

Гичёв Ю.А. – д-р техн. наук, проф., НМетАУ

Бевз Л.С. – магистрант, НМетАУ

Ступак М.Ю. – студент, НМетАУ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИССИПАЦИИ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ГАЗОВОГО ПОТОКА

Приведены результаты экспериментального исследования диссипации пульсирующего газового потока применительно к пульсационному сжиганию топлива в процессах сушки и разогрева сталеразливочных ковшей. Результаты исследований позволяют подобрать частоты пульсаций, на которых следует ожидать наиболее эффективной работы системы пульсационного сжигания топлива.

Введение

Диссипация пульсирующего газового потока касается системы пульсационного сжигания топлива.

Пульсационное сжигание является одним из наиболее перспективных направлений в экономии топлива, однако в черной металлургии оно не нашло пока достаточно широкого применения. Поэтому на данном этапе для внедрения пульсационного сжигания целесообразно выбирать объекты исследования, отличающиеся большим потреблением топлива и возможностью варьирования процессом без ущерба для конечного результата. Таким процессом является термообработка сталеразливочных ковшей [1 – 3].

Сушка и разогрев сталеразливочных ковшей достаточно энергоемкие технологические процессы, потребляющие значительное количество природного газа. Жесткие технологические условия процессов сушки и разогрева, а также отсутствие возможностей кардинального изменения технологии термообработки ковшей, ограничивают количество вариантов для выбора технического решения по экономии топлива. В таких условиях применение системы пульсационного сжигания топлива вполне оправдано, т.к. создает предпосылки для экономии без изменения основных принципов сложившейся технологии термообработки. В основу исследований положено предположение о возможности достижения резонансного режима пульсационного сжигания топлива, при котором частота генерируемых пульсаций совпадает с частотой собственных колебаний в рабочем объеме ковша.

Пульсационно-резонансный режим сжигания топлива при сушке и разогреве сталеразливочных ковшей является наиболее предпочтительным, так как может обеспечить при минимальных энергозатратах на возбуждение пульсаций максимальную экономию топлива.

Постановка задачи исследования

Постановка задачи исследования диссипации пульсирующего газового потока основана на результатах опытно-промышленного исследования. Схема аппаратного обеспечения опытно-промышленной установки представлена на рисунке 1.

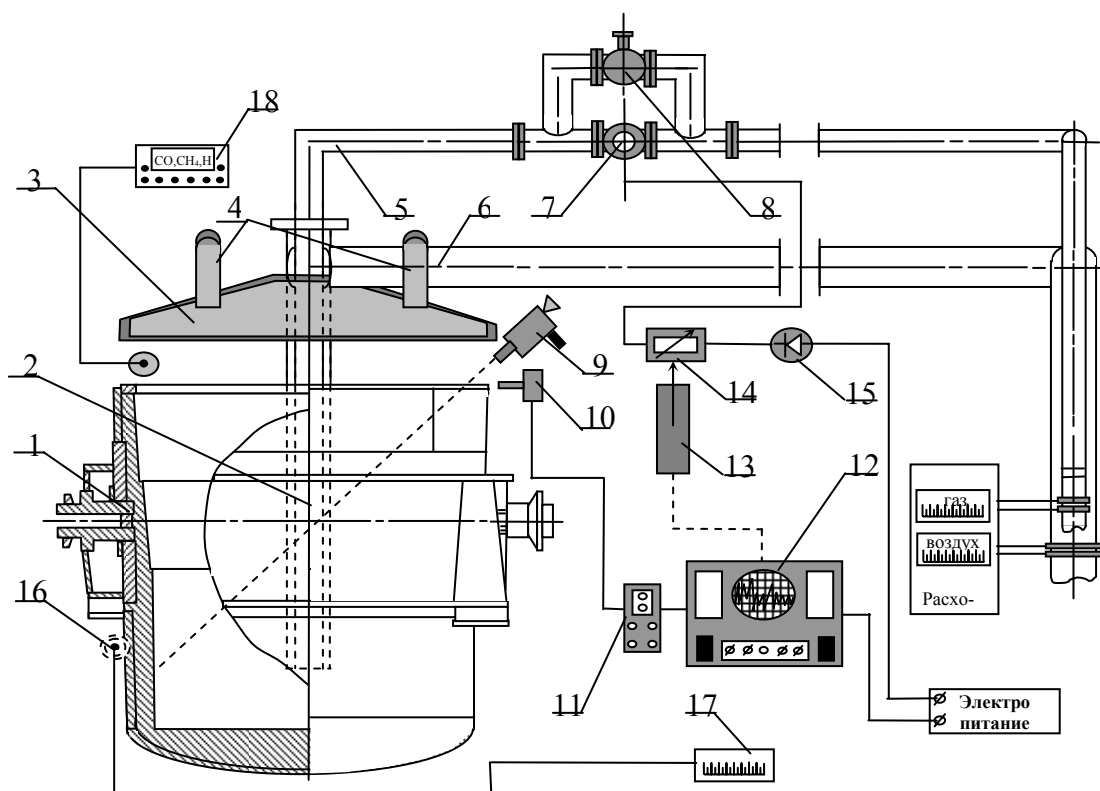


Рис. 1. Схема аппаратного обеспечения измерений при пульсационно-резонансной термообработке сталеразливочных ковшей:

- 1 – ковш; 2 – горелка; 3 – крышка ковша; 4 – отвод продуктов сгорания;
- 5 – подвод природного газа; 6 – подвод воздуха;
- 7 – пульсатор с электродвигателем; 8 – байпас с клапаном;
- 9 – радиационный пирометр; 10 – датчик пульсаций; 11 – предусилитель;
- 12 – анализатор спектра; 13 – исполнительный механизм; 14 – реостат;
- 15 – выпрямитель; 16 – термопара; 17 – потенциометр; 18 – хроматограф

Для выяснения частот собственных колебаний рабочего объема ковша следует проводить акустический анализ. Для сушки и разогрева сталеразливочных ковшей полноценный экспериментальный акусти-

ческий анализ затрудняется неблагоприятными промышленными условиями: высокие температуры, посторонние шумовые помехи, требования техники безопасности и прочее. В связи с этим поиск резонансных частот выполнен теоретически с использованием расчетной модели резонатора Гельмгольца. Результаты расчетного анализа представлены в таблице 1.

Таблица 1

Акустическая характеристика сталеразливочного ковша

Наименование параметров	Высота щели, м	
	0,08	0,15
Акустический объем системы, м ³	27,55	28,17
Площадь щели между нижним срезом крышки и верхним срезом ковша, м ²	0,91	1,71
Частота собственных колебаний, Гц	37	50

В опытно-промышленной установке пульсационный блок установлен на линии подачи природного газа. В перспективе предполагается устанавливать пульсационный блок также и на воздушной линии.

В качестве устройства для генерации пульсирующего газового потока установлен пульсатор золотникового типа, который обеспечивает возможность регулирования частоты пульсаций, что необходимо для настройки частоты пульсаций при пульсационно-резонансном сжигании.

Пульсатор состоит из вращающегося золотника с отверстием. Вращение золотника осуществляется электродвигателем. При вращении золотника проходное сечение трубопровода перекрывается с определенной частотой, обеспечивая пульсацию газового потока.

Испытания показали работоспособность пульсационного устройства. Существенное влияние на эффективность сушки оказывала точность установки ковша относительно крышки поста. Сдвиг ковша в сторону более чем на 100 мм увеличивал теплотери, снижал термостойкость крышки и резко уменьшал эффект резонанса. Амплитуду резонанса снижают также открытые шиберные отверстия на дне ковша. Результаты исследования создали предпосылки для изменения существующей технологической инструкции сушки сталеразливочных ковшей с введением элементов пульсационно-резонансного сжигания газа.

При прохождении по трубопроводу от пульсационного блока до горелки импульс пульсации претерпевает изменения. Происходила диссипация (рассеивание) пульсации газового потока. Выяснить эти

изменения и учесть их в опытно-промышленных исследованиях при сушке и разогреве сталеразливочных ковшей является целью данной работы.

Таким образом, в задачу исследований диссипации газового потока в системе пульсационного сжигания топлива входит: экспериментальное исследование диссипации пульсаций газового потока в транспортной линии и выдача практических рекомендаций, касающихся наиболее предпочтительных режимов реализации пульсационного сжигания топлива.

Методика экспериментального исследования

Экспериментальная установка для исследования диссипации пульсирующего газового потока, представлена на рисунке 2.

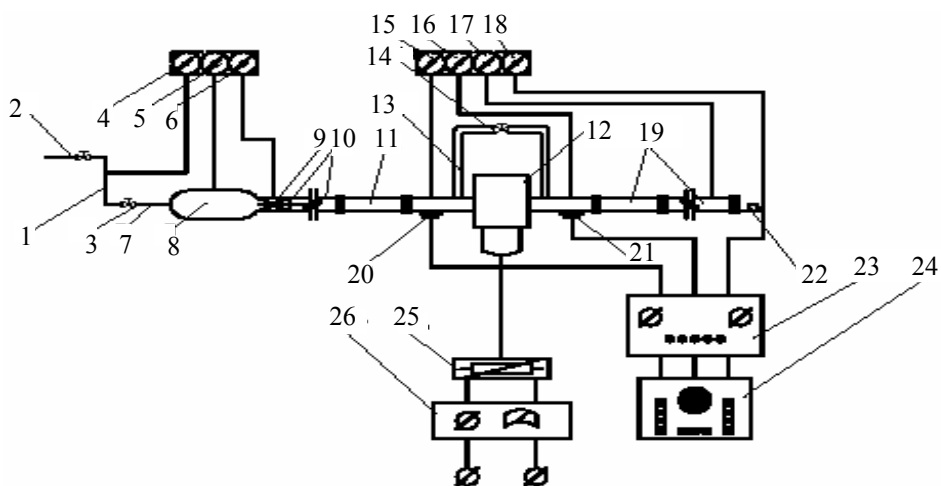


Рис. 2. Экспериментальная установка для исследования диссипации пульсирующего газового потока:

- 1 – подводящий воздухопровод; 2 – запорная задвижка; 3 – регулирующая задвижка; 4 – манометр для измерения располагаемого давления; 5 – манометр для измерения давления в форкамере; 6 – вакууметр; 7 – входной патрубок; 8 – форкамера; 9 – измерительная трубка Вентури; 10 – соединительные патрубки; 11 – входной отсек; 12 – пульсатор золотникового типа; 13 – байпас; 14 – запорно-регулирующий клапан; 15 – 18 – батарейные манометры; 19 – исследуемый участок трубопровода; 20 – 21 – датчики пульсаций; 22 – фотокамера; 23 – преобразователь; 24 – осциллограф С8-14; 25 – регулятор напряжения; 26 – преобразователь электропитания

Пульсационный блок состоит из пульсатора, соединительных отсеков и байпасной трассы с запорно-регулирующим клапаном. На соединительных отсеках, до и после пульсатора, закреплены в установочных гнездах датчики пульсаций. От соединительных отсеков отходят измерительные трассы к манометрам.

За пульсационном блоком располагается исследуемая трасса трубопровода, состоящая из набора отсеков. Набор отсеков представляет собой трубы с фланцами длиной 410 мм, 820 мм и 1640 мм и внутренним диаметром 89 мм. На выходе из трассы размещается датчик пульсаций и соединенная с манометром трубка измерения полного напора.

Методика экспериментального исследования пульсирующего газового потока заключалась в следующем.

Задвижкой устанавливается необходимый расход воздуха. Расход воздуха измеряется по перепаду давления с помощью протарированного ниппеля (трубки Вентури). Регулятором устанавливалось необходимое число оборотов электродвигателя, что обеспечивало соответствующее число оборотов золотника пульсатора и, соответственно, частоту пульсаций давления в потоке.

Экспериментальная установка позволяет определить характеристики газового потока, рассматривать процессы диссипации газового потока для условий конкретных энергетических и технологических агрегатов и, соответственно, выдавать рекомендации по размещению пульсаторов в системах пульсационного сжигания топлива.

Важным этапом при подготовке экспериментальных исследований пульсирующего газового потока являлась калибровка измерительных каналов датчиков пульсаций. Для калибровки датчиков пульсаций в динамическом режиме и для определения переходных характеристик измерительных каналов применялась газодинамическая ударная труба, которая вместе с калибровочной аппаратурой представлена на рисунке 3. Датчики калибровались при скачкообразном спаде давления воздуха от заранее установленного значения до атмосферного, что достигалось резким разрывом резиновой пленки. Установленное значение давления в трубе фиксировалось U-образным водяным манометром.

Показания датчиков пульсаций фотографировались с экрана электронно-лучевой трубки осциллографа.

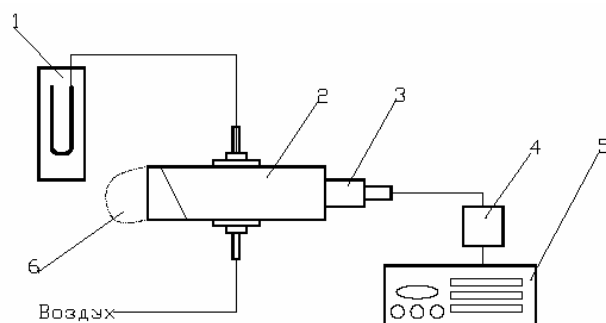


Рис. 3. Схема калибровки датчика пульсаций:

- 1 – U-образный манометр;
- 2 – газодинамическая ударная трубка;
- 3 – датчик пульсаций;
- 4 – предусилитель;
- 5 – осциллограф;
- 6 – резиновая пленка

После обработки фотографий чувствительность датчика определялась в следующей последовательности:

а) по изображению на фотографии определялась амплитуда сигнала, воспринимаемого датчиком пульсаций

$$A = B \cdot C \cdot D, \quad (1)$$

где A – искомая величина сигнала; B – число делений; C и D – коэффициенты передачи делителя, установленного на осциллографе.

б) определялась чувствительность датчика пульсаций по амплитуде сигнала и величине давления в ударной трубе ($P_{уд}$)

$$Ч = A / P_{уд}. \quad (2)$$

в) определялось звуковое давление

$$P = A \cdot Ч. \quad (3)$$

г) определялась интенсивность звука

$$I = \frac{P^2}{\rho \cdot c}, \quad (4)$$

где ρ – плотность воздуха; c – скорость звука.

Результаты экспериментального исследования

На рисунке 4 результаты обработки экспериментальных данных показаны в виде графика зависимости интенсивности звука от частоты пульсаций. Интенсивность звука представлена за пульсатором (сечение 1) и на выходе из исследуемого участка трубы (сечение 2).

Рассеивание энергии пульсирующего потока (диссипация), обусловлено потерями, связанными с вязкостью среды, молекулярным рассеиванием, турбулентным завихрением и другими факторами.

Диссипация пульсаций на участке транспортной линии, длина которой была принята 5380 мм, в соответствии с конструктивными характеристиками стэнда для сушки ковшей, определялась изменением интенсивности пульсаций по разности значений интенсивностей звука, полученных в сечениях 1 и 2. В дальнейшем

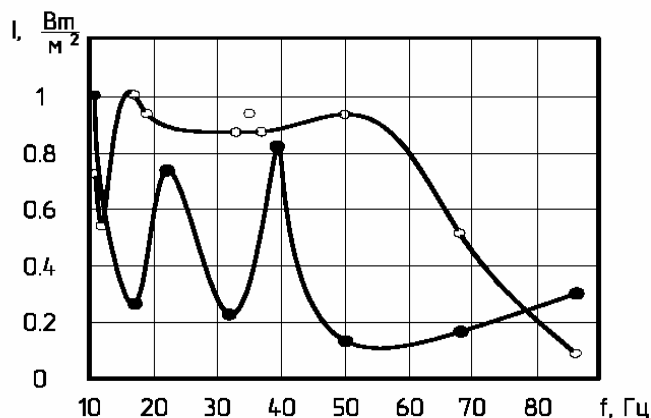


Рис. 4. Зависимость интенсивности звука (I) от частоты пульсаций (f) при давлении газа $P=0.18$ МПа: \circ – сечение 1; \bullet – сечение 2

диссипация пульсаций анализировалась в виде относительных изменений интенсивности звука.

Результаты обработки экспериментальных данных в виде относительных изменений интенсивности звука представлены на рисунках 5 и 6.

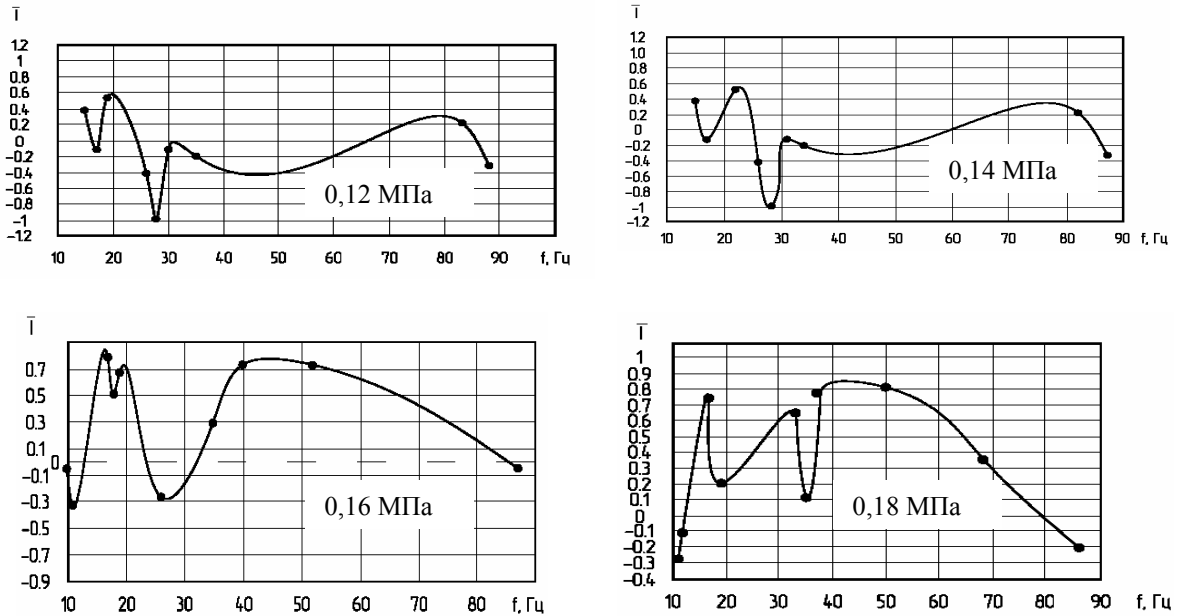


Рис. 5. Зависимость относительного изменения интенсивности звука (\bar{I}) от частоты пульсаций (без диафрагмы)

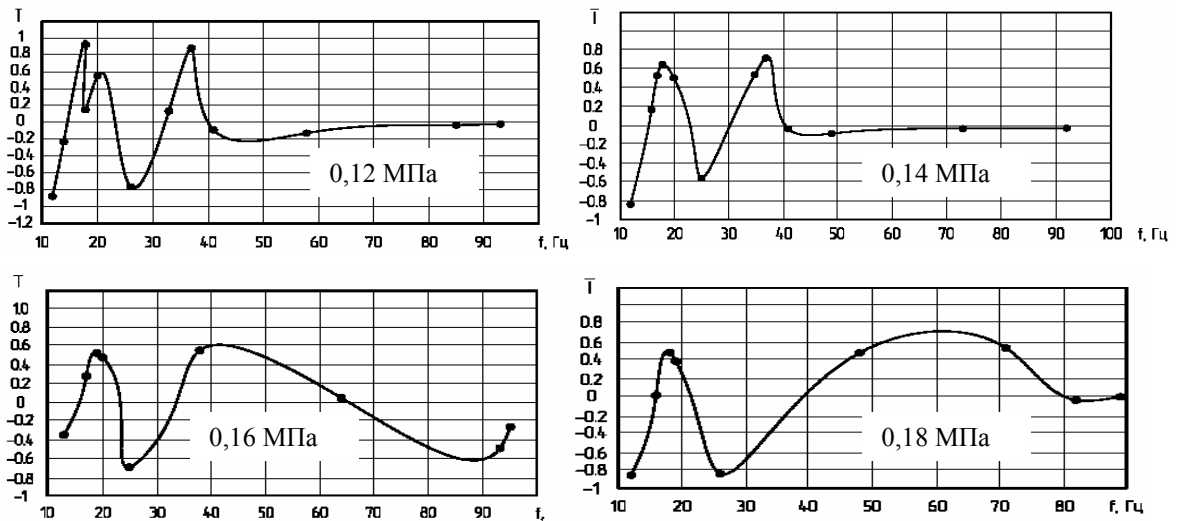


Рис. 6. Зависимость относительного изменения интенсивности звука (\bar{I}) от частоты пульсаций (с диафрагмой $d = 40$ мм)

Исследование проводилось при давлении воздушного потока в пределах $0,12 \div 0,18$ МПа с шагом $0,02$ МПа и варьировании частоты пульсаций в диапазоне $10 \div 100$ Гц.

Дутьевая насадка (горелка) стенда моделировалась диафрагмой с диаметром отверстия 40 мм, установленной на выходном торце исследуемого участка трубы. Для сравнения исследование выполнено также без установки диафрагмы.

Давления воздушного потока выбраны с учетом давлений газа на стендах сушки и разогрева сталеразливочных ковшей.

Первая серия опытов (без диафрагмы) представлена на рисунке 5, из которых следует, что интенсивность звука при давлении $0,12$ МПа и $0,14$ МПа максимальна при частоте около 20 Гц. При этом величина сигнала на входе в исследуемый участок трубопровода меньше, чем величина сигнала на выходе, что возможно в результате действия ударной волны, которая является дополнительным источником энергии, увеличивающим величину сигнала на выходе. Поэтому при данной частоте влияние диссипации на пульсирующий газовый поток минимально. Однако, из-за сильной вибрации на этой частоте возможно разрушение оборудования стендов сушки и нагрева, что подтвердили промышленные испытания.

Высокая интенсивность звука, широкий диапазон регулирования частоты, отсутствие вибраций оборудования и небольшая диссипация потока позволяют рекомендовать при давлении $0,12$ МПа и $0,14$ МПа в качестве рабочей частоты пульсаций диапазон $35 \div 82$ Гц.

При давлениях $0,16$ МПа и $0,18$ МПа (рисунок 5) диапазон частот $15 \div 18$ Гц характеризуется высокой интенсивностью звука. Однако при этих частотах происходит сильная вибрация. Дальнейшее увеличение частоты до 40 Гц дает нестабильную характеристику пульсаций, а от 40 до 100 Гц происходит монотонное снижение интенсивности звука.

Результаты серии опытов с установкой диафрагмы, имитирующей горелку, представлены на рисунке 6.

При давлениях $0,12$ МПа и $0,14$ МПа происходила сильная вибрация оборудования в диапазоне частот от 10 до 40 Гц. При данных давлениях можно рекомендовать диапазон частоты пульсаций $40 \div 93$ Гц, где практически отсутствует влияние диссипации.

Нестабильная характеристика пульсирующего потока для давления $0,16$ МПа имеет место при частоте до 40 Гц и области относительной стабильности от 40 до 64 Гц с усилением интенсивности звука по отношению к начальной величине.

При давлении 0,18 МПа кривая интенсивности звука носит аналогичный характер.

Обобщение результатов экспериментальных исследований позволяют сделать следующие выводы:

а) в целом все пульсации носят затухающий характер, то есть диссипация проявляется при всех давлениях воздушного потока и на всех исследованных частотах пульсаций с моделированием и без моделирования горелки;

б) влияние диссипации наиболее ощутимо при давлениях 0,12 и 0,14 МПа во всем диапазоне исследованных частот (10 ÷ 100 Гц);

в) при давлениях 0,16 МПа и 0,18 МПа приемлемые частоты пульсаций с точки зрения минимальной диссипации и отсутствия вибрации оборудования возможны при частотах в диапазоне 40 ÷ 80 Гц.

Выводы

Выполненные экспериментальные исследования создают основу для более глубокого понимания физической сущности диссипации пульсирующего газового потока и предоставляют возможность подобрать частоты пульсаций, на которых следует ожидать наиболее эффективную работу системы пульсационного сжигания топлива.

В частности, по резонансным частотам, приведенным в таблице 1 (сушка – 37 Гц, разогрев – 50 Гц), рекомендованы следующие давления пульсирующего потока:

а) при сушке ковша 0,14 ÷ 0,18 МПа, причем более стабильную эффективность обеспечивает давление 0,18 МПа;

б) при разогреве ковша 0,16 ÷ 0,18 МПа.

Список литературы

1. Гичёв Ю.А., Адаменко Д.С. Эффективность пульсационного сжигания топлива при сушке и разогреве сталеразливочных ковшей // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2002. – №7. – С. 236 – 240.

2. Гичёв Ю.А., Адаменко Д.С., Ткаченко Г.А. Результаты исследования пульсационного сжигания топлива при сушке и разогреве сталеразливочных ковшей // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2006. – №7. – С. 161 – 164.

3. Гичёв Ю.А., Адаменко Д.С. Снижение энергозатрат и решение экологической проблемы путем пульсационно-акустического сжигания топлива // *Компрессорное и энергетическое машиностроение*. – 2006. – №4 (6). – С. 40 – 42.

Рукопись поступила 02.04.2009 г.