

Перспективы применения вибрационного горения твердого топлива в двухконтурной установке замкнутой схемы для повышения эффективности системы услуг агропромышленного комплекса

Е.В. Семенова, О.В. Иовлева, Г.Р. Юнусова

Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань

Аннотация: В данной статье освещается использование двухконтурной системы пульсационного сжигания твердого топлива по замкнутой схеме в системе услуг агропромышленного комплекса. Представлены результаты исследования газовых автоколебаний при горении древесных отходов в установке типа резонатор Гельмгольца. Установлено, что при определенных геометрических характеристиках установки удаётся достигнуть значительного уровня звукового давления (до 165 дБ) в камере сгорания при низком уровне шума (до 65 дБ), что способствует повышению эффективности процесса горения и соответствует экологическим требованиям. Предложены возможные области применения данной технологии, такие как утилизация сельскохозяйственных отходов, сушка сельскохозяйственной продукции, отопление тепличных комплексов и животноводческих помещений.

Ключевые слова: пульсационное горение, резонатор Гельмгольца, твердое топливо, сельскохозяйственные отходы, энергоэффективность, утилизация биомассы, агропромышленный комплекс.

Введение

Агропромышленный комплекс (АПК) является одним из крупнейших производителей отходов биологического происхождения, включая растительные остатки, древесные отходы от расчистки сельхозугодий, отходы животноводства и птицеводства. Эффективная утилизация этих отходов представляет серьезную экологическую и экономическую проблему. Одновременно сельскохозяйственные предприятия нуждаются в надежных и экономичных источниках тепловой энергии для различных технологических процессов, таких как сушка продукции, отопление теплиц и животноводческих помещений.

Технология пульсационного горения представляет собой перспективный метод сжигания различных видов топлива, в том числе отходов биологического происхождения. Данный метод основан на явлении самовозбуждения акустических колебаний газа в камере сгорания, что

приводит к интенсификации процессов тепломассообмена и повышению эффективности горения [1, 2].

Однако широкому внедрению установок пульсационного горения препятствует высокий уровень шума, излучаемого в окружающую среду, что создает неблагоприятные условия труда и негативно влияет на окружающую среду [3]. Для решения этой проблемы была предложена двухконтурная установка замкнутой схемы, в которой благодаря интерференции звуковых волн в смесительной камере снижается уровень излучаемого шума при сохранении высокой интенсивности колебаний в камере сгорания [4, 5].

Задачей данного исследования является определение характеристик процесса сгорания сельскохозяйственных отходов в системе типа резонатора Гельмгольца с замкнутым контуром, и оценка перспектив его применения в агропромышленном комплексе.

Физические основы вибрационного горения

Пульсационное (вибрационное) горение — это режим сжигания, при котором акустические колебания возникают самостоятельно в результате взаимодействия теплового источника (процесса горения) с акустическими колебаниями газа в камере сгорания [6]. Этот процесс можно рассматривать как циклический термодинамический процесс, при котором колебания газа приводят к периодическому выделению тепла [7, 8].

Для самовозбуждения колебаний необходимо, чтобы выделение тепла происходило в фазе с колебаниями давления газа, максимальное выделение тепла должно совпадать с максимальным сжатием газа. Часть тепловой энергии преобразуется в акустическую, что поддерживает и усиливает колебания [9,10].

Пульсационное горение имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными методами сжигания топлива, особенно при утилизации отходов: повышенная интенсивность тепломассообмена, что обеспечивает

более полное сгорание топлива и снижение вредных выбросов; возможность эффективного сжигания низкокалорийного и влажного топлива, в том числе различных видов биомассы; компактность установок при высокой тепловой мощности; возможность работы без дополнительного дутья, что снижает энергозатраты на собственные нужды. Эти преимущества делают технологию пульсационного горения особенно привлекательной для утилизации сельскохозяйственных отходов, которые часто характеризуются высокой влажностью, неоднородностью состава и низкой теплотворной способностью.

Исследуемая установка представлена на Рис. 1.

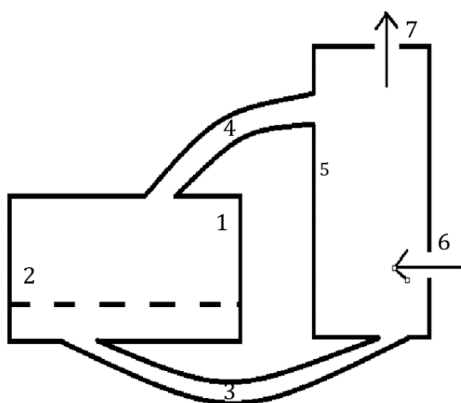


Рис. 1. Схема установки с боковым расположением интерференционной камеры

Работа установки основана на следующем принципе: холодный воздух поступает через отверстие 6 в смешительную камеру 5, после чего по воздухоподающей трубе 3 он направляется в камеру сгорания 1, где происходит процесс горения топлива, размещенного на решетке 2. Образующиеся продукты сгорания поднимаются по трубе 4 в смешительную камеру 5 и затем выходят в атмосферу через отверстие 7.

При определенных геометрических параметрах установки в системе возникают самоподдерживающиеся акустические колебания газа. Особенностью данной конструкции является то, что в смешительной камере

происходит интерференция звуковых волн, распространяющихся по двум резонансным трубам, что приводит к снижению уровня излучаемого шума при сохранении высокой интенсивности колебаний в камере сгорания.

Для анализа характеристик пульсационного горения в исследуемой установке была разработана математическая модель, включающая уравнения для определения частот колебаний газа, условий возбуждения колебаний и их амплитуды. Уравнение частот колебаний газа имеет вид:

$$\sigma_{3,4} M_3 M_2 - M_1 M_4 = 0, \text{ где } \sigma_{3,4} = \frac{\rho_{3,0} c_3 \lambda_3}{\rho_{4,l} c_4 \lambda_4}.$$

Функции M_i зависят от геометрических и термодинамических параметров установки и выведены в работе [3].

Амплитуда колебаний давления в камере сгорания определяется:

$$p_c = \frac{a_{c,L} - a_{w,3} - a_{w,4} - a_{6,l} - a_{7,l}}{a_{c,N} + a_{6,N} + a_{7,N}}, \quad I_c = 20 \log\left(\frac{p_c \cdot 10^5}{2}\right).$$

Амплитуда колебаний давления и УЗД из отверстий для выхода продуктов сгорания рассчитывается по формулам:

$$p_s = \rho_{3,0} D_6 p_c \left(\frac{(\omega R_4 / 2)^2}{c_3} + \frac{D_6 p_c}{2} \right), \quad I_s = 20 \log\left(\frac{p_s \cdot 10^5}{2}\right).$$

Результаты исследования характеристик пульсационного горения

Расчеты проводились в программе Maple, согласно следующему алгоритму, описанному ниже (рис. 2). Для установки со следующими параметрами: объем камеры сгорания $V_I = 0,02 \text{ м}^3$, радиус трубы для выхода продуктов сгорания $R_4 = 0,015 \text{ м}$, радиус воздухоподающей трубы $R_3 = 0,02 \text{ м}$, радиус отверстий интерференционной камеры $R_6 = R_7 = 0,015 \text{ м}$. Рассматривались три значения длины трубы для выхода продуктов сгорания: $l_4 = 0,6 \text{ м}$, $0,8 \text{ м}$ и $1,0 \text{ м}$, при различных значениях длины воздухоподающей трубы l_3 .

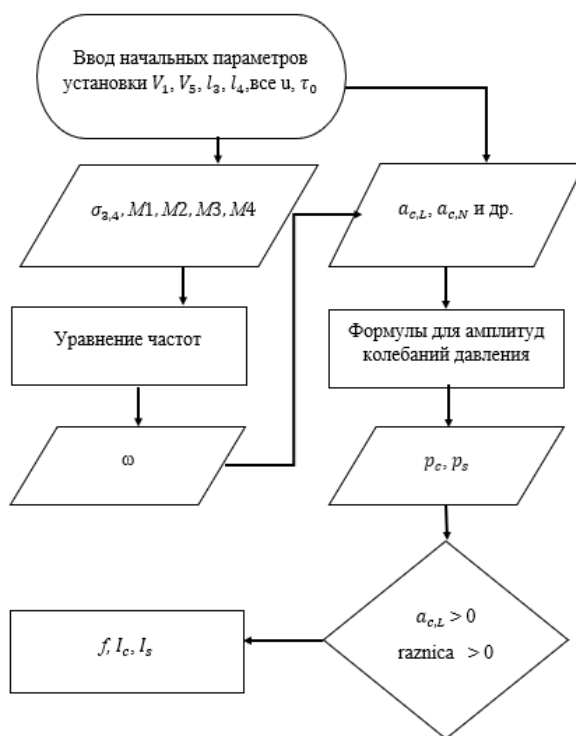


Рис. 2 Блок-схема алгоритма расчета

Анализ режимов работы установки

В результате расчетов было выявлено:

1. Режим с первой частотой колебаний (70-102 Гц): наблюдается при соотношении длин резонансных труб $l_4/l_3 \approx 1,0-1,2$ характеризуется высоким уровнем звукового давления в камере сгорания (до 165 дБ) и низким уровнем излучаемого шума (до 65 дБ). Этот режим обеспечивает наиболее интенсивное горение топлива.

2. Наиболее перспективным для практического применения является режим с первой частотой колебаний, который обеспечивает максимальную интенсификацию процесса горения при допустимом уровне шума. При этом уровень излучаемого звука (65 дБ) значительно ниже установленного санитарного норматива (80 дБ).

Применение технологии пульсационного горения в АПК обусловлено значительным повышением эффективности теплообменных процессов, что

выражается через коэффициент интенсификации теплообмена. Экспериментальные данные показывают, что его значение варьируется в диапазоне 1,5-3,0 в зависимости от амплитуды пульсаций давления в камере сгорания. При уровне звукового давления (УЗД) 165 дБ, достигаемом в установке, коэффициент интенсификации может быть аппроксимирован:

$$K_i = 1 + 0,012(P_{\text{дБ}} - 140)^{1,4},$$

где $P_{\text{дБ}}$ - уровень звукового давления в камере сгорания, дБ. Для $P_{\text{дБ}} = 165$ дБ получаем $K_i = 1,77$. Это свидетельствует о значительном повышении интенсивности теплообмена при пульсационном режиме горения.

Утилизация сельскохозяйственных отходов с получением тепла

Энергетический потенциал различных видов биомассы, образующейся в АПК, может быть оценен на основе их теплотворной способности и массовой доли в общем объеме отходов. Сравнительный анализ эффективности сжигания различных видов биомассы в установках традиционного и пульсационного горения показывает, что КПД при пульсационном горении выше на 15-25% в зависимости от вида топлива и режима работы установки. Это объясняется более полным сгоранием топлива и интенсификацией теплообмена.

Рассмотрим интенсификацию процессов сушки в пульсационных сушилках. Для типичных условий сушки зерна (снижение влажности с 20 % до 14 %, равновесная влажность 8 %) при УЗД = 165 дБ в камере сгорания время сушки сокращается в 1,8-2,2 раза по сравнению с традиционными сушилками. Экспериментальные данные показывают, что при использовании вибрационного горения удельный расход энергии снижается на 15-25 % по сравнению с традиционными сушилками. Для зерновых культур удельный расход энергии составляет 3,2-3,8 МДж/кг испаренной влаги при пульсационном горении против 4,0-4,5 МДж/кг при традиционной сушке.

Рассмотрим предлагаемую установку с точки зрения применения для отопления тепличных комплексов и животноводческих помещений. Приведем расчеты теплотехнических характеристик. Тепловая мощность пульсационного теплогенератора Q_m (кВт) определяется:

$$Q_m = B + Q_n (1 - W / 100) \eta_{\text{пульс}},$$

где Q_n низшая теплотворная способность сухого вещества (МДж/кг), W - влажность биомассы, $\eta_{\text{пульс}}$ КПД пульсационного теплогенератора, КПД которых достигает 92-96%, что выше, чем у обычных теплогенераторов.

Требуемая тепловая мощность системы отопления $Q_{\text{треб}}$ (кВт) определяется складывается из: теплотери через ограждающие конструкции, теплотери на вентиляцию, расход теплоты на технологические нужды, внутренние тепловыделения. Для теплицы площадью 1000 м² с требуемой тепловой мощностью $Q_{\text{треб}} = 200$ кВт при использовании пульсационного теплогенератора с КПД 94 % расход топлива (древесных отходов с $Q_n = 18,5$ МДж/кг и влажностью 40 %) составит:

$$B = Q_{\text{треб}} / (1 - W / 100) Q_n \eta_{\text{пульс}} = 73,8 \text{ кг/ч}$$

Обобщенные технико-экономические показатели применения установок пульсационного горения с замкнутой схемой в различных процессах АПК представлены в таблице 1.

Таблица 1. Техничко-экономические показатели применения установок пульсационного горения в АПК

Показатель	Утилизация отходов	Сушка продукции	Отопление помещений
Снижение расхода топлива, %	20-25	15-25	8-12
Снижение времени процесса, %	-	45-55	-
Снижение эксплуатац.затрат, %	15-20	20-30	10-15

Срок окупаемости, лет	1,0-1,5	1,5-2,0	1,5-2,0
Снижение выбросов вредных веществ, %	30-40	20-30	15-25

Для типичного сельскохозяйственного предприятия с годовым объемом утилизируемых отходов 1000 т, потребностью в сушке 5000 т зерна и отапливаемой площадью теплиц 5000 м² интегральный экономический эффект от внедрения комплекса установок пульсационного горения составляет 12-15 млн руб. за 10-летний период при ставке дисконтирования 10%.

Выводы

Установлено, что применение пульсационного горения в агропромышленном комплексе обеспечивает значительную интенсификацию теплообменных процессов и позволяет существенно повысить энергоэффективность технологических процессов.

Предложенная модель процесса утилизации биомассы в установке пульсационного горения позволяет прогнозировать эффективность сжигания различных видов сельскохозяйственных отходов. Показано, что коэффициент полноты сгорания при пульсационном режиме возрастает на 20-25 % по сравнению с традиционными технологиями сжигания, что обеспечивает более эффективное использование энергетического потенциала биомассы.

Определено, что использование пульсационного режима горения при сушке сельскохозяйственной продукции позволяет сократить время сушки в 1,8-2,2 раза и снизить удельный расход энергии на 15-25 %. Для зерновых культур удельный расход энергии составляет 3,2-3,8 МДж/кг испаренной влаги при пульсационном горении против 4,0-4,5 МДж/кг при традиционной сушке.

Выявлено, что наиболее эффективным режимом работы двухконтурной установки пульсационного горения является режим с первой частотой

колебаний, при котором достигается максимальный уровень звукового давления в камере сгорания (до 165 дБ) при допустимом уровне излучаемого шума (до 65 дБ), что соответствует санитарным нормам и не требует дополнительных мероприятий по шумоизоляции.

Результаты исследования показывают, что двухконтурная установка пульсационного горения с замкнутой схемой представляет собой перспективное энергоэффективное решение для агропромышленного комплекса, обеспечивающее комплексное решение задач утилизации сельскохозяйственных отходов, энергосбережения и улучшения экологических показателей производства.

Полученные результаты могут служить научной и методической основой для проектирования и внедрения энергоэффективных установок пульсационного горения в различных отраслях агропромышленного комплекса.

Литература

1. Раушенбах Б. В. Вибрационное горение. 1961. Москва. Физматлит. 1961. 251 с.
2. Ларионов В. М., Зарипов Р. Г. Автоколебания газа в установках с горением. Казань: Издательство Казанского государственного технического университета. 2003. 228 с.
3. Горев, В. А., Салымова, Е. Ю. О возможности вибрационного горения при внутренних взрывах // Пожаровзрывобезопасность. 2017. №5. С. 13-20.
4. Ларионов В.М., Ахмадуллин А.Н., Яллина Е.. Казанский (Приволжский) федеральный университет. Устройство пульсационного сжигания кускового твердого топлива. Пат. № 135768 РФ. № 2013133677/06. Дата подачи 18.07.2013. Дата публикации 20.12.2013. Бюл. № 35.

5. Bisio G., Rubatto G. Sondhauss and Rijke oscillations—thermodynamic analysis, possible applications and analogies // *Energy*. 1999. №24(2). pp. 117–131.
6. Durox D., Moeck J.P., Bourguin J.F., Schuller T, Candel S., Morenton P., Viallon M.. Flame dynamics of a variable swirl number system and instability control // *Combust. Flame*. 2013. № 160. pp. 1729-1742.
7. Семенова Е.В., Ларионов В.М., Ваньков Ю.В. Термодинамический и акустический анализ пульсационного горения твердого топлива в устройстве типа резонатора Гельмгольца // *Проблемы энергетики*. 2018. 7 с.
8. Павлов Г.И., Кириченко С.М., Гармонов С.Ю., Кочергин А.В., Козиков А.Ю., Никитин М.А., Багнюк В.П. Установка пульсирующего горения для обезвреживания отходов биологического характера и лечебно-профилактических учреждений // *Казань: Вестник КТУ*, 2009. 9 с.
9. Синицын А.А. Частотно-импульсная диаграмма изменения давления в камере котла вибрационного горения топлива // *М.: Международный журнал экспериментального образования*. 2012. 5 с.
10. Филипов С.Е., Ларионов В.М., Рукавишников Д.В. Механизмы возбуждения и теоретическая модель вибрационного горения твердого топлива в трубе // *Проблемы энергетики*. 2006. 9 с.

References

1. Raushenbah B. V. Vibracionnoe gorenje [Vibrating combustion]. 1961. Moskva. Fizmatlit, 1961. 251 p.
 2. Larionov V. M., Zaripov R. G. Avtokolebaniya gaza v ustanovkax s gorenjem. Kazan` [Self-oscillation of gas in combustion installations]: Izdatel'stvo Kazanskogo gosudarstvennogo texnicheskogo universiteta, 2003. 228 p.
 3. Gorev V. A., Saly`mova E. Yu. Pozharovzry`vobezopasnost` [Fire and Explosion Safety]. 2017. №5. P. 13-20.
-

4. Larionov V.M., Ahmadullin A.N., Yallina E.V. Kazanskij (Privolzhskij) federal'nyj universitet. Ustrojstvo pul'sacionnogo szhiganiya kuskovogo tverdogo topliva [Pulsation combustion device for lump solid fuel]. Pat. № 135768 RF. № 2013133677/06. Data podachi 18.07.2013. Data publikacii 20.12.2013. Byul. № 35.
5. Bisio, G., & Rubatto, G. Energy. Vol. 24(2). P. 117-131.
6. Durox D., Moeck J.P., Bourgouin J.F., Schuller T, Candel S., Morenton P., Viallon M. Combust. Flame. 2013. № 160. P. 1729-1742.
7. Semenova E.V., Larionov V.M., Van'kov Yu.V. Problemy' e'nergetiki [Power engineering: research, equipment, technology]. 2018. 7 p.
8. Pavlov G.I., Kirichenko S.M., Garmonov S.Yu., Kochergin A.V., Kozikov A.Yu., Nikitin M.A., Bagnyuk V.P. Kazan': Vestnik KTU, 2009. 9 p.
9. Sinicyn A.A. Mezhdunarodnyj zhurnal e'ksperimental'nogo obrazovaniya [International Journal of Experimental Education.]. 2012. 5 p.
10. Filipov S.E., Larionov V.M., Rukavishnikov D.V. Problemy' e'nergetiki [Power engineering: research, equipment, technology]. 2006. 9 p.

Дата поступления: 29.04.2025

Дата публикации: 25.06.2025