles», kg/m <sup>3</sup>	0,06
Коэффициент/Coefficient $C_2$	0,04
Длина газового факела струи, мм Length of the gas jet torch, mm	285
Площадь живого сечения решетки, м <sup>2</sup> Area of the lattice living section, m <sup>2</sup>	0,018

### Заключение и выводы

Представлена конструкция аппарата для получения активированного угля в условиях малых энергетических объектов. Произведен расчет гидродинамических параметров, расчет параметров газораспределительной решетки и тепловой расчет процесса активирования. Получены значения основных конструктивных параметров аппарата при произво-

дительности по активированному углю 226,8 кг/ч. Габариты аппарата позволяют разместить его на небольшой площади в условиях мини-ТЭС и использовать при снижении потребности в тепловой и электрической энергии, а также выровнять график загрузки автономного энергетического объекта.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-08-00295 «А».*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Duffy T.E., Director P.E., Schneider P.H. Advanced combined-cycle from 8 MW to 23 MW // Proc. Amer. Power. Conf. – Chicago, 1993. – P. 1733–1741.
2. Данилевич Я.Б., Боченинский В.П., Кириченко Б.Э., Коваленко А.Н. Малые электростанции: ОЭП РАН. – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2002. – 30 с.
3. Мини-ТЭС на базе обращенного газогенератора / А.М. Дубинин, Е.В. Черепанова, В.Г. Тупоногов, О.А. Обожин // Теплоэнергетика. – 2010. – № 6. – С. 29–32.
4. Малая тепловая электростанция повышенной эффективности / Я.Б. Данилевич, А.С. Делюкин, Б.Э. Кириченко, А.Н. Коваленко, В.Л. Шилин // Известия АН. Энергетика. – 2003. – № 1. – С. 148–153.
5. Проблемы создания отечественных мини-ТЭС / Т.А. Борк, В.П. Вершинский, И.П. Евтюхова, Н.М. Коробов, З.П. Сорокина // Теплоэнергетика. – 1991. – № 10. – С. 18–21.
6. Котлер В.Р. Мини-ТЭС: зарубежный опыт // Теплоэнергетика. – 2006. – № 8. – С. 69–71.
7. Afanasyeva O.V., Mingaleeva G.R. Comprehensive exergy analysis of the efficiency of a low-capacity power plant with coal gasification and obtaining sulfur // Energy Efficiency. – 2015. – V. 8. – Iss. 2. – P. 255–265.
8. Афанасьева О.В., Мингалеева Г.Р. Моделирование технологических схем мини-ТЭС. – М.: ИД МЭИ, 2014. – 220 с.
9. Рынок активированного угля. Текущая ситуация и прогноз 2018–2022 гг. URL: <http://alto-group.ru/otchet/marketing/326-rynok-aktivirovannogo-uglya-tekushaya-situaciya-i-prognoz-2014–2018-gg.html> (дата обращения: 05.07.2018).
10. Место активных углей в экологии и экономике. Новые технологии их производства / В.М. Мухин, А.А. Курилкин, Н.Л. Воропаева, К.В. Лексюкова, П.В. Учанов // Сорбционные и хроматографические процессы. – 2016. – Т. 16. – № 3. – С. 346–353.
11. Moreno-Piraján J.C., Bastidas-Barranco M.J., Giraldo L. Preparation of activated carbons for storage of methane and its study by adsorption calorimetry // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2018. – V. 131. – Iss. 1. – P. 259–271.
12. Production of activated carbon from peat by with natural soda ash and effect of nitrogen addition on the development of surface area / N. Tsubouchi, M. Nishio, Y. Shinohara, J. Bud, Y. Mochizuki // Fuel Processing Technology. – 2018. – V. 176. – P. 76–84.
13. Получение гранулированного активного угля из отходов растительного сырья / Е.А. Фарберова, Е.А. Тиньгаева, А.Д. Чучина, А.Р. Кобелева, А.С. Максимов // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. – 2018. – Т. 61 (3). – С. 51–57.
14. Preparation of activated carbon from lignin by chemical activation / J. Hayashi, A. Kazehaya, K. Muroyama, A.P. Watkinson // Carbon. – 2000. – № 38 (13). – P. 1873–1878.
15. Activated carbons from used motor oil as catalyst support for sustainable environmental protection / T. Tsoncheva, A. Mileva, S.P. Marinov, D. Paneva, N. Velinov, I. Spassova, A. Kosateva, D. Kovacheva, N. Petrov // Microporous and Mesoporous Materials. – 2018. – V. 259. – P. 9–16.
16. Pallarés J., González-Cencerrado A., Arauzo I. Production and characterization of activated carbon from barley straw by physical activation with carbon dioxide and steam // Biomass and Bioenergy. – 2018. – V. 115. – P. 64–73.
17. Кинле Х., Бадер Э. Активные угли и их промышленное применение / Пер. с немецкого. – Л.: Химия, 1984. – 216 с.
18. Akash B.A., O'Brien W.S. The production of activated carbon from a bituminous coal // International Journal of Energy Research. – 1996. – V. 20. – Iss. 10. – P. 913–922.
19. Wilson J. Active carbons from coals // Fuel. – 1981. – V. 60. – Iss. 9. – P. 823–831.
20. Исследование процесса получения активированного угля из каменноугольного сырья и возможности использования побочных продуктов / Е.Н. Нуруллина, М.В. Шулаев, М.Р. Якубов, А.С. Сироткин, А.М. Гумеров // Вестник технологического университета. – 2012. – Т. 15. – В. 12. – С. 237–241.
21. Оптимальное управление производством активного угля во вращающихся печах / В.Ф. Олонцев, Е.А. Фарберова, К.С. Белоусов, Е.А. Тиньгаева // Вестник ПНИПУ. – 2015. – № 3. – С. 51–59.
22. Preparation of activated carbons from bituminous coals with CO<sub>2</sub> activation. 1. Effects of oxygen content in raw coals / H. Teng, J.-A. Ho, Y.-F. Hsu, C.-T. Hsieh // Industrial and Engineering Chemistry Research. – 1996. – № 35 (11). – P. 4043–4049.
23. Improvement of Activated Carbon from Jixi Bituminous Coal by Air Preoxidation / D. Liu, J. Gao, Q. Cao, S. Wu, Y. Qin // Energy and Fuels. – 2017. – V. 31. – Iss. 2. – P. 1406–1415.
24. Тодес О.М., Цитович О.Б. Аппараты с кипящим зернистым слоем (гидравлические и тепловые основы работы). – Л.: Химия, 1981. – 296 с.
25. Бувечич Ю.А., Минаев Г.А. Струйное псевдооживление. – М.: Химия, 1984. – 133 с.

*Поступила 27.08.2019 г.*

### Информация об авторах

**Афанасьева О.В.**, кандидат технических наук, начальник Управления научных исследований, инноваций и разработок, доцент кафедры энергетического машиностроения Казанского государственного энергетического университета.

**Мингалеева Г.Р.**, доктор технических наук, заведующий кафедрой энергетического машиностроения Казанского государственного энергетического университета.

UDC 661.183.2: 662.742

## APPARATUS FOR RECEIVING ACTIVATED COAL AT MINI THERMAL POWER PLANTS

Olga V. Afanaseva<sup>1</sup>,  
eccolga@mail.ruGuzel R. Mingaleeva<sup>1</sup>,  
mingaleeva-gr@mail.ru<sup>1</sup> Kazan State Power Engineering University,  
51, Krasnoselskaya street, Kazan, 420066, Russia.

**The relevance** of the research is caused by the need to develop technological solutions and hardware design for production of by-products at small distributed energy facilities. The majority of small energy objects described in the literature and presented on the market are focused on generation of heat and electrical energy, i.e. on operation of the cogeneration principle. Obtaining by-products by thermal processing of solid fuels allows optimizing the system for production of heat and electricity at mini thermal power plants, improving fuel efficiency, solving environmental problems, and providing valuable chemical products to nearby areas and consumers.

**The main aim** of the research is to develop the design and carry out the calculation of the apparatus of low power to obtain activated carbon at mini thermal power plants.

**Object:** the apparatus of low power for obtaining activated carbon by thermal processing of solid carbon-containing raw materials in the fluidized bed.

**Methods:** hydrodynamic calculation of non-isothermal jets in a fluidized bed, heat calculation, calculation of parameters of the gas distribution grid.

**Results.** The authors have developed the design of a low-power apparatus for producing activated carbon at mini thermal power plant and chose the design of a fluidized bed reactor as a prototype of the installation. The activator is a sealed apparatus with a perforated gas distribution grid. For the considered activator, the simplest perforated grating with a vertical orientation of round holes concave toward the center was chosen. Coal enters from the top through the loading nozzle and is distributed by a layer on the gas distribution grid, steam is supplied to the activation of coal in a jet fluidization mode through the nozzles. Hot gases – the products of fuel combustion – are fed under the grate and bring the layer into a fluidized state. The authors carried out the hydrodynamic and thermal calculations of the apparatus, namely, they determined the critical velocity of the onset of fluidization, the degree of expansion of the bed, the flow rate of combustion products, the calculation of the isothermal jet in the fluidized bed, the parameters of the gas distribution grid: the length of the gas jet, the area of the cross section of the lattice.

**Key words:**

Object of small distributed energy, solid fuel, by-products, activated carbon, activator.

The research was financially supported by the RFBR within the scientific project no. 17–08–00295 «A».

## REFERENCES

- Duffy T.E., Director P.E., Schneider P.H. Advanced combined-cycle from 8 MW to 23 MW. *Proc. Amer. Power. Conf.* Chicago, 1993. pp. 1733–1741.
- Danilevich Ya.B., Bocheninsky V.P., Kirichenko B.E., Kovalenko A.N. *Small power plants*: OEEP RAS. St. Petersburg, SPSTU Publ., 2002. 32 p.
- Dubinin A.M., Cherepanova E.V., Tuponogov V.G., Obozhin O.A. Mini-tec na baze obrashchennogo gazogeneratora [Mini-TEC on the basis of a reversed gas generator]. *Teploenergetika*, 2010, no. 6, pp. 29–32.
- Danilevich Ya.B., Delyukin A.S., Kirichenko B.E., Kovalenko A.N., Shilin V.L. Malaya teplovaya elektrostantsiya povyshennoy effektivnosti [Small thermal power plant of increased efficiency]. *Izvestiya AN. Energetika*, 2003, no. 1, pp. 148–153.
- Bork T.A., Vershinsky V.P., Evtyukhova I.P., Korobov N.M., Sorokina Z.P. Problemy sozdaniya otechestvennykh mini-TEC [Problems of creating domestic mini-TEC]. *Teploenergetika*, 1991, no. 10, pp. 18–21.
- Kotler V.R. Mini-TEC: zarubezhnyy opyt [Mini-TEC: foreign experience]. *Teploenergetika*, 2006, no. 8, pp. 69–71.
- Afanasyeva O.V., Mingaleeva G.R. Comprehensive exergy analysis of the efficiency of a low-capacity power plant with coal gasification and obtaining sulfur. *Energy Efficiency*, 2015, vol. 8, Iss. 2, pp. 255–265.
- Afanasyeva O.V., Mingaleeva G.R. *Modelirovanie tekhnologicheskikh skhem mini-TEC* [Modeling of technological schemes of mini-thermal power plants]. Moscow, MEI Publ., 2014. 220 p.
- Rynok aktivirovannogo uglya. Tekushchaya situatsiya i prognoz 2018–2022* [The market of activated carbon. Current situation and forecast 2018–2022]. Available at: <http://alto-group.ru/otchet/marketing/326-rynok-aktivirovannogo-uglya-tekushchaya-situatsiya-i-prognoz-2014–2018-gg.html> (accessed 5 July 2018).
- Mukhin V.M., Kurilkin A.A., Voropaeva N.L., Leksyukova K.V., Uchanov P.V. Mesto aktivnykh ugley v ekologii i ekonomike. Novyye tekhnologii ikh proizvodstva [The place of active coals in ecology and economics. New technologies for their production]. *Sorption and chromatographic processes*, 2016, no. 3, pp. 346–353.
- Moreno-Piraján J.C., Bastidas-Barranco M.J., Giraldo L. Preparation of activated carbons for storage of methane and its study by adsorption calorimetry. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2018, vol. 131, Iss. 1, pp. 259–271.
- Tsubouchi N., Nishio M., Shinohara Y., Bud J., Mochizuki Y. Production of activated carbon from peat by natural soda ash and effect of nitrogen. *Fuel Processing Technology*, 2018, vol. 176, pp. 76–84.
- Farberova E.A., Tingaeva E.A., Chuchalina A.D., Kobeleva A.R., Maximov A.S. Poluchenie granulirovannogo aktivnogo uglya iz otkhodov rastitelnogo syr'ya [Obtaining granulated active carbon from wastes of vegetable raw materials]. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Khimiyai Khimicheskaya Tekhnologiya*, 2018, vol. 61, no. 3, pp. 51–57.
- Hayashi J., Kazehaya A., Muroyama K., Watkinson A.P. Preparation of activated carbon from lignin by chemical activation. *Carbon*, 2000, no. 38 (13), pp. 1873–1878.

15. Tsoncheva T., Mileva A., Marinov S.P., Paneva D., Velinov N., Spassova I., Kosateva A., Kovacheva D., Petrov N. Activated carbons from used. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2018, vol. 259, pp. 9–16.
16. Pallarés J., González-Cencerrado A., Arauzo I. Production and characterization of activated carbon from barley straw by physical activation with carbon dioxide and steam. *Biomass and Bioenergy*, 2018, vol. 115, pp. 64–73.
17. Kinle H., Bader E. *Aktivnye ugli i ikh promyshlennoe primenenie* [Active coals and their industrial application]. Leningrad, Khimiya Publ., 1984. 216 p.
18. Akash B.A., O'Brien W.S. The production of activated carbon from a bituminous coal. *International Journal of Energy Research*, 1996, vol. 20, Iss. 10, pp. 913–922.
19. Wilson J. Active carbons from coals. *Fuel*, 1981, vol. 60, Iss. 9, pp. 823–831.
20. Nurullina E.N., Shulaev M.V., Yakubov M.R., Sirotkin A.S., Gumerov A.M. Issledovanie protsessa polucheniya aktivirovannogo uglia iz kamennougolnogo syr'ya i vozmozhnosti ispolzovaniya pobochnykh produktov [Study of the process of obtaining activated carbon from coal raw materials and the possibility of using by-products]. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*, 2012, vol. 15, no. 12, pp. 237–241.
21. Olontsev V.F., Farberova E.A., Belousov K.S., Tingaev E.A. Optimalnoe upravlenie proizvodstvom aktivnogo uglia vo vrashchayushcheksya pechakh [Optimal control over the production of active coal in rotary kilns]. *Vestnik PNIPU*, 2015, no. 3, pp. 51–59.
22. Teng H., Ho J.-A., Hsu Y.-F., Hsieh C.-T. Preparation of activated carbons from bituminous coals with CO<sub>2</sub> activation. 1. Effects of oxygen content in raw coals. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 1996, no. 35 (11), pp. 4043–4049.
23. Liu D., Gao J., Cao Q., Wu S., Qin Y. Improvement of Activated Carbon from Jixi Bituminous Coal by Air Preoxidation. *Energy and Fuels*, 2017, vol. 31, Iss. 2, pp. 1406–1415.
24. Todes O.M., Tsitovich O.B. *Apparaty s kipyashchim zernistym sloem (gidravlicheskie i teplovye osnovy raboty)* [Apparatuses with a boiling granular layer (hydraulic and thermal bases of work)]. Leningrad, Khimiya Publ., 1981. 296 p.
25. Buevich Yu.A., Minaev G.A. *Struynoe psevdoozhizhenie* [Fluidized fluidization]. Moscow, Khimiya Publ., 1984. 133 p.

Received: 27 August 2019.

#### Information about the authors

**Olga V. Afanaseva**, Cand. Sc., head of scientific research, innovation and development department, associate professor, Kazan State Power Engineering University.

**Guzel R. Mingaleeva**, Dr. Sc., head of the Department of Power Engineering, Kazan State Power Engineering University.