

УДК 669.046.532

Гичёв Ю.А. – д.т.н., проф., Национальная металлургическая академия Украины (НМетАУ)

Ступак М.Ю. – аспирант, НМетАУ

Перцевой В.А. – к.т.н., доцент, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна

Мацукевич М.Ю. – студент, НМетАУ

РАЗРАБОТКА СПОСОБА ПУЛЬСАЦИОННО-РЕЗОНАНСНОГО СЖИГАНИЯ ТОПЛИВА ДЛЯ СУШКИ И РАЗОГРЕВА СТАЛЕРАЗЛИВОЧНЫХ КОВШЕЙ

Приведен обзор существующих способов тепловой подготовки сталеразливочных ковшей. Разработана методика акустического анализа рабочего объема ковша с целью определения резонансных частот пульсаций. Изложены принципы пульсационно-резонансного сжигания топлива и результаты опытно-промышленных исследований на посту сушки сталеразливочных ковшей.

Ключевые слова: пульсация; резонанс; сжигание топлива; сушка; сталеразливочный ковш.

Введение

В черной металлургии помимо основных металлургических производств значительными потребителями топлива являются также ряд вспомогательных участков. В числе таких потребителей заметно выделяется подготовка сталеразливочных ковшей, а именно, процессы сушки и разогрева футеровки ковшей. Зачастую эти процессы используют в большом количестве дефицитный и дорогостоящий природный газ.

На кафедре промышленной теплоэнергетики НМетАУ для сушки и разогрева сталеразливочных ковшей разработан пульсационно-резонансный режим сжигания топлива [1], применение которого создает предпосылки для существенной экономии топлива.

Постановка задачи исследования

В задачу данных исследований входили:

- обзор и анализ существующих способов тепловой подготовки сталеразливочных ковшей;
- разработка методики акустического анализа рабочего объема ковша с целью определения резонансных частот;

- разработка стенда для сушки сталеразливочных ковшей с пульсационно-резонансным сжиганием топлива;
- оценка эффективности пульсационно-резонансного сжигания топлива по результатам опытно-промышленных испытаний.

Способы подготовки сталеразливочных ковшей

Возможно применение ряда способов и устройств для сушки и разогрева сталеразливочных ковшей (см. рисунок 1).



Рис. 1. Способы и устройства для сушки и разогрева сталеразливочных ковшей

Свыше 80 % процессов сушки и разогрева сталеразливочных ковшей осуществляется продуктами сгорания топлива. Для устранения термических дефектов футеровки ковшей и повышения эффективности использования теплоты топлива помимо стационарной по-

дачи топлива применяют дифференцированную подачу, подачу топлива с перемещением факела, пульсацию и прочее.

Тем не менее, сушка и разогрев продуктами сгорания имеет ряд недостатков:

- низкий коэффициент использования теплоты топлива (до 30 %);
- загрязнение рабочих мест и окружающей среды вредными компонентами продуктов сгорания (оксидами серы, азота, углерода);
- возникновение термических дефектов футеровки ковшей.

Для устранения термических дефектов футеровки предлагается [2] применять "мягкий" режим сушки и разогрева ковшей с регулируемой подачей топлива. При сушке температура внешней поверхности футеровки в этом случае, в отличие от "жесткого" режима, не превышает температуры испарения влаги, что способствует уменьшению термических дефектов футеровки.

Введение дополнительных конструктивных элементов (вставок) в рабочее пространство ковшей приводит к интенсификации теплообмена между потоком продуктов сгорания топлива и футеровкой, что повышает коэффициент использования теплоты топлива [3]. Недостатком такого способа является усложнение конструкции устройств для сушки и разогрева сталеразливочных ковшей.

Известен также ряд других конструктивных и технологических решений, направленных на усовершенствование процессов сушки и разогрева сталеразливочных ковшей с применением топлива [4 – 6].

В работе [4] предлагается использование циклических режимов для сушки и разогрева сталеразливочных ковшей. Применение циклических режимов повышает коэффициент использования теплоты топлива и снижает вероятность возникновения локального перегрева футеровки. Недостатком циклических режимов является невозможность сокращения продолжительности процессов сушки и разогрева.

Известен способ комбинированного режима подачи теплоты в рабочее пространство ковша, который заключается в чередовании подачи продуктов сгорания топлива и нагретого воздуха [5]. Такой способ подачи теплоты позволяет исключить пережег футеровки, однако требует значительных расходов топлива.

В процессах сушки и разогрева ковшей согласно способу, предложенному в работе [6], применяются рекуперативные и регенеративные горелки, позволяющие снизить расход топлива благодаря подогреву топлива и воздуха продуктами сгорания. При этом не обеспечиваются равномерный прогрев футеровки и сокращение продолжительности сушки и разогрева.

Альтернативу продуктам сгорания топлива находят в электронагревательных элементах [7], в СВЧ-излучении [8], в инфракрасном излучении [9] и применением вакуума [10].

Широкое применение электронагревательных элементов, которые повышают тепловой к.п.д. процессов сушки и разогрева до 50%, сдерживает незначительный срок службы электронагревательных элементов и сложная технология их изготовления.

Сушка и разогрев футеровки ковшей с помощью СВЧ-излучения обеспечивает равномерный прогрев всего объема футеровки, что устраняет возникновение в ней термических дефектов и повышает к.п.д. процессов до 60%. При этом недостатком способа является существенное снижение к.п.д. процесса сушки по мере удаления влаги из футеровки, поскольку основным компонентом, который поглощает микроволновое излучение, является вода. При использовании СВЧ-излучений, необходима чрезвычайная организация защиты обслуживающего персонала от воздействия микроволнового излучения.

В работе [10] приводятся результаты экспериментальных исследований по использованию вакуума в процессах сушки и разогрева сталеразливочных ковшей. Продолжительность процессов и, соответственно, расходы топлива уменьшаются на 30 %. К значительному недостатку способа следует отнести снижение твердости футеровки, что ухудшает ее качество.

В целом перечисленные альтернативные технологии существенно усложняют процессы сушки и разогрева по сравнению с традиционными процессами с использованием топлива и в ряде случаев требуют применение нестандартного дорогостоящего оборудования. При этом альтернативные решения являются энергозатратными технологиями. Удельный расход условного топлива (на сушку 1 т футеровки) может составить: электронагревательными элементами – 60 – 70 кг, СВЧ-излучением – около 50 кг, применением вакуума – до 50 кг.

Следует также учитывать, что на практике выбор вариантов технических решений для сушки и разогрева сталеразливочных ковшей ограничен жесткими технологическими условиями (температурой, продолжительностью и проч.) и зависимостью подготовки ковшей от организации работы сталеплавильных агрегатов.

Акустический анализ рабочего объёма ковша и резонансные частоты

Согласно технологическим инструкциям сушка и разогрев сталеразливочных ковшей представляются достаточно энергоёмкими операциями [11]. Затраты природного газа при сушке ковшей составляют $2580 \div 3460 \text{ м}^3$ на один 160-тонный ковш, а при разогреве из расчета

расхода газа $100 \text{ м}^3/\text{ч}$ – не менее $200 - 600 \text{ м}^3$ в зависимости от состояния футеровки ковша. При увеличении емкости ковшей расходы природного газа на сушку и разогрев соответственно возрастают.

Для снижения расходов природного газа целесообразно применение пульсационно-резонансных режимов сжигания топлива, от внедрения которых следует ожидать:

- интенсификацию теплообмена между продуктами сгорания и футеровкой ковша за счет резких изменений скоростей продуктов сгорания в процессе пульсации и разрушения пограничного слоя на поверхности футеровки;
- повышение эффективности использования топлива вследствие снижения недожога;
- улучшение использования рабочего объема ковша за счет исключения застойных зон, то есть зон недостаточного омываемых продуктами сгорания.

В итоге, пульсационно-резонансный способ сжигания топлива позволит сократить продолжительность процессов сушки и разогрева сталеразливочных ковшей и снизить расходы топлива

Для разработки пульсационно-резонансных режимов сжигания топлива представляют интерес частоты собственных колебаний рабочего объема ковша, то есть частоты, при которых следует ожидать технологический резонанс. Геометрические размеры и технические характеристики необходимые для расчета приведены в [12]. Обозначение геометрических характеристик для расчета частот собственных колебаний рабочего объема сталеразливочного ковша показано на рис. 2.

Для расчета частот собственных колебаний в рабочем объеме ковша колебательную систему, включающую объем ковша, полость крышки и щель, образующуюся в зазоре между верхним срезом ковша и крышкой, можно представить как резонатор Гельмгольца. При этом циклическая частота колебаний определяется выражением [13]:

$$\omega_k = v_3 \cdot \sqrt{\frac{F_{щ}}{V_a \cdot l_{щ}}}, \quad (1)$$

где v_3 – скорость распространения звука в ковше; $F_{щ}$ – площадь кольцевой щели между срезом ковша и крышкой; V_a – акустический объем сталеразливочного ковша и крышки; $l_{щ}$ – длина щели между крышкой и срезом ковша.

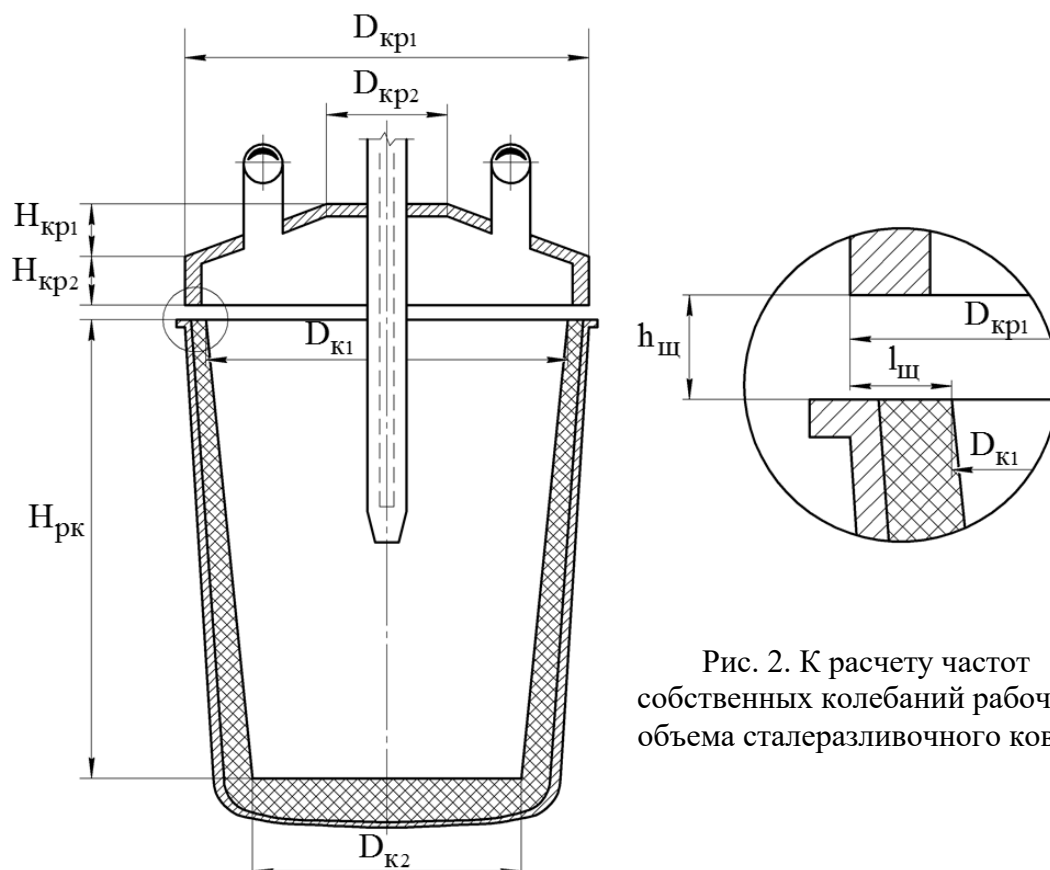


Рис. 2. К расчету частот собственных колебаний рабочего объема сталеразливочного ковша

Скорость распространения звука определяется в соответствии со средней температурой продуктов сгорания $\bar{T}_{\text{пс}}$ в ковше [14]:

$$v_3 = v_{3 \text{ ну}} \cdot \sqrt{\frac{\bar{T}_{\text{пс}}}{T_{\text{ну}}}}, \quad (2)$$

где $v_{3 \text{ ну}}$ – скорость распространения звука при нормальных условиях.

Площадь кольцевой щели $F_{\text{щ}}$ между срезом ковша и крышкой (см. рисунок 2) определяется по среднему диаметру щели $\bar{D}_{\text{щ}}$:

$$F_{\text{щ}} = \pi \cdot \bar{D}_{\text{щ}} \cdot h_{\text{щ}}; \quad (3)$$

$$\bar{D}_{\text{щ}} = (D_{\text{кр1}} + D_{\text{к1}})/2, \quad (4)$$

где $h_{\text{щ}}$ – высота щели между срезом ковша и крышкой; $D_{\text{кр1}}$ – диаметр нижней части крышки; $D_{\text{к1}}$ – диаметр верхней части рабочего объема ковша.

Акустический объем сталеразливочного ковша определяется суммой:

$$V_a = V_{\text{к}} + V_3 + V_{\text{кр}}, \quad (5)$$

где V_K – рабочий объем ковша; V_3 – объем зазора между срезом ковша и крышкой; $V_{кр}$ – объем крышки.

Рабочий объем ковша определяется выражением:

$$V_K = \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot H_{рк} \cdot \frac{1}{4} \cdot (D_{к1}^2 + D_{к1} \cdot D_{к2} + D_{к2}^2), \quad (6)$$

где $H_{рк}$ – высота рабочего объема ковша, м; $D_{к2}$ – диаметр нижней части рабочего объема ковша.

Объем зазора между срезом ковша и крышкой определяется выражением:

$$V_3 = \frac{\pi \cdot D_{кр1}^2}{4} \cdot h_{щ}. \quad (7)$$

Объем крышки определяется выражением:

$$V_{кр} = \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot H_{кр1} \cdot \frac{1}{4} \cdot (D_{кр1}^2 + D_{кр1} \cdot D_{кр2} + D_{кр2}^2) + \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot D_{кр2}^2 \cdot H_{кр2}, \quad (8)$$

где $H_{кр1}$ – высота конической части крышки; $D_{кр2}$ – диаметр верхней части крышки; $H_{кр2}$ – высота цилиндрической части крышки.

Длина щели $l_{щ}$ между срезом ковша и крышкой в формуле (1) составит (см. рис. 2):

$$l_{щ} = (D_{кр1} - D_{к1}) / 2. \quad (10)$$

Частота собственных колебаний рабочего объема сталеразливочного ковша в соответствии с вычисленной по формуле (1) циклической частотой составит:

$$f_K = \frac{\omega_K}{2 \cdot \pi}. \quad (11)$$

На рис. 3 представлены полученные расчетным путем по формуле (1) значения собственных частот колебаний сталеразливочных ковшей стандартного ряда [15] при следующих исходных данных:

- скорость распространения звука в ковше при нормальных условия $v_{з ну} = 330$ м/с;

- средняя температура в ковше $\bar{T}_{пс} = 1000$ К;

- высота щели между срезом ковша и крышкой $h_{щ} = 0,05 \div 0,15$ м.

Высота щели принята в соответствии со сборочными чертежами стенов для сушки сталеразливочных ковшей и по результатам замеров при установке ковшей на стенов. На рис. 3 максимальные значения частот соответствует максимальной высоте щели.

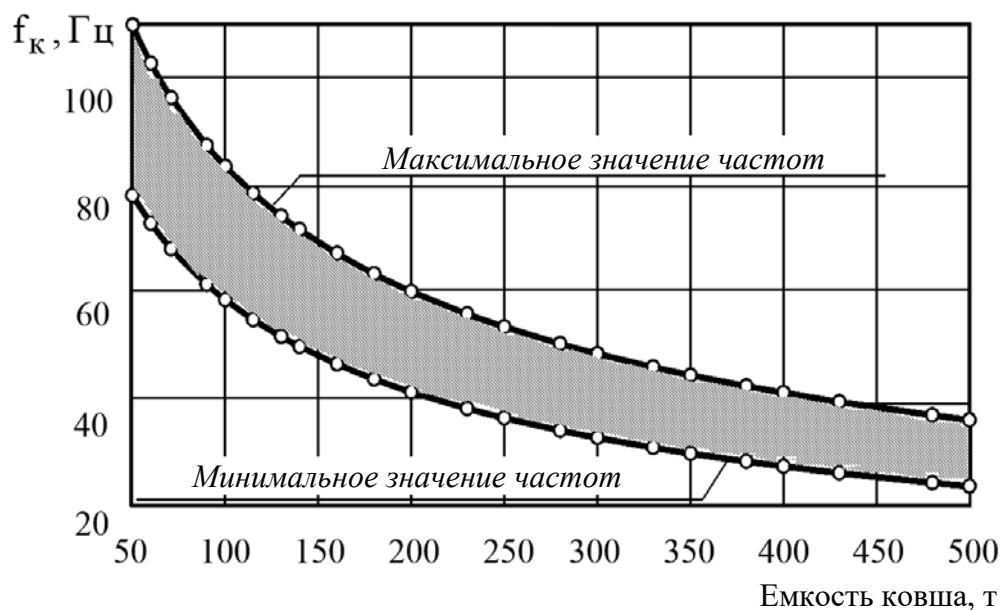


Рис. 3. Расчетные значения собственных частот колебаний сталеразливочных ковшей

В целом диапазон частот необходимый для возбуждения пульсационно-резонансного режима сжигания топлива в сталеразливочных ковшах составляет $25 \div 110$ Гц. Это позволяет использовать для создания пульсаций механический пульсатор с цилиндрическим прерывателем потока газа или воздуха, обеспечивающий возможность регулирования частоты пульсаций в указанном диапазоне [16].

Данные, представленные на рис. 3 следует рассматривать как приближенные значения собственных частот, так как фактические значения частот помимо акустического объема ковша и размеров щели зависят от газодинамических процессов происходящих в ковше, формы кладки и состояние износа футеровки.

Тем не менее, ориентировочные значения частот дают возможность принять конструктивные решения при выборе оборудования для пульсационно-резонансного сжигания топлива на стендах сушки и разогрева ковшей.

Принцип пульсационно-резонансного режима сжигания топлива

Стенд для пульсационно-резонансного сжигания топлива в сталеразливочных ковшах представлен на рис. 4.

Спектр частот колебаний в ковше регистрируется акустическим зондом. Сигнал от зонда передается через предусилитель в анализатор спектра, где выбирается рабочая частота собственных колебаний.

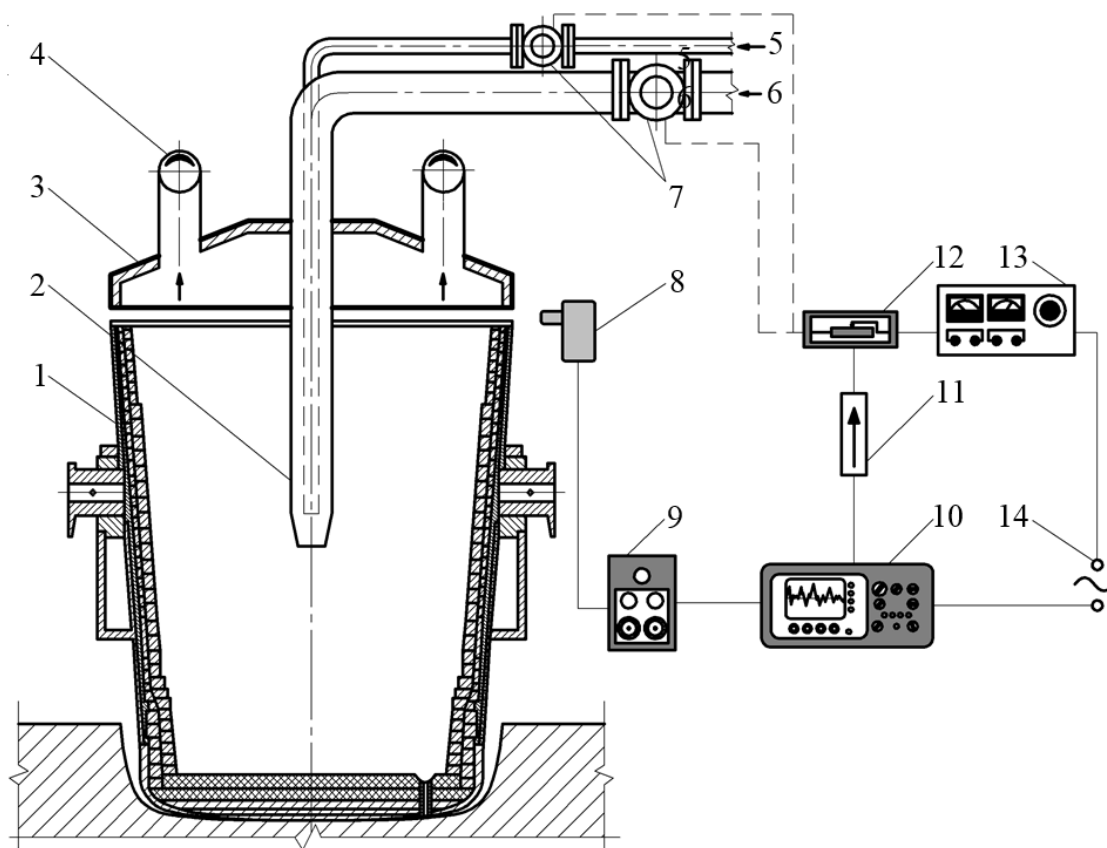


Рис. 4. Принципиальная схема стенда для сушки сталеразливочных ковшей с пульсационно-резонансным сжиганием топлива:

- 1 – ковш; 2 – горелка; 3 – крышка; 4 – газоход для отвода продуктов сгорания;
 5 – газопровод; 6 – воздухопровод; 7 – пульсационные блоки газопровода и воздухопровода; 8 – акустический зонд; 9 – предусилитель;
 10 – анализатор спектра; 11 – исполнительный механизм;
 12 – реостат; 13 – выпрямитель; 14 – электропитание

По величине рабочей частоты исполнительным механизмом через реостат устанавливается заданное напряжение постоянного тока в электродвигателе пульсационного блока. Это обеспечивает вращение пульсатора со скоростью соответствующими собственной частоте рабочего объема ковша.

Возможны три варианта возбуждения пульсационно-резонансного режима сжигания топлива:

- возбуждением пульсаций на газопроводе;
- возбуждением пульсаций на воздухопроводе;
- совместным возбуждением пульсаций на газопроводе и воздухопроводе.

Независимо от места возбуждения пульсаций ускоряется смешивание потоков газа и воздуха перед горением, что уменьшает длину факела и увеличивает его ширину. Это приводит к более полному заполнению факелом рабочего объема ковша и сокращению объемов

пустот в ковше, которые имеют место при обычном горении. Эффект заполнения пустот наиболее ощутим в резонансном режиме вследствие максимальных значений амплитуд пульсаций.

Таким образом, применение пульсационно-резонансного режима сжигания топлива, сохраняя традиционную технологию сушки и разогрева сталеразливочных ковшей, а также преимущества пульсационного сжигания топлива, обеспечивает:

- полноту заполнения факелом рабочего объема ковша;
- интенсификацию теплообмена за счет увеличения поверхности контакта между продуктами сгорания и футеровкой;
- интенсификацию теплообмена за счет увеличения конвективной составляющей теплоотдачи;
- равномерность термообработки футеровки ковша;
- более эффективное дожигание топлива за счет вовлечение в горение большей части рабочего объема ковша.

Результаты опытно-промышленных испытаний

Испытания пульсационно-резонансного режима сжигания топлива проводились на участке подготовки ковшей электросталеплавильного цеха № 2 Оскольского электрометаллургического комбината на посту сушки ковшей (см. табл. 1). Возбуждение пульсаций осуществлялось на газопроводе.

Таблица 1

Результаты испытаний пульсационно-резонансного сжигания топлива на посту сушки сталеразливочных ковшей

№ опыта	№ ковша	Частота пульсаций, Гц	Температура футеровки, °С	Температура кожуха, °С	Общий расход природного газа, м ³	Экономия природного газа, %
–	Н	–	900	75	2570	–
1	36	45÷55, 18÷25	>900	77	2370	7,8
2	31	18÷25	1050÷1060	78	2120	17,5
3	2	18÷25	1100	75	2450	4,7
4	5	18÷25	1050÷1120	79	2230	13,2
5	12	18÷25	1050÷1120	80	2215	13,8
6	25	18÷25	>900	87	1920	25,3
7	36	18÷25	>900	74	2140	16,7
8	30	18÷25	>900	76	2230	13,2

В целом при сушке как нормативного Н (без пульсаций), так и опытных ковшей (с пульсациями), соблюдались основные правила технологической инструкции, принятой на комбинате [11].

Сушка первого ковша (№ 36) при опытно-промышленном исследовании в течение пяти часов происходила по графику, приведенному в технологической инструкции, то есть по графику, близкому к сушке нормативного ковша. В конце пятого часа сушки было включено устройство пульсационного сжигания топлива и начался поиск резонансного режима. Частота пульсаций потока топлива при поиске резонансного режима менялась в диапазоне $15 \div 60$ Гц.

В результате обнаружен резонансный эффект в диапазоне частот $45 \div 55$ Гц. Однако работать в этом диапазоне резонансных частот не представлялось возможным вследствие резонансного возбуждения конструкций поста сушки.

В результате поиска был обнаружен второй менее интенсивный пик резонансной частоты (субгармоника) в диапазоне $18 \div 25$ Гц, который использовался в последующих опытах.

В целом результаты испытаний системы пульсационного сжигания топлива на постах сушки и разогрева сталеразливочных ковшей позволили сделать следующие выводы:

а) испытания показали достаточно высокую работоспособность пульсационного устройства в промышленных условиях и возможность обеспечения требуемых технологических условий при сушке и разогреве ковшей;

б) технологический резонанс установлен при сушке ковшей в диапазоне частот $18 \div 25$ Гц.

в) уменьшение потребления природного газа и соответственно его экономия составили $7,8 \div 25,3$ %.

Выводы

1. Преобладающие большинство процессов сушки и разогрева сталеразливочных ковшей осуществляется продуктами сгорания топлива. Альтернативные технологии существенно усложняют эти процессы и требуют применение нестандартного дорогостоящего оборудования.

2. Согласно технологическим инструкциям сушка и разогрев сталеразливочных ковшей представляются достаточно энергоёмкими операциями с большими расходами топлива. Для снижения расходов природного газа целесообразно применение пульсационно-резонансного сжигания топлива.

3. Полученные расчетным путем ориентировочные значения собственных частот колебаний сталеразливочных ковшей стандартно-

го ряда, указывают, что диапазон частот необходимый для возбуждения пульсационно-резонансного режима сжигания топлива в сталеразливочных ковшах составляет $25 \div 110$ Гц.

4. Испытания системы пульсационно-резонансного сжигания топлива на постах сушки сталеразливочных ковшей показали достаточно высокую работоспособность разработанного пульсационного устройства. Технологический рабочий резонанс при сушке ковшей установлен в диапазоне частот $18 \div 25$ Гц. Экономия природного газа составила $7,8 \div 25,3$ %.

Список литературы

1. Пат. №110873 Україна, МПК В22D 41/00. Спосіб сушіння або розігрівання футерівки металургійної ємності / Ю. О. Гічов, М. Ю. Ступак, М. М. Жовтонога, Т. А. Васильків, А. С. Попова, В. О. Перцевий; заявник та патентовласник Національна металургійна академія України; заявл. 02.07.2014; опубл. 25.02.2016, бюл. № 4/2016. – 3 с.

2. Ибрагимов Ф. Г. Совершенствование "жесткого" режима сушки монолитной футеровки сталеразливочного ковша / Ф. Г. Ибрагимов, А. Д. Носов, Ф. Ф. Очеретнюк // Сталь. –1999. – №10. – С. 26–27.

3. Самсонов В. А. Способ сушки футеровки металлургических емкостей / В. А. Самсонов, А. А. Шараев, А. В. Марченко [и др.] // Огнеупоры. –1984. – № 2. – С. 44–47.

4. Сущенко А. В. Разработка и промышленное освоение импульсного режима отопления стенов для сушки и разогрева сталеразливочных ковшей / А. В. Сущенко, О. В. Носоченко, М. Л. Хазнафиров [и др.] // Металлург. –2002. – № 9. – С. 45–47.

5. Бражникова Е. С. Сушка футеровки промежуточных ковшей при импульсном режиме подачи тепла / Е. С. Бражникова, А. Ю. Жиглявский, Ф. В. Вожжов // Сталь. –2007. – № 11. – С. 40–41.

6. Jilavu D. Performant installations for drying and heating the steel ladles / D. Jilavu, V. Rizea, A. Gaba // The Scientific bulletin of Valahia University. –2013. – № 8. – P. 39–49.

7. Бершицкий И. М. Энергосберегающие и экологически безопасные установки для электрической сушки и подогрева футеровки ковшей / И. М. Бершицкий, В. М. Тарарышкин // Сталь. – 2010. – № 2. С. 24–25.

8. Буртовой Д. П. Микроволновая сушка футеровки / Д. П. Буртовой, С. Г. Шевченко, Д. Ю. Хохуля [и др.] // Новые огнеупоры. – 2003. – № 2. – С. 53–54.

9. Горелки газовые ВЮ, ВЮА, ЗЮ: техническая информация

2011 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.kromschroeder.ru/download.php?f=9ce689102a0562316eaba26c253fcbd7>.

10. Яценко А. М. Разработка технологии ускоренной сушки футеровки литейных ковшей / А. М. Яценко, Ю. Ф. Михневич, В. П. Присяжнюк [и др.] // Огнеупоры. – 1990. – № 12. – С. 34–37.

11. ТИ 129-ЭС-128-91 Технологическая инструкция по футеровке, ремонту и сушке сталеразливочных ковшей: сборник технологических инструкций в 2 ч. – Старый Оскол: Оскольский электрометаллургический комбинат, 1991. – Ч. 2. – 156 с.

12. Оборудование для производства стали : Сталеразливочные ковши ПАО «АЗОВМАШ» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.azovmash.com/ru/catalog/262>

13. Лепендин Л. Ф. Акустика / Л. Ф. Лепендин. – М. :– Высшая школа, 1978. – 448 с.

14. Ларионов В. М. Автоколебания газа в установках с горением / В. М. Ларионов, Р. Г. Зарипов. – Казань : Издательство Казанского государственного технического университета, 2003. – 227 с.

15. ГОСТ 7358-78. Ковши сталеразливочные. Ряд вместимостей. – утвержден 20.09.1978, введен 01.01.1980. – М. : Издательство стандартов, 1978. – 2 с.

16. Гичёв Ю. А Системный анализ к выбору пульсатора для пульсационно-резонансного сжигания топлива / Ю. А. Гичёв, М. Ю. Ступак, М. Ю. Мацукевич. Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції (29 – 31 березня 2016 р.) м. Дніпропетровськ. – С. 8.

Рукопис надійшов 06.06.2016 р.