

Ю. А. Гичёв /д. т. н./, М. Ю. Ступак,
В. А. Перцевой /к. т. н./, М. Ю. Мацукевич

Национальная металлургическая академия
Украины, г. Днепро, Украина

Экспериментальное исследование диссипации пульсаций газового потока при пульсационно-резонансном сжигании топлива

Yu. A. Gichov /Dr. Sci. (Tech.)/, M. Yu. Stupak,
V. A. Pertsevov /Cand. Sci. (Tech.)/,
M. Yu. Matsukevich

National metallurgical academy of Ukraine, Dnipro,
Ukraine

Experimental investigation of the dissipation of gas flow pulsations in pulsation-resonant combustion of fuel

Цель. Получение картины диссипации пульсирующего газового потока и эмпирической зависимости для расчета диссипации.

Методика. Диссипация пульсаций определялась экспериментально по снижению интенсивности звука при прохождении пульсирующего газового потока через экспериментальную установку от момента генерации пульсаций до выхода из трубопровода.

Результаты. Получено критериальное уравнение, позволяющее выполнить расчет диссипации пульсаций газового потока в системе пульсационно-резонансного сжигания топлива в зависимости от статического давления газа в трубопроводе, частоты пульсаций и длины трубопровода.

Научная новизна. Получена картина диссипации пульсаций газового потока в трубопроводе при движении потока от пульсатора к горелке.

Практическая значимость. Возможность учета диссипации пульсаций газового потока при разработке системы пульсационного сжигания топлива. (Ил. 4. Табл. 1. Библиогр.: 7 назв.)

Ключевые слова: сжигание топлива, пульсация, диссипация, звуковое давление, амплитуда, критериальное уравнение.

Введение. Данные исследования касаются разработки пульсационно-резонансного сжигания топлива при сушке и разогреве сталеразливочных ковшей [1]. Опытно-промышленные исследования показали возможность существенной экономии топлива при пульсационно-резонансном сжигании. Диссипация пульсаций газового потока при реализации пульсационного сжигания топлива неизбежна, так как пульсатор и горелочное устройство размещены на расстоянии друг от друга. Движение пульсирующего газового потока от пульсатора к горелке по трубопроводу приводит к рассеиванию и потере энергии волнового движения и, соответственно, к ослаблению пульсаций.

Влияние диссипации особенно ощутимо при реализации пульсационно-резонансного сжигания, которое связано с настройкой частоты пульсаций газового потока на частоту собственных колебаний рабочего объема печи или агрегата [1]. Ослабление пульсаций газового потока затрудняет настройку и выбор наиболее эффективного диапазона резонансных частот.

Постановка задачи. Исследованиям пульсации в виде колебаний давления и расхода газа в трубопроводных системах посвящено достаточно большое количество работ, преимущественно теоретических и связанных с волновым движением газового потока [2–6]. Вопросы диссипации волновой энергии в этих работах несут второстепенный характер. Теоретические решения уравнений волнового движения возможны только с учетом допущений, упрощающих задачу, что сказывается на значении полученных результатов для решения практических задач. Теоретические решения волнового движения в ряде случаев требуют экспериментальных значений параметров и величин, входящих в эти решения. Во всех случаях результаты теоретических решений требуют экспериментальной проверки.

В связи с этим целесообразным является исследование диссипации пульсаций газового потока на экспериментальной установке. При этом задача исследования состоит в следующем:

– получение картины диссипации с учетом изменения основных характеристик системы

пульсационно-резонансного сжигания (частоты пульсаций, давления газа, длины трассы газопровода);

– получение эмпирической зависимости для расчета диссипации;

– формулировка рекомендаций, связанных со снижением влияния диссипации пульсаций на процесс сжигания топлива.

Экспериментальная установка. Общий вид экспериментальной установки представлен на рис. 1.

Экспериментальная установка подключена к стационарному трубопроводу сжатого воздуха и последовательно включает: форкамеру, измерительную трубку Вентури, пульсатор с цилиндрическим прерывателем, съемные секции трубопровода и диафрагму, установленную на открытом торце трубопровода для имитации газодинамического сопротивления горелки. Длина трубопровода принята в соответствии с чертежами опытного поста сушки сталеразливочных ковшей [1]. Отношение длины трубопровода к внутреннему диаметру трубы (безразмерная длина трубопровода) – $\bar{l}_m = 5,38 / 0,089 \approx 60$. Трубопровод, на котором исследовалась диссипация пульсирующего газового потока, набирался из секций труб длиной 0,41 м, 0,82 и 1,64 м. Путем изменения напряжения постоянного тока реостатом 24 устанавливалась заданная частота вращения цилиндрического прерывателя пульсатора.

Диссипация пульсаций определялась по снижению интенсивности звука при прохождении пульсирующего газового потока от момента генерации пульсаций до выхода из трубопровода.

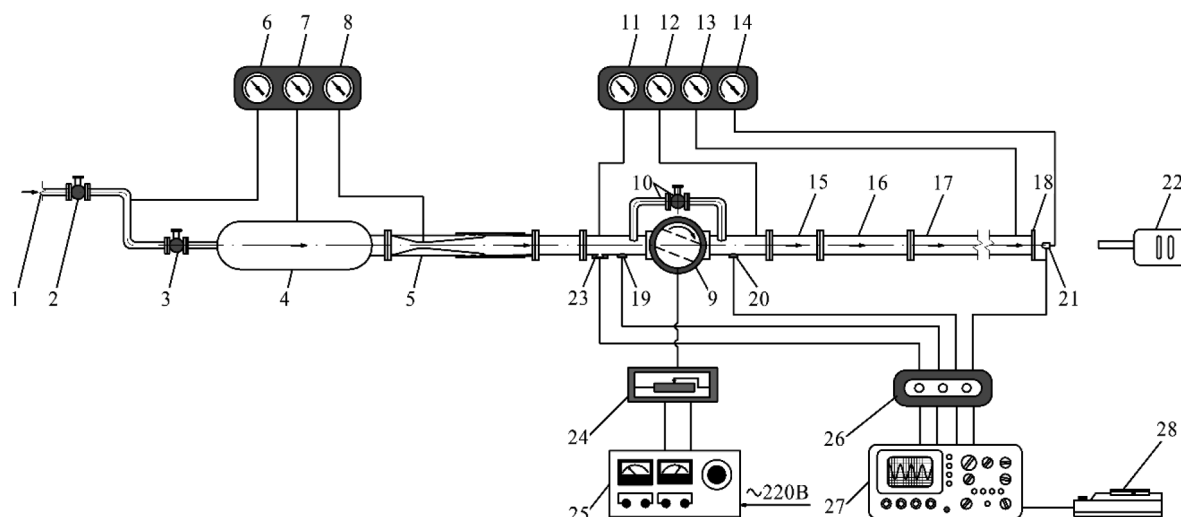


Рис. 1. Общий вид экспериментальной установки для исследования диссипации пульсаций газового потока: 1 – трубопровод сжатого воздуха; 2 и 3 – запорная и регулирующая задвижки; 4 – форкамера; 5 – расходомерная трубка Вентури; 6 и 7 – манометры; 8 – вакуумметр; 9 – пульсатор с цилиндрическим прерывателем потока газа; 10 – байпас с запорно-регулирующей задвижкой; 11 – 14 – манометры; 15–17 – секции трубопровода; 18 – диафрагма, имитирующая горелочное устройство; 19–21 – датчики пульсаций; 22 – источник света; 23 – фотодатчик; 24 – реостат; 25 – выпрямитель электрического тока; 26 – преобразователь сигнала; 27 – осциллограф; 28 – графопостроитель

Интенсивность звука пульсирующего газового потока перед пульсатором I_1 , после пульсатора I_2 и на выходе из трубопровода I_3 определялась выражениями [7]:

$$I_1 = \frac{p_{a1}^2}{\rho \cdot v_3}, \quad I_2 = \frac{p_{a2}^2}{\rho \cdot v_3}, \quad I_3 = \frac{p_{a3}^2}{\rho \cdot v_3}, \quad (1-3)$$

где p_{a1} , p_{a2} и p_{a3} – амплитудные значения акустического давления пульсирующего газового потока (рис. 1) до пульсатора (датчик пульсаций 19), после пульсатора (датчик 20) и на выходе из исследуемого участка трубопровода (датчик 21);

Анализ и обобщение результатов экспериментального исследования. Анализ результатов выполнен путем сравнения относительной интенсивности звука при прохождении пульсирующего газового потока через пульсатор \bar{I}_n , через пульсатор совместно с исследуемым участком трубопровода \bar{I}_{n-m} и через исследуемый участок трубопровода \bar{I}_m без учета пульсатора:

$$\bar{I}_n = \frac{I_2}{I_1}, \quad \bar{I}_{n-m} = \frac{I_3}{I_1}, \quad \bar{I}_m = \frac{I_3}{I_2} \quad (\text{доли ед.}). \quad (4-6)$$

На рис. 2. представлено относительное изменение интенсивности звука пульсирующего газового потока за пульсатором \bar{I}_n , характеризующее акустическое сопротивление пульсатора, и в конце трубопровода \bar{I}_{n-m} , характеризующее акустическое сопротивление пульсатора и диссипацию пульсаций в трубопроводе.

Данные, представленные на рис. 2, указывают на снижение интенсивности звука за пульсатором, т. к. пульсатор, помимо генерации пульсаций, создает акустическое сопротивление, что

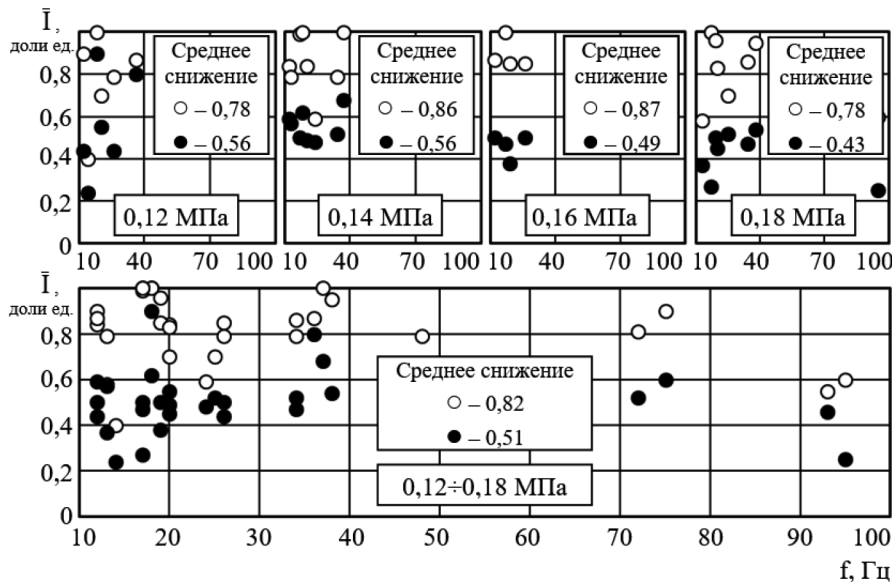


Рис. 2. Относительное изменение интенсивности звука пульсирующего газового потока при прохождении пульсатора \bar{I}_n (○) и пульсатора совместно с трубопроводом \bar{I}_{n-m} (●) при безразмерной длине трубопровода $\bar{l}_m = l_m/d_m = 60$ в зависимости от давления газа

приводит к снижению звукового давления. Снижение интенсивности звука за пульсатором (○) составило $0,78 \div 0,87$ в зависимости от статического давления перед пульсатором, а среднее снижение интенсивности звука во всем диапазоне давлений составило $-0,82$.

Изменение интенсивности звука за трубопроводом (●), которое включает совместное акустическое сопротивление пульсатора и диссипацию в трубе, составило в зависимости от давления $0,43 \div 0,56$ при среднем снижении $-0,51$.

Влияние газодинамического сопротивления горелки на торце трубопровода можно оценить путем сравнения данных, приведенных на рис. 3. На рис. 3а показано снижение интенсивности звука при наличии диафрагмы, имитирующей сопротивление горелки, а на рис. 3б – без диафрагмы.

Сравнение данных на рис. 3а и 3б показывает, что отсутствие диафрагмы дополнительно сни-

жает амплитудное звуковое давление за трубопроводом на 6 %.

На рис. 4. показана диссипация пульсаций газового потока при сокращении длины трубопровода с 5,38 м (безразмерная длина – 60) до 2,95 м (безразмерная длина – $\bar{l}_m = l_m/d_m = 2,95 / 0,089 \approx 33$).

Уменьшение длины трубопровода практически не сказывается на диссипации пульсаций, что соответствует плоской конфигурации звуковой волны в трубопроводе, при которой звуковые лучи параллельны друг другу [7]. В случае плоской звуковой волны энергия пульсаций не рассеивается в стороны к периферии потока, а интенсивность звука практически не зависит от расстояния, прошедшего звуковой волной.

Сравнение экспериментальных данных показывает, что потери энергии звуковой волны наиболее значительны при деформации плоской звуковой волны. Это происходит в самом пульсаторе и на выходе пульсирующего газового потока

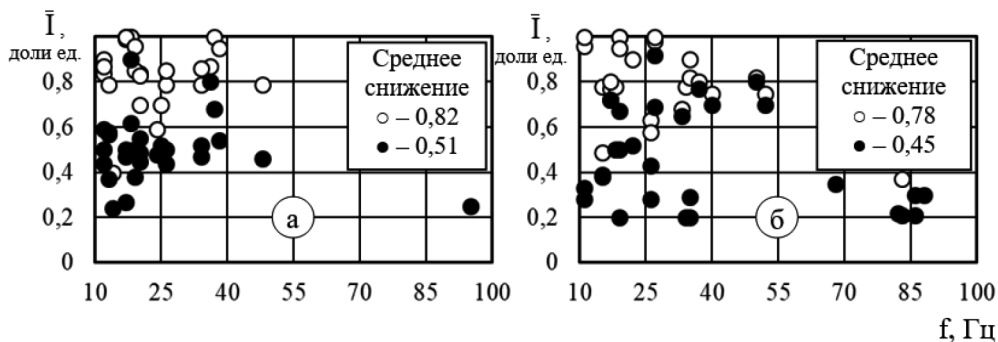


Рис. 3. Изменение интенсивности звука пульсирующего газового потока за пульсатором (○) и в конце трубопровода (●) с учетом (а) и без учета (б) газодинамического сопротивления горелки (безразмерная длина трубопровода $\bar{l}_m = 60$)

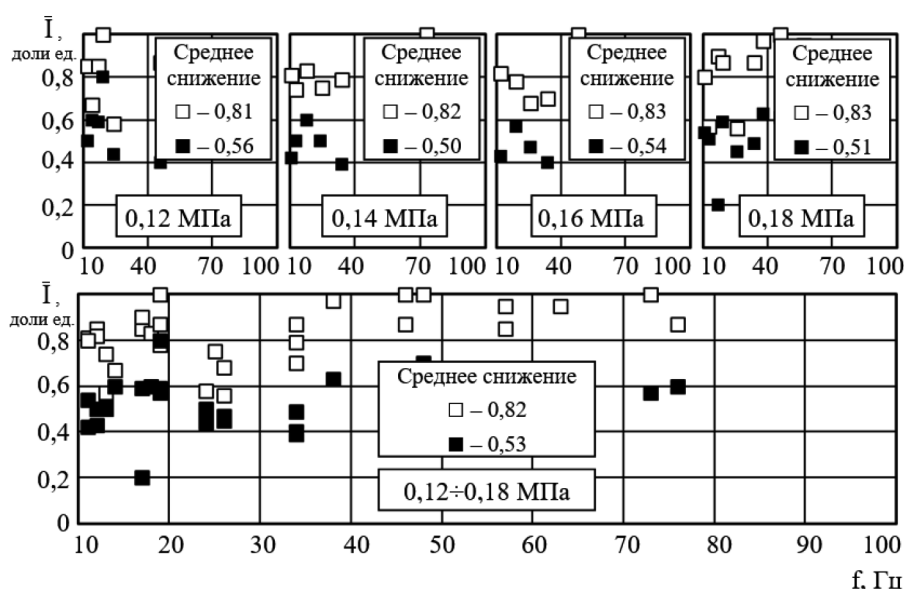


Рис. 4. Изменение интенсивности звука пульсирующего газового потока за пульсатором \bar{I}_n (□) и в конце трубопровода \bar{I}_{n-m} (■) при безразмерной длине трубопровода $\bar{l}_m = 33$

из трубопровода. Причем имитирующая горелку диафрагма, установленная на торце трубопровода, сглаживает деформацию потока, а отсутствие диафрагмы усиливает деформацию и увеличивает диссипацию звуковой энергии.

Анализ волнового уравнения, размерностей параметров и условия проведения экспериментов позволяет обобщить экспериментальные данные путём аппроксимации совокупности полученных результатов критериальным уравнением:

$$\bar{I} = C \cdot St^q \cdot \left(\frac{p}{p_0}\right)^r \cdot \left(\frac{l_m}{d_m}\right)^s, \quad (7)$$

где p , p_0 – соответственно, давление в трубопроводе и атмосферное давление; St – число Струхаля, которое учитывает влияние на изменение интенсивности звука частоты пульсаций f

$$St = \frac{f \cdot l_m}{v}, \quad (8)$$

здесь v – скорость газа, проходящего через трубопровод экспериментальной установки.

Полученные в результате обработки экспериментальных данных значения коэффициентов в уравнении (7) (табл. 1) позволяют выполнить

расчет диссипации пульсаций газового потока в системе пульсационно-резонансного сжигания топлива.

Критериальное уравнение (7) с учетом коэффициентов, приведенных в табл. 1, применимо при давлении в трубопроводе $p = 0,12 \div 0,18$ МПа, частоте пульсаций $f = 10 \div 100$ Гц и относительной длине трубопровода $l_m/d_m = 2 \div 60$ с отклонением расчетных данных от экспериментальных $\pm 12\%$.

Выводы

1. Экспериментальные исследования пульсирующего газового потока показали, что во всех случаях происходит диссипация пульсаций газового потока, причем наиболее контрастно это проявляется за пульсатором и на выходе из трубопровода вследствие изменения турбулентности потока.

2. Звук распространяется в трубопроводе плоской волной, что делает потери звукового давления при прохождении по прямолинейному участку трубы незначительными по сравнению с потерей звукового давления в пульсаторе и на выходном участке трубы.

Таблица 1

Значения коэффициентов в критериальном уравнении (7) для расчета диссипации пульсаций газового потока

Место определения звукового давления \bar{I}	Частота пульсаций, Гц	C	q	r	s
за пульсатором \bar{I}_n	$10 < f < 60$	0,80	0,06	-0,51	0,018
	$60 < f < 100$	0,85	-0,12	0,42	0,10
на линейном участке трубопровода \bar{I}_m	$10 < f < 60$	0,45	0,08	-0,37	0,044
	$60 < f < 100$	0,39	0,16	0,37	-0,13
в конце трубопровода \bar{I}_{n-m}	$10 < f < 60$	0,51	-0,056	0,43	0,044
	$60 < f < 100$	0,42	0,19	0,39	-0,13

3. Для снижения диссипации при конструировании трассы пульсирующего газового потока следует избегать участков, деформирующих газовый поток и вызывающих изменения в турбулентности потока.

4. Обобщение экспериментальных данных представлено в виде критериального уравнения, позволяющего выполнить расчет диссипации пульсаций газового потока в системе пульсационно-резонансного сжигания топлива в зависимости от давления газа, частоты пульсаций и длины трубопровода.

Библиографический список / References

1. Gichov Iu. The application of fuel burning pulsating resonance during drying and heating processes of steel-teeming ladles / Iu. Gichov, M. Stupak, V. Pertsevoi, M. Matsukevych // Metallurgical and Mining Industry. – Dnipro. – 2016. – № 10. – P. 75–83.

Gichov Iu., Stupak M., Pertsevoi V., Matsukevych M. *The application of fuel burning pulsating resonance during drying and heating processes of steel-teeming ladles*. Metallurgical and Mining Industry. Dnipro, 2016, no. 10, pp. 75-83.

2. Аввакумов А. М. Нестационарное горение в энергетических установках / А. М. Аввакумов, И. А. Чучкалов, Я. М. Щелоков. – Л.: Недра, 1987. – 159 с.

Avvakumov A. M. Chuchkalov I. A., Shchelokov Ya. M. *Nestatsionarnoe gorenje v energeticheskikh ustanovkakh*. Leningrad, Nedra, 1987, 159 p.

3. Галицейский Б. М. Тепловые и гидродинамические процессы в колеблющихся потоках / Б. М. Галицейский, Ю. А. Рыжов, Е. В. Якуш. – М.: Машиностроение, 1977. – 256 с.

Galitseyskiy B. M., Ryzhov Yu. A., Yakush E. V. *Teplovye i gidrodinamicheskie protsessy v koleblyushchikhsya potokakh*. Moscow, Mashinostroenie, 1977, 256 p.

4. Борисов Ю. Я. Воздействие акустических колебаний на устойчивость и структуру течения / Ю. Я. Борисов, Э. И. Розенфельд // Акустический журнал. – 1971. – Т. 17, вып. 2. – С. 179–198.

Borisov Yu. Ya., Rozenfel'd E. I. *Vozdeystvie akusticheskikh kolebaniy na ustoychivost' i strukturu techeniya*. Akusticheskiy zhurnal. 1971, vol. 17, issue 2, pp. 179-198.

5. Васильев О. Ф. Неустановившееся турбулентное течение в трубе / О. Ф. Васильев,

В. И. Квон // Журнал прикладной механики и технической физики. Изв. АН СССР. – 1971. – № 6. – С. 132–140.

Vasil'ev O. F., Kvon V. I. *Neustanovivsheesya turbulentnoe techenie v trube*. Zhurnal prikladnoy mekhaniki i tekhnicheskoy fiziki. Izv. AN SSSR. 1971, no. 6, pp. 132-140.

6. Беляев Н. М. Термоакустические колебания газожидкостных потоков в сложных трубопроводах энергетических установок / Н. М. Беляев, Н. П. Белик, А. В. Польшин. – Киев: Вища школа, 1985. – 160 с.

Belyaev N. M., Belik N. P., Pol'shin A. V. *Termoakusticheskie kolebaniya gazozhidkostnykh potokov v slozhnykh truboprovodakh energeticheskikh ustanovok*. – Kiev, Vishcha shkola, 1985, 160 p.

7. Ефимов А. П. Акустика: Справочник / А. П. Ефимов, А. В. Никонов, М. А. Сапожков, В. И. Шоров; под редакцией М. А. Сапожкова. – 2-е изд. – М.: Радио и связь, 1989. – 336 с.

Efimov A. P., Nikonov A. V., Sapozhkov M. A., Shorov V. I. *Akustika: Spravochnik*. Moscow, Radio i svyaz', 1989, 336 p.

Purpose. Getting a picture of the dissipation of a pulsating gas flow and empirical relationships for calculation of dissipation

Methodology. Dissipation of the pulsations was determined experimentally to reduce the intensity of the sound at passage of a pulsating gas flow through the experimental setup from the moment of generation of the ripple to the exit of the pipeline.

Findings. The obtained criterion equation that allows to calculate the dissipation of the pulsation of the gas flow in the system pulsation resonance combustion of the fuel depending on the static gas pressure in the pipeline, the ripple frequency and length of the pipeline.

Originality. The resulting pattern of dissipation of the pulsations of the gas flow in the pipeline when flow from the pulsator to the burner.

Practical value. The possibility of accounting for dissipation pulsation of the gas flow while developing a system of pulsating combustion.

Key words: combustion of fuel, pulsation, dissipation, sound pressure, amplitude, criterialequatio.

**Рекомендована к публикации
д. т. н. М. В. Губинским**

Поступила 16.11.2017