

Научная статья

УДК 631.243

doi: 10.28983/asj.y2023i10pp168-173

Исследование аэродинамики при сжигании растительных отходов на изотермических моделях

Михаил Геннадьевич Загоруйко, Сергей Анатольевич Павлов, Игорь Андреевич Башмаков

ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», г. Москва, Россия

e-mail: zagorujko.misha2013@yandex.ru

Аннотация. Традиционные топки, использующие альтернативные виды топлива, например, растительные отходы, широко применяются вместо топок, работающих на традиционных видах топлива. Топки, агрегированные с сушилками типа СЗТ и СП, широко используются в сельском хозяйстве и пищевой промышленности. Исследовались две модели с подвесным слоем: с факельно-вихревым и циклонно-вихревым режимом. Первая модель предполагает наличие наклонной решетки в прямоугольной камере с сосредоточенной подачей вторичного дутья, первичное дутье с материалом подается над решеткой в ее нижней части, а вторая - камеру цилиндрической формы с вводом первичного воздуха в центре и циклоническим вводом вторичного дутья на определенной высоте. Эта схема близка к первой, только в нижней части модели сосредоточенный ввод первичного дутья с материалом. Методика исследований аэродинамики предусматривала: подачу материала из бункера; отсечку материала после установившегося режима; сбор и взвешивание выпавших частиц из модели; определение времени нахождения материала в модели по меченым частицам. Моделирование аэродинамики для различных схем организации топочного процесса показало возможность создания двухпролетных или однопролетных топочных блоков в зависимости от требуемого режима работы. Приведены результаты сравнительных исследований аэродинамики факельно-вихревого и циклонно-вихревого режимов. Определены оптимальные параметры дутья, отношение вторичного и первичного воздуха, конструктивные параметры топки, способствующие максимальному удельному объемному теплоснабжению.

Ключевые слова: сушка; растительные отходы; аэродинамика; топка; вихревые режимы.

Для цитирования: Загоруйко М. Г., Павлов С. А. Башмаков И. А. Исследование аэродинамики при сжигании растительных отходов на изотермических моделях // Аграрный научный журнал. 2023. № 10. С. 168–173. <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2023i10pp168-173>.

AGRICULTURAL ENGINEERING

Original article

Investigation of aerodynamics in combustion of vegetative waste on isothermal models

Mikhail G. Zagoruiko, Sergei A. Pavlov, Igor A. Bashmakov

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia

e-mail: zagorujko.misha2013@yandex.ru

Abstract. Modern agricultural vehicles contain a large number of components, which include micro **Abstract.** Conventional furnaces using alternative fuels, such as vegetable waste (VW), are widely used instead of furnaces operating on conventional fuels. The furnaces aggregated with dryers of SZT and SP type are widely used in agriculture and food industry. Two models with a suspended bed were investigated: with flare-vortex and cyclone-vortex modes. The first model assumes the presence of an inclined grate in a rectangular chamber with a concentrated supply of secondary blast, primary blast with material is supplied above the grate in its lower part, and the second model assumes a cylindrical-shaped chamber with primary air inlet in the center and cyclonic secondary blast inlet at a certain height. This scheme is close to the first, only in the lower part of the model concentrated input of primary blast with material. The methodology of aerodynamics studies included: feeding of material from the hopper; material cutoff after steady-state mode; collection and weighing of fallen particles from the model; determination of the time of material presence in the model by labeled particles. Modeling of aerodynamics for different schemes of furnace process organization showed the possibility of creating two-span or single-span



furnace blocks depending on the required operating mode. The results of comparative studies of aerodynamics of flare-vortex and cyclone-vortex modes are given. The results of comparative studies of aerodynamics of flare-vortex and cyclone-vortex modes are given. Optimal blowing parameters, secondary and primary air ratio, furnace design parameters contributing to the maximum specific volume heat stress are determined.

Keywords: drying; vegetable waste; aerodynamics; furnace; vortex modes.

For citation: Zagoruiko M. G., Pavlov S. A., Bashmakov I. A., Investigation of aerodynamics in combustion of vegetative waste on isothermal models. Agrarnyy nauchnyy zhurnal = The Agrarian Scientific Journal. 2023;(10):168–173. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2023i10pp168-173>.

Введение. При сушке зерна, подсолнечника, кукурузы для получения сушильного агента часто вместо топок на традиционных видах топлива используют топки на альтернативных видах топлива, например, на растительных отходах (РО). В качестве топочного оборудования в сельском хозяйстве и в пищевой промышленности широкое распространение получили топочные агрегаты, агрегированные с сушилками СЗТ, СП и других типов [6–8].

Эти топочные блоки могут работать с широким ассортиментом РО, но преимущественно на лузге подсолнечника или других крупяных культур. Разработке конструкции и режимов сжигания РО на этих блоках предшествовали экспериментальные исследования на изотермических моделях, некоторые итоги рассмотрены в настоящей работе [5, 9].

Целью статьи является обоснование конструктивных параметров и аэродинамики топочного блока ТБР-2,0 по результатам испытаний на изотермических моделях.

Методика исследований. Проведены исследования на двух моделях взвешенного слоя с отличающимися аэродинамикой вихревых течений в камерах сгорания [3].

В первой модели реализован факельно-вихревой режим, который характеризуется следующей аэродинамикой – в нижней части камеры прямоугольной формы расположена наклонная решетка, по краям которой организован сосредоточенный подвод вторичного дутья, первичное дутье с материалом подается над решеткой в ее нижней части (рис. 1) [1, 3].

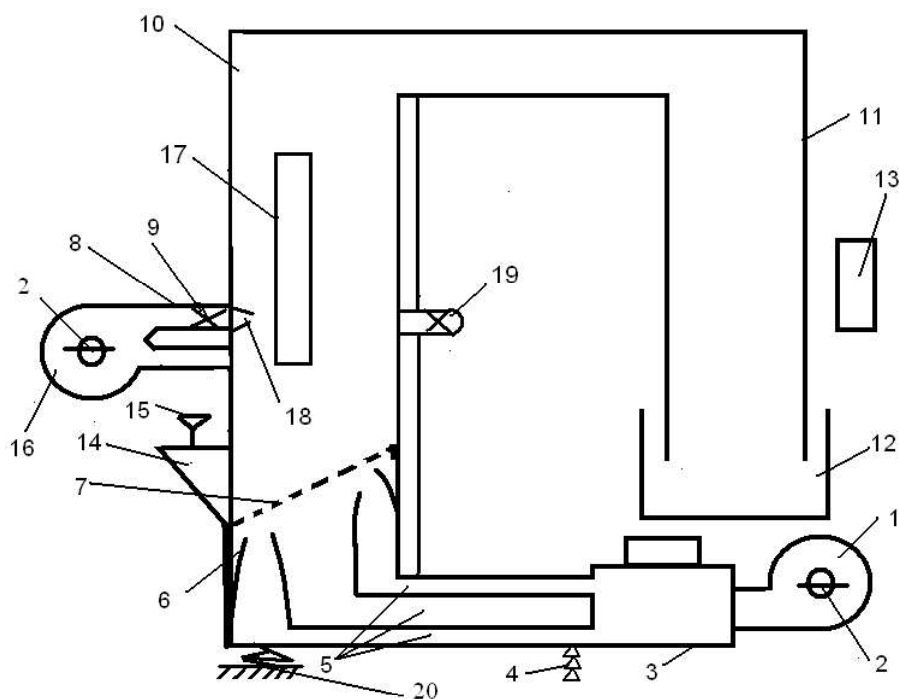


Рис. 1. Схема лабораторной установки с факельно-вихревым режимом:
1, 14 – вентилятор; 2, 4, 9, 15 – клапана; 3 – калорифер; 5 – воздушные каналы;
6 – сопло; 8 – труба; 10 – переходник; 11 – шахта воздухоподогревателей;
12 – емкость; 13 – измерительный комплекс «Терм-4»

Во второй модели реализован циклонно-вихревой режим, который характеризуется следующей аэродинамикой – ввод первичного воздуха по центру камеры цилиндрической формы в нижней части сверху вниз, ввод вторичного дутья – циклонно на некоторой высоте камеры (рис. 2). Эта схема близка к первой, только в рассматриваемой в нижней части модели сосредоточенный ввод первичного дутья с материалом [2, 4].



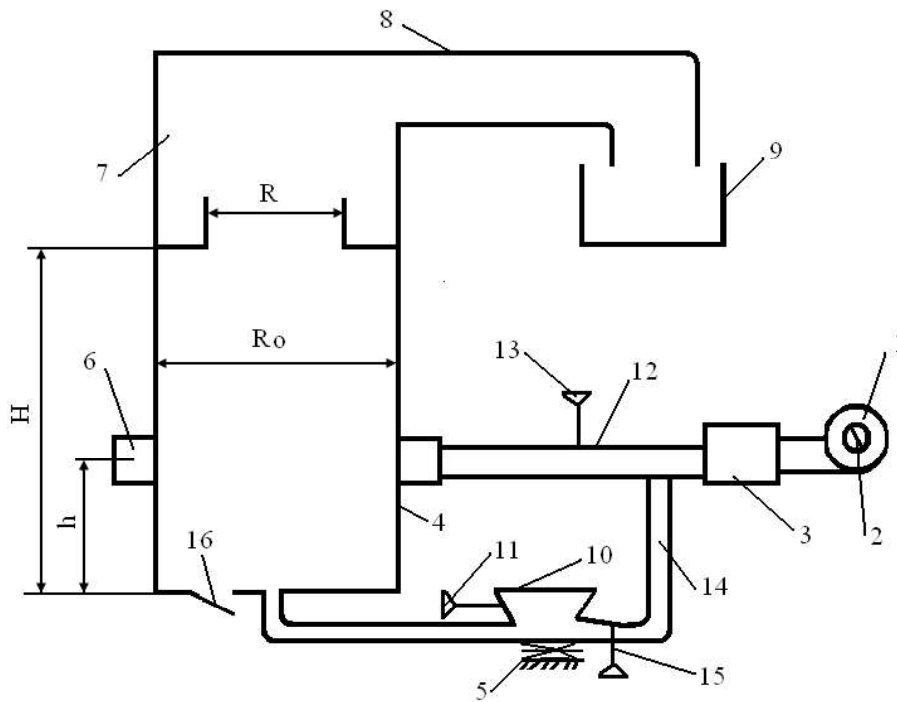


Рис. 2. Схема лабораторной установки с циклонно-вихревым режимом:
 1 – вентилятор; 2 – заслонка; 3 – калорифер; 4 – камера; 5 – вибратор;
 6 – коллектор вторичного дутья; 7 – пережим; 8 – воздушная труба;
 9 – емкость для вынесенных частиц; 10 – оперативная емкость (с материалом);
 11 – задвижка емкости; 12 – труба вторичного воздуха; 13 – задвижку
 на трубе вторичного воздуха; 14 – труба первичного воздуха;
 15 – задвижка на трубе первичного воздуха; 16 – разгрузочный клапан

Обе установки конструкционно моделировали опытные образцы топочных устройств разработанных и испытанных в ООО «ОКБ по теплогенераторам».

В модельных установках осуществляют подачу материала вместе с первичным воздухом, аналогично производственным образцам. Расход РО в моделях по сравнению с опытными образцами топков, соответственно снижен пропорционально объему их камер. Отношение скоростей вторичного V_2 и первичного V_1 воздуха изменяли в пределах $V_2/V_1 = 2...6$, а первичного и скорости витания частиц $V_1/V_b = 2...3$.

Модель с факельно-вихревым режимом по высоте не имеет ограничений для потока воздуха, а смесь воздуха с частицами после изменения направления отводится в емкость и там сепарируется. Модель с циклонно-вихревым режимом на высоте камеры имеет препятствие (пережим), которое моделирует теплообменник, расположенный в верхней части реальной установки. После пережима смесь отводилась в емкость и сепарировалась, как и для первой модели. Моделирование аэродинамики при наличии пережима осуществляли изменением отношений H/R_0 (H – высота от днища модели до пережима; R_0 – радиус камеры модели) и R/R_0 (R – радиус отверстия в пережипе). Величину H/R_0 исследовали в пределах $3 \leq H/R_0 \leq 6$, величину R/R_0 – от 1 до 0,5 (см. таблицу).

Параметры моделей и условия исследований

Наименование	Факельно-вихревой режим модели	Циклонно-вихревой режим модели
Высота, м	0,8	0,5
Размеры в поперечном сечении, м	0,06×0,2	Ø 0,11
Площадь поперечного сечения, м ²	0,012	0,1
Объем камеры, м ³	0,096	0,005
Расход воздуха, кг/с ($V_{cp} = 1,2$ м/с)	0,017	0,007
Время нахождения в камере без циркуляции, с	0,66	0,42
Кратность циркуляции	2-5	3-10
Масса взвешенных частиц, кг	0,02	0,01





На незапыленном потоке исследовали структуру течения, замеряли величины, радиальных и осевых скоростей. На запыленном потоке дополнительно исследовали степень загрузки камеры частицами и длительность их пребывания в ней. Полученные результаты обрабатывали в виде G/G_0 (где G – масса выпавших частиц; G_0 – секундный расход) от V_2/V_1 и τ/τ_0 (где τ – время пребывания частиц в камере; τ_0 – расчетное время прохождения частиц прямотоком) от V_2/V_1 .

Массу G определяли путем отсечек и взвешивания на технических весах с погрешностью $\delta = 0,001$ г, G_0 – расчетная величина. Время τ определяли по прохождению камеры меченых частиц, τ_0 – секундный расход (расчетная величина). Использовали при исследовании структуры потоков «овиднение» добавкой порошка талька или дыма в первичное и вторичное дутье.

Полученные результаты испытания на второй модели обобщали дополнительными параметрами:

$$\frac{G}{G_0} = f\left(\frac{R}{R_0}, \frac{H}{R_0}\right) \quad \text{и} \quad \frac{\tau}{\tau_0} = f\left(\frac{R}{R_0}, \frac{H}{R_0}\right). \quad (1)$$

Работу на незапыленном потоке осуществляли следующим образом.

При фиксированных величинах R/R_0 , H/R_0 продували камеру с различными значениями V_2/V_1 . При этом с помощью пневмометрической трубки типа Пито замеряли локальные скорости потока по вертикальной и горизонтальной осям в четырех сечениях по высоте камеры с шагом в 10 мм по радиусу. В качестве модельных тел использовали узкие фракции лузги подсолнечника с $R = 0,25; 1,0; 1,5$ мм, опилки с $R = 0,25$ мм. При этом соблюдали отношение:

$$\frac{2 R_0}{d_s} \geq 30, \quad (2)$$

где d_s – эквивалентный диаметр частиц, так как при этом исключается пограничный эффект.

Методика исследований аэродинамики на запыленном потоке предусматривала:

подачу материала из бункера вместимостью 0,1 кг с расходом, определенным по выражению:

$$G_0 = \frac{B_\tau \cdot V_m}{V_\tau}, \quad (3)$$

где B_τ , V_τ – паспортная подача материала и объем топочного блока ТБР-2,0; V_m – объем камеры модели;

отсечку материала после установившегося режима;

сбор и взвешивание выпавших частиц из модели;

определение времени нахождения материала в модели по меченым частицам;

исследование зависимостей G/G_0 от V_2/V_1 ; H/R_0 от R/R_0 , H/R_0 ; а также τ/τ_0 от V_2/V_1 , H/R_0 и R/R_0 .

Результаты исследований. Для обоих режимов исследованных с увеличением отношения V_2/V_1 возрастает насыщенность камеры частицами, одновременно возрастает относительная длительность их нахождения τ/τ_0 (рис. 3, 4).

Максимальная относительная масса взвешенных частиц приходится на $V_2/V_1 = 4$ для первой и $V_2/V_1 = 5$ – второй режимов течения, причем оптимальное отношение V_1/V_B – для обеих режимов сопоставимо и равно ≈ 2 .

Оптимальная высота размещения теплообменника в корпусе первой модели не исследовалась, так как конструкция топочного блока предусматривала двухшахтное исполнение с размещением его во второй шахте, во второй: $4 \leq H/R_0 \leq 6$. В этом случае при $R/R_0 \approx 0,6 \dots 0,7$ расположение и сопротивление конструкции теплообменника потоку топочных газов способствует развитому вихревому течению, а также максимальной относительной массе взвешенных частиц и времени пребывания в камере.

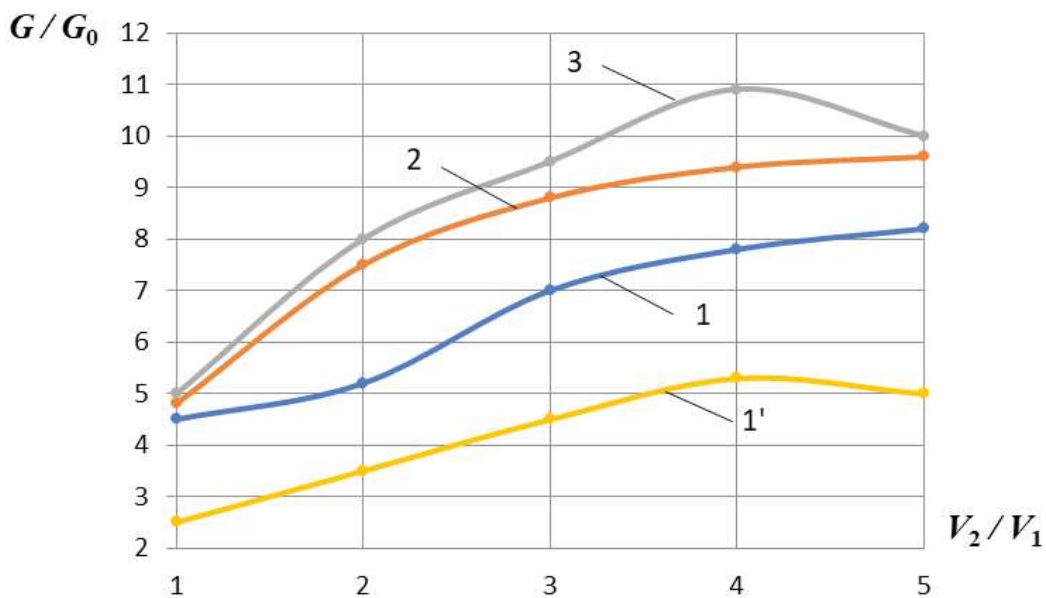


Рис. 3. Зависимость G/G_0 от V_2/V_1 ; 1, 2, 3 – циклонно-вихревой; 1' – факельно-вихревой режимы 1', 1 – $R/R_0 = 1,0$; 2, 3 – $R/R_0 = 0,7; 0,5$ при $V_2/V_1 = 4$

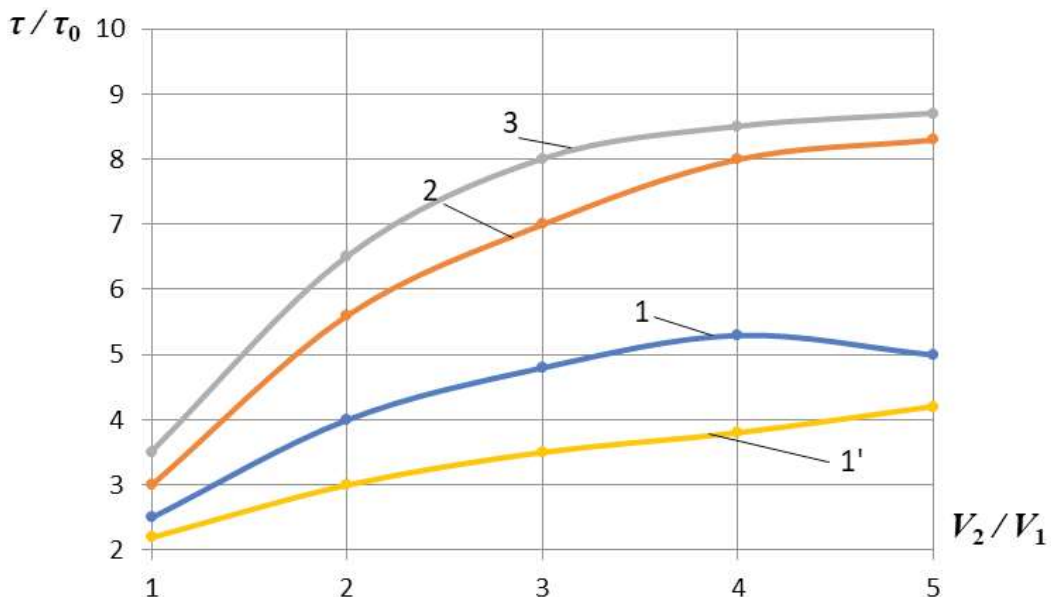


Рис. 4 – Зависимость τ/τ_0 от V_2/V_1 ; 1, 2, 3 – циклонно-вихревой; 1' – факельно-вихревой режимы 1', 1, 2, 3 – $R/R_0 = 0,7$ при $V_2/V_1 = 5$

Заключение. Моделирование аэродинамики для различных технологических схем организации топочного процесса позволило установить, что топочные блоки (агрегатируются с зерносушилками) могут быть выполнены двухшахтными: в первой сжигают мелкодисперсное топливо в факельно-вихревом режиме, во второй – устанавливают тепловоспринимающие поверхности, а также одношахтными, с размещением в ней камеры сжигания и теплообмена.

Моделированием показана целесообразность организации циклонно-вихревого режима, загруженность топки частицами при этом может быть существенно (в 1,5–2,0 раза) увеличена по сравнению с факельно-вихревым режимом.

Циклонно-вихревой режим допускает более компактную конструкцию топочного блока и оптимальную для сравнительно небольшой мощности (до 2,0 МВт).

Установлены оптимальные параметры обеспечивающую максимальную загруженность топочной камеры взвешенным материалам, при котором количество материала в отличие от секундной подачи возрастает в 5-6 раз: $V_2/V_1 = 5-6$; $V_2/V_b = 1-2$; $R/R_0 = 0,7$; $H/R_0 = 4-5$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голубкович А.В. Колос В.А., Ловкис В.Б., Дадыко А.Н. Моделирование аэродинамики факельно-вихревого режима сжигания растительных отходов в топке зерносушилки // Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве: материалы Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 70-летию со дня образования РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». Минск, 2017. С. 307–310.
2. Голубкович А.В. Беленькая Л.И., Дадыко А.Н., Ловкис В.Б. Опыт сжигания растительных отходов в топочном блоке ТБР-2.0 // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2017. № 1. С. 37–41.
3. Дадыко А.Н. Моделирование аэродинамики факельно-вихревого режима в топке для растительных отходов // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2016. № 2. С. 32–35.
4. Кириленко С.Г. Исследование особенностей процесса сжигания биомассы в топочных установках промышленных котлов // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры: материалы Всерос. науч.-метод. конф. (с междунар. участием). Оренбург, 2021. С. 1823–1830.
5. Кондобаров Е.А. Паровые и водогрейные котлы, работающие на лузге // Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвящ. 165-летию В.Г. Шухова. Белгород, 2018. С. 4399–4402.
6. Логинов С.В. Масалевич А.И., Мешков С.А., Миславский Б.В. Обзор способов и оборудования для утилизации отходов растениеводства. Реализация низкотемпературного пиролиза и газификации в пилотной и мобильной установках // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). 2020. № 55 (81). С. 75–84.
7. Оборудование для послеуборочной обработки зерновых культур // Проспект. Брянск: ООО «ОКБ по теплоэнергетике», 2016. 20 с.
8. Павлов С.А. Пехальский И.А., Кынев Н.Г. Особенности сушки семян при сжигании твердого топлива переменного качества // Вестник ВИЭСХ. 2018. № 3. С. 81–85.
9. Тихомирова Т.И. Бекетов Е.В., Головков М.А. Лузга подсолнечника – топливо под ногами // Наука молодых – будущее России: сб. науч. статей 3-й Междунар. науч. Конф. перспективных разработок молодых ученых: в 6 т. Курск, 2018. С. 255–257.

REFERENCES

1. Golubkovich A.V. Kolos V.A., Lovkis V.B., Dadyko A.N. Modeling of aerodynamics of the flare-vortex mode of combustion of vegetable waste in the furnace of a grain dryer. *Scientific and Technical Progress in Agricultural Production. Proceedings of the International Scientific and Technical Conference dedicated to the 70th anniversary of the RUE “Scientific and Technical Center of the National Academy of Sciences of Belarus on Mechanization of Agriculture”*. Minsk, 2017: 307–310.
2. Golubkovich A.V. Belenkaya L.I., Dadyko A.N., Lovkis V.B. Experience of burning vegetable waste in the furnace unit TBR-2.0. *Agricultural Machines and Technologies*. 2017; 1: 37–41.
3. Dadyko, A.N. Modeling of the aerodynamics of the flare-vortex mode in the furnace for vegetable waste. *Agricultural machines and technologies*. 2016; 2: 32–35.
4. Kirilenko S.G. Study of the features of the biomass combustion process in the furnaces of industrial boilers. *University complex as a regional center of education, science and culture. Materials of the All-Russian scientific and methodical conference (with international participation)*. Orenburg, 2021. С. 1823–1830.
5. Kondobarov E.A. Steam and hot-water boilers operating on husk. *International Scientific and Technical Conference of Young Scientists of V.G. Shukhov State Technical University. Dedicated to the 165th anniversary of V.G. Shukhov*. Belgorod. 2018: 4399–4402.
6. Loginov S.V. Masalevich A.I., Meshkov S.A., Mislavsky B.V. Review of methods and equipment for utilization of crop wastes. Realization of low-temperature pyrolysis and gasification in pilot and mobile installations. *Izvestiya St. Petersburg State Technological Institute (Technical University)*. 2020; 55 (81): 75–84.
7. Equipment for post-harvest processing of grain crops. *Prospectus*. Bryansk: LLC “OKB on heat generators”, 2016. 20 p.
8. Pavlov, S.A.; Pehalsky, I.A.; Kynev, N.G. Features of seed drying during combustion of solid fuel of variable quality. *Vestnik VIESKh*. 2018; 3: 81–85.
9. Tikhomirova T.I., Beketov E.V., Golovkov M.A. Sunflower husk – fuel underfoot. *Science of the young – the future of Russia. collection of scientific articles of the 3rd International Scientific Conference of promising developments of young scientists: in 6 volumes*. Kursk, 2018: 255–257.

Статья поступила в редакцию 4.07.2023; одобрена после рецензирования 12.08.2023; принята к публикации 30.08.2023.
The article was submitted 4.07.2023; approved after reviewing 12.08.2023; accepted for publication 30.08.2023.

