

УДК 669.046:532

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

**Бевз Л.С.** – магистрант, НМетАУ

**Коваль К.М.** – н.с., Днепропетровский национальный университет

**Ступак М.Ю.** – магистрант, НМетАУ

## **ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПУЛЬСАЦИОННОГО СЖИГАНИЯ ТОПЛИВА ПРИ СУШКЕ И РАЗОГРЕВЕ СТАЛРАЗЛИВОЧНЫХ КОВШЕЙ**

*Приведены результаты опытно-промышленных исследований пульсационного сжигания топлива при сушке и разогреве сталеразливочных ковшей. Установлена достаточно высокая работоспособность и экономичность системы пульсационного сжигания. Уменьшение потребления природного газа и, соответственно, его экономия составили при сушке ковшей  $8 \div 25$  %, а при разогреве –  $20 \div 38$  %. Представлен анализ полезно использованной теплоты и потерь теплоты в сравнении с обычной технологией термообработки ковшей (без пульсаций). При пульсационной обработке заметно возрастает полезное использование теплоты топлива за счет интенсификации теплообмена и снижения химического недожога топлива. Интенсификации теплообмена способствует исключение застойных зон в рабочем объеме ковша вследствие пульсаций и соответствующего увеличения активной тепловоспринимающей поверхности рабочего объема ковша.*

*Ключевые слова: пульсация, сушка, разогрев, сталеразливочный ковш, интенсификация теплообмена.*

### **Введение**

Процессы сушки и разогрева сталеразливочных ковшей достаточно энергоемкие, потребляющие значительное количество топлива. При этом жесткие технологические условия процессов сушки и разогрева ковшей, а также отсутствие возможностей изменения технологии термообработки, ограничивают количество вариантов для выбора технического решения по экономии топлива.

В числе возможных технических решений выгодно выделяется применение пульсационного сжигания топлива, что особенно проявляется при реализации так называемого «технологического резонанса», то есть, когда частота пульсаций газовых потоков, участвующих в горении, совпадает с частотой собственных колебаний в объеме ковша [1 – 3].

При сушке и разогреве сталеразливочных ковшей применение системы пульсационного сжигания топлива создает предпосылки для экономии топлива без изменения основных принципов по технологиям сушки и разогрева ковшей, сложившихся на предприятии.

### **Постановка задачи**

В случае резонанса, когда частота вынужденных колебаний совпадает с частотой собственных колебаний агрегата, эффект пульсаций заметно возрастает при минимальных энергозатратах, связанных с генерацией пульсаций.

Кафедрой промышленной теплоэнергетики НМетАУ совместно с сотрудниками лаборатории струйных процессов ДНУ эффект резонансного воздействия при пульсационном сжигании топлива был опробован на процессах сушки и разогрева сталеразливочных ковшей в электросталеплавильном цехе № 2 Оскольского электрометаллургического комбината.

Задача данной работы заключалась в оценке целесообразности применения пульсационно-резонансного сжигания топлива при сушке и разогреве сталеразливочных ковшей в промышленных условиях путем решения следующих вопросов:

а) внедрение разработанной системы пульсационно-резонансного сжигания топлива и оценка ее работоспособности в промышленных условиях;

б) анализ результатов опытно-промышленных исследований по сушке и разогреву сталеразливочных ковшей в пульсационном режиме и сравнение результатов с сушкой и разогревом в обычных условиях (без пульсаций);

в) разработка методики теплотехнического анализа процессов сушки и разогрева сталеразливочных ковшей на основе опытных данных;

г) расчет и анализ статей тепловых балансов процессов сушки и разогрева сталеразливочных ковшей в обычном и пульсационном режимах;

д) разработка рекомендаций по экономии природного газа в процессах сушки и разогрева сталеразливочных ковшей с учетом пульсационно-резонансных эффектов.

### **Методика и результаты опытно-промышленных исследований**

Общий вид опытного стенда и схема аппаратного обеспечения технологии пульсационного сжигания представлены на рисунке 1.

Для сжигания топлива на стенде предусмотрена горелка типа «труба в трубе». Пульсации газового потока обеспечиваются пульсатором, установленным на газопроводе и выполненным в виде вра-

щаючого золотника с отверстием. Привод золотника осуществляется электродвигателем постоянного тока, подключенного к сети через реостат. Байпас пульсатора в комбинации с установленным на нем вентилем позволяют регулировать амплитуду пульсаций.

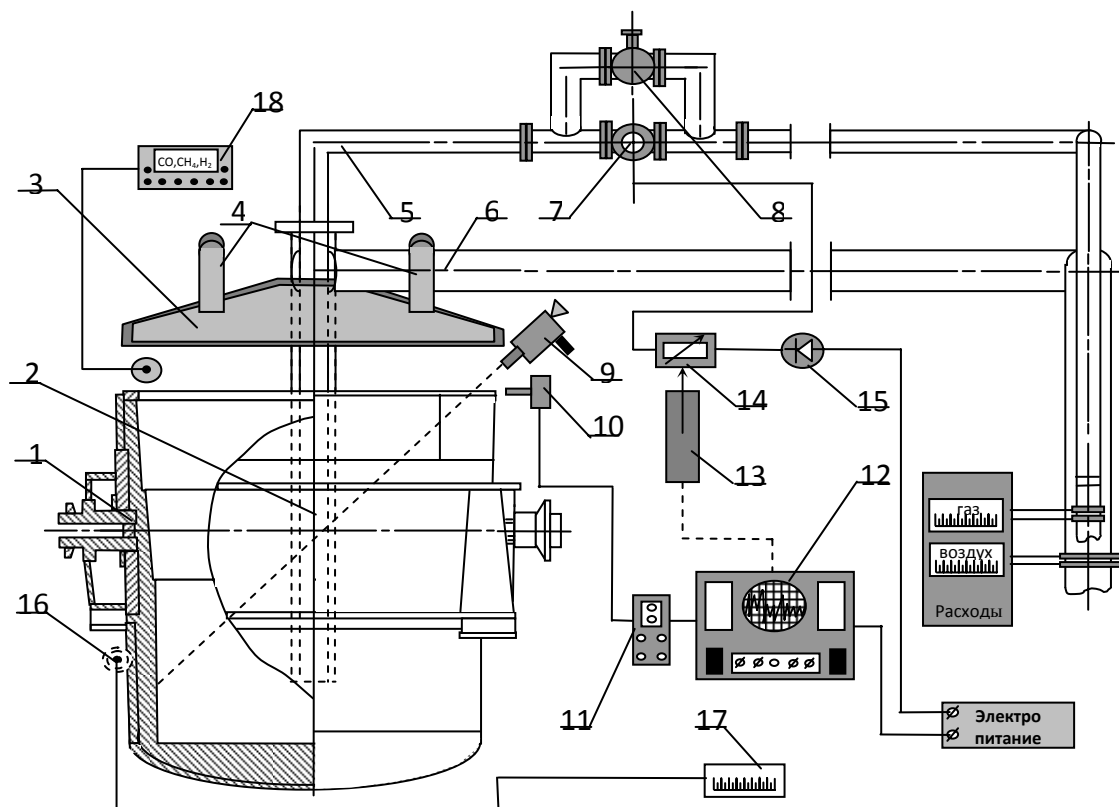


Рис. 1. Общий вид опытного стенда:

- 1 – ковш; 2 – горелка; 3 – крышка ковша; 4 – газоходы для отвода продуктов сгорания; 5 – газопровод; 6 – воздухопровод; 7 – пульсатор; 8 – байпас; 9 – радиационный пирометр; 10 – акустический зонд; 11 – предусилитель; 12 – анализатор спектра; 13 – исполнительный механизм; 14 – реостат; 15 – выпрямитель; 16 – термопара; 17 – потенциометр; 18 – хроматограф

При вращении золотника проходное сечение трубопровода, подающего природный газ, прерывается с заданной частотой, что приводит к периодическому сжатию и разрежению потока природного газа и образованию упругих колебаний. Необходимая для резонанса частота прерывания газового потока определяется при помощи акустического зонда, посылающего сигнал на предусилитель. Усиленный сигнал направляется к анализатору спектра. По спектральному анализу определяется частота, на которой амплитуда колебаний максимальна. Данная частота является перспективной для получения технологического резонанса и, соответственно, определяет число оборотов электродвигателя.

тродвигателя пульсатора, частоту вращения золотника и частоту прерывания  $\omega$  газового потока:

$$\omega = 2\pi \cdot n \cdot N \cdot l / 60, \text{ Гц}, \quad (1)$$

где  $n$  – число оборотов золотника, *об/мин*;  $N$  – количество отверстий в золотнике, *шт*.

Частота пульсаций регулируется изменением напряжения электротока путем изменения сопротивления реостата исполнительным механизмом. Амплитуда пульсаций регулируется положением вентиля на байпасе, позволяющим изменять соотношение расходов газа, прошедшего через пульсатор и через байпас.

Температура футеровки ковша определялась пирометром. Контактной термопарой измерялась температура кожуха ковша. Эти температуры позволяют контролировать процессы сушки и разогрева сталеразливочных ковшей в соответствии с требованиями технологических инструкций.

Испытания пульсационного устройства проводились после доработки газового сопла горелки с целью уменьшения ее акустического сопротивления. При сушке как нормативного Н (без пульсаций), так и опытных ковшей (с пульсациями), соблюдались основные правила технологической инструкции, принятой на комбинате. Результаты испытаний при сушке и разогреве сталеразливочных ковшей представлены, соответственно, в таблицах 1 и 2.

Таблица 1  
Результаты испытаний на посту сушки сталеразливочных ковшей

№ опыта	№ ковша	Частота пульсаций, Гц	Температура футеровки, °С	Температура кожуха, °С	Общий расход природного газа, м <sup>3</sup>	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

Таблица 2

Результаты испытаний на посту разогрева сталеразливочных ковшей

№ опыта	№ ковша	Частота пульсаций, Гц	Температура, °С		Общий расход природного газа, м <sup>3</sup>	Экономия природного газа, %
			футеровки	кожуха		
–	Н	18 ÷ 30	900	93	2000	–
1	38	18 ÷ 30	879	89	1550	22,5
2	9	18 ÷ 30	910	97	1610	19,5
3	19	18 ÷ 30	750	82	1335	33,3
4	8	18 ÷ 30	737	77	1245	37,8
5	12	18 ÷ 30	777	84	1425	28,8

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 ÷ 25 Гц, а при разогреве ковшей – 18 ÷ 30 Гц.

в) уменьшение потребления природного газа и, соответственно, его экономия составили при сушке ковшей 7,8 ÷ 25,3 %, а при разогреве – 19,5 ÷ 37,8 %.

### Методика обработки опытных данных и анализ эффективности пульсационного сжигания топлива

Методика обработки опытных данных основана на расчетах теплового баланса процессов сушки и разогрева сталеразливочных ковшей.

*Приходная часть теплового баланса* включает теплоту сгорания топлива:

$$Q_{гор} = V \cdot Q_n^p, \text{ МДж} \quad (2)$$

где  $V$  – расход природного газа на сушку или нагрев ковша, м<sup>3</sup>;  $Q_n^p$  – теплота сгорания природного газа, МДж/м<sup>3</sup>.

*Расходная часть теплового баланса* включает следующие статьи:

а) расход теплоты на нагрев рабочей кладки:

$$Q_p = M_p \cdot \left[ (C_p)_0^{\bar{t}_k^p} \cdot \bar{t}_k^p - (C_p)_0^{t_n} \cdot t_n \right] \cdot 10^{-3}, \text{ МДж} \quad (3)$$

где  $M_p$  – масса рабочей кладки, выполненной из высокоглиноземистых огнеупоров (определяется конструктивными характеристиками ковша), кг;  $\bar{t}_k^p$  – средняя температура рабочей кладки в конце термообработки, °C;  $(C_p)_0^{\bar{t}_k^p}$ ;  $(C_p)_0^{t_H}$  – средние теплоемкости материала рабочей кладки, кДж/(кгK);  $t_H$  – начальная температура футеровки ковша, °C.

б) расход теплоты на нагрев арматурного ряда:

$$Q_{ap} = M_{ap} \cdot \left[ (C_{ap})_0^{\bar{t}_k^{ap}} \cdot \bar{t}_k^{ap} - (C_{ap})_0^{t_H} \cdot t_H \right] \cdot 10^{-3}, \text{ МДж} \quad (4)$$

где  $M_{ap}$  – масса арматурного ряда футеровки, кг;  $\bar{t}_k^{ap}$  – средняя температура арматурного ряда в конце нагрева, °C;  $(C_{ap})_0^{\bar{t}_k^{ap}}$ ;  $(C_{ap})_0^{t_H}$  – средние теплоемкости материала (шамота) арматурного ряда, кДж/(кг K).

в) расход теплоты на нагрев термоизоляции:

$$Q_{uz} = M_{uz} \cdot \left[ (C_{uz})_0^{\bar{t}_k^{uz}} \cdot \bar{t}_k^{uz} - (C_{uz})_0^{t_H} \cdot t_H \right] \cdot 10^{-3}, \text{ МДж} \quad (5)$$

где  $M_{uz}$  – масса термоизоляции, кг;  $\bar{t}_k^{uz}$  – средняя конечная температура изоляции, °C;  $(C_{uz})_0^{\bar{t}_k^{uz}}$ ;  $(C_{uz})_0^{t_H}$  – средние теплоемкости материала термоизоляции, кДж/(кг K).

г) расход теплоты на нагрев кожуха:

$$Q_k = M_k \cdot \left[ (C_k)_0^{\bar{t}_k^K} \cdot \bar{t}_k^K - (C_k)_0^{t_H} \cdot t_H \right] \cdot 10^{-3}, \text{ МДж} \quad (6)$$

где  $M_k$  – масса кожуха ковша, кг;  $\bar{t}_k^K$  – температура кожуха в конце термообработки, °C;  $(C_k)_0^{\bar{t}_k^K}$ ;  $(C_k)_0^{t_H}$  – средние теплоемкости кожуха, кДж/(кгK).

д) расход теплоты на нагрев крышки:

$$Q_{kp} = M_{kp} \cdot \left[ (C_{kp})_0^{\bar{t}_k^{kp}} \cdot \bar{t}_k^{kp} - (C_{kp})_0^{t_H} \cdot t_H \right] \cdot 10^{-3}, \text{ МДж} \quad (7)$$

$M_{kp}$  – масса крышки, кг;  $\bar{t}_k^{kp}$  – температура крышки в конце термообработки, °C;  $(C_{kp})_0^{\bar{t}_k^{kp}}$ ;  $(C_{kp})_0^{t_H}$  – средние теплоемкости материала крышки соответствующие температурам  $\bar{t}_k^{kp}$  и  $t_H$ , кДж/(кгK).

е) расход теплоты на испарение влаги при сушке ковшей (при разогреве ковшей статья отсутствует):

$$Q_{исп} = W_{вл} \cdot \left[ r + (C_{H_2O})_0^{\bar{t}_{yx}} \cdot \bar{t}_{yx} - (C_{H_2O})_0^{100} + C_6(100 - t_n) \right] \cdot 10^{-3}, \text{ МДж} \quad (8)$$

где  $W_{вл}$  – масса испаряемой при сушке влаги, определяемая по формуле:

$$W_{вл} = (M_p + M_{ap}) \cdot \frac{\omega_n - \omega_k}{100 - \omega_n} \cdot \frac{100}{100 - \omega_k}, \text{ кг}. \quad (9)$$

Здесь  $\omega_n$  и  $\omega_k$  – соответственно начальная и конечная относительные влажности футеровки ковша, %;  $r$  – удельный расход теплоты на испарение влаги,  $\text{кДж/кг}$ ;  $\bar{t}_{yx}$  – средняя за цикл термообработки температура уходящих, газов,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $(C_{H_2O})_0^{\bar{t}_{yx}}$ ;  $(C_{H_2O})_0^{100}$  – средние теплоемкости водяного пара в соответствии с температурами  $\bar{t}_{yx}$  и  $100^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{кДж/(кгK)}$ ;  $C_6$  – теплоемкость воды,  $\text{кДж/(кгK)}$ .

ж) потери теплоты с уходящими газами:

$$Q_{yx} = 1,1 \cdot V_{nc} \cdot B \cdot \sum_{i=1}^4 (C_i)_0^{\bar{t}_{yx}} v_i \cdot \bar{t}_{yx} \cdot 10^{-3}, \text{ МДж} \quad (10)$$

где 1,1 – коэффициент, учитывающий подсос воздуха в зазор между верхним срезом ковша и крышкой;  $V_{nc}$  – удельный объем продуктов сгорания,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ;  $(C_i)_0^{\bar{t}_{yx}}$  – средние теплоемкости компонентов продуктов сгорания при температуре  $\bar{t}_{yx}$ ,  $\text{кДж/(м}^3\text{K)}$ ;  $v_i$  – объемные доли компонентов в общем объеме продуктов сгорания, доли ед.

з) потери теплоты от химической неполноты сгорания топлива:

$$Q_{хим} = 12,645 \cdot v_{CO} \cdot V_{nc} \cdot B, \text{ МДж} \quad (11)$$

где 12,645 – теплота сгорания монооксида углерода (СО),  $\text{МДж/м}^3$ ;  $v_{CO}$  – содержание СО в продуктах сгорания, доли ед.

и) потери теплоты вследствие теплопередачи через футеровку ковша:

$$Q_{ст}^{mn} = \frac{1}{\sum_{i=1}^4 \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}} \cdot (\bar{t}_{нов}^u - t_{ос}) \cdot \bar{F} \cdot 3600 \cdot \tau \cdot 10^{-6}, \text{ МДж} \quad (12)$$

где  $\delta_i$  – толщина соответствующего  $i$ -го слоя футеровки ковша (принимается по конструктивным характеристикам ковша), м;  $\lambda_i$  – коэффициент теплопроводности  $i$ -го слоя футеровки ковша при средней температуре за цикл термообработки для данного слоя,  $\text{Вт/(м K)}$ ;  $\alpha_2$  – коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности кожуха к

окружающему воздуху,  $Вт/(м^2 К)$ ;  $\bar{t}_{нов}^u$  – средняя за цикл термообработки температура поверхности футеровки,  $°C$ ;  $t_{ов}$  – температура окружающего воздуха,  $°C$ ;  $\bar{F}$  – среднее значение площади поверхности стенок ковша,  $м^2$ ;  $\tau$  – продолжительность термообработки ковша,  $ч$ .

к) потери теплоты теплопередачей через крышку:

$$Q_{ст}^{mn} = \frac{1}{\frac{\delta_{кр}}{\lambda_{кр}} + \frac{1}{\alpha_2}} \cdot (\bar{t}_{кр}^u - t_{ов}) \cdot F_{кр} \cdot 3600 \cdot \tau \cdot 10^{-6}, \text{ МДж} \quad (13)$$

где  $\delta_{кр}$  – коэффициент теплопроводности слоя футеровки крышки при средней температуре за цикл термообработки для данного слоя,  $кДж/(кг К)$ ;  $\alpha_2$  – коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности крышки к окружающему воздуху,  $Вт/(м^2 К)$ ;  $\bar{t}_{кр}^u$  – средняя за цикл нагрева температура крышки (определяется как среднеарифметическая величина),  $°C$ ;  $F_{кр}$  – площадь поверхности крышки,  $м^2$ .

л) потери теплоты излучением в зазор между верхним срезом ковша и крышкой:

$$Q_{изл} = 5,67 \cdot \left( \frac{T_{к}}{100} \right)^4 \cdot S \cdot \Phi \cdot 3600 \cdot \tau \cdot 10^{-6}, \text{ МДж} \quad (14)$$

где 5,67 – коэффициент излучения абсолютно черного тела,  $Вт/(м^2 К^4)$ ;  $T_{к}$  – средняя температура в объеме ковша в процессе термообработки,  $К$ ;  $S$  – площадь зазора между ковшом и крышкой,  $м^2$ ;  $\Phi$  – коэффициент диафрагмирования;  $\tau$  – продолжительность термообработки ковша,  $ч$ .

Анализ тепловых балансов процессов сушки и разогрева сталеразливочных ковшей заключался в сопоставлении полезно использованной теплоты и потерь теплоты.

К полезно использованной теплоте относятся расходы теплоты на нагрев рабочей кладки  $Q_p$ , арматурного ряда  $Q_{ар}$ , теплоизоляции  $Q_{из}$ , и кожуха  $Q_{к}$ , а также расходы теплоты на испарение влаги  $Q_{исп}$  при сушке ковшей. Остальные расходы теплоты относятся к потерям: потери теплоты с уходящими газами  $Q_{ух}$ , от химического недожога топлива  $Q_{хим}$ , теплопередачей через футеровку ковша  $Q_{ст}^{mn}$  и через крышку  $Q_{кр}^{mn}$ , а также потери теплоты на нагрев крышки  $Q_{кр}$  и потери теплоты излучением через зазор между верхним срезом ковша и крышкой  $Q_{изл}$ .



Соотношение между полезно использованной теплотой и потерями теплоты представлено на рисунках 2 и 3, из которых можно сделать следующие выводы:

а) полезное использование теплоты в процессе сушки в среднем в 1,3 раза выше, чем в процессе разогрева, что объясняется дополнительным расходом теплоты на испарение влаги при сушке;

б) полезное использование теплоты в процессах сушки и разогрева сталеразливочных ковшей при пульсационном сжигании топлива во всех опытах выше по сравнению с нормативной технологией, то есть без пульсационного сжигания.

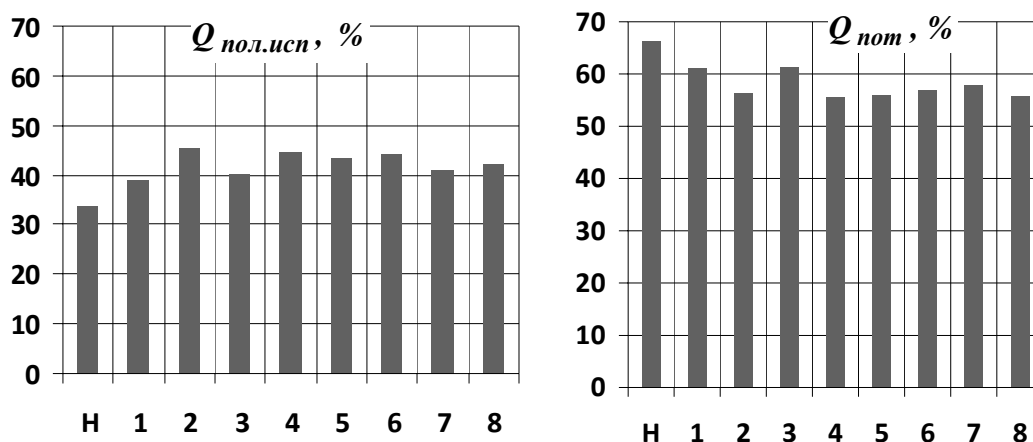


Рис. 2. Соотношение между полезно использованной теплотой  $Q_{пол.исп}$  и потерями теплоты  $Q_{ном}$  при сушке сталеразливочных ковшей (Н – сушка нормативного ковша; 1...8 – номера опытов)

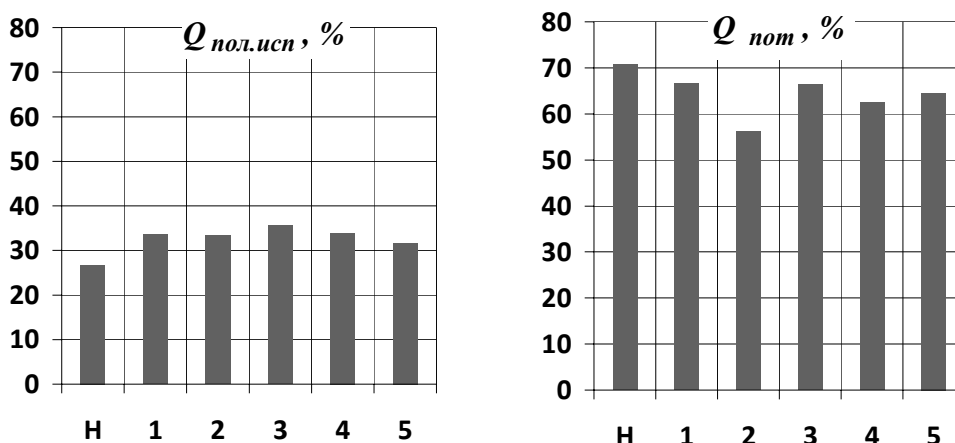


Рис. 3. Соотношение между полезно использованной теплотой  $Q_{пол.исп}$  и потерями теплоты  $Q_{ном}$  при разогреве сталеразливочных ковшей (Н – сушка нормативного ковша; 1...5 – номера опытов)

Сравнение статей затрат полезно использованной теплоты, представленное на рисунках 4 и 5, позволяет сделать следующие выводы:

а) наиболее весомыми статьями полезно использованной теплоты при сушке ковшей являются расходы теплоты на нагрев рабочей кладки, арматурного ряда и испарение влаги;

б) наиболее весомыми статьями полезно использованной теплоты при разогреве ковшей являются расходы теплоты на нагрев рабочей кладки и арматурного ряда;

в) полезно использованная теплота по наиболее весомым статьям расхода при пульсационном сжигании топлива превышает те же статьи при обычном сжигании топлива, что указывает на более интенсивный теплообмен при пульсационных режимах сжигания топлива по сравнению с нормативным.

Соотношения между статьями потерь теплоты, представленные на рисунках 6 и 7, позволяют сделать следующие выводы:

а) наиболее существенными потерями теплоты как в процессе сушки ковшей, так и в процессе разогрева, являются потери теплоты с уходящими газами;

б) при пульсационных процессах сушки и разогрева потери теплоты заметно снижаются по сравнению с обычной термообработкой ковшей, особенно это касается потерь теплоты с уходящими газами и от недожога топлива.

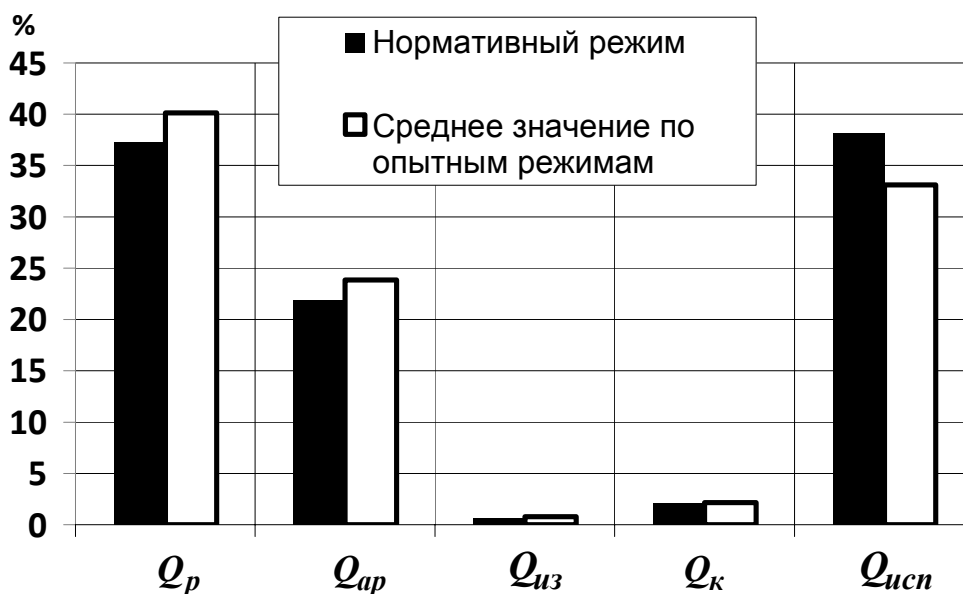


Рис. 4. Соотношение между статьями полезно использованной теплоты при сушке ковшей:  $Q_p$ ,  $Q_{ap}$ ,  $Q_{из}$ ,  $Q_k$  – расходы теплоты, соответственно, на нагрев рабочей кладки, арматурного ряда, теплоизоляции и кожуха ковша;  $Q_{исп}$  – теплота затраченная на испарение влаги

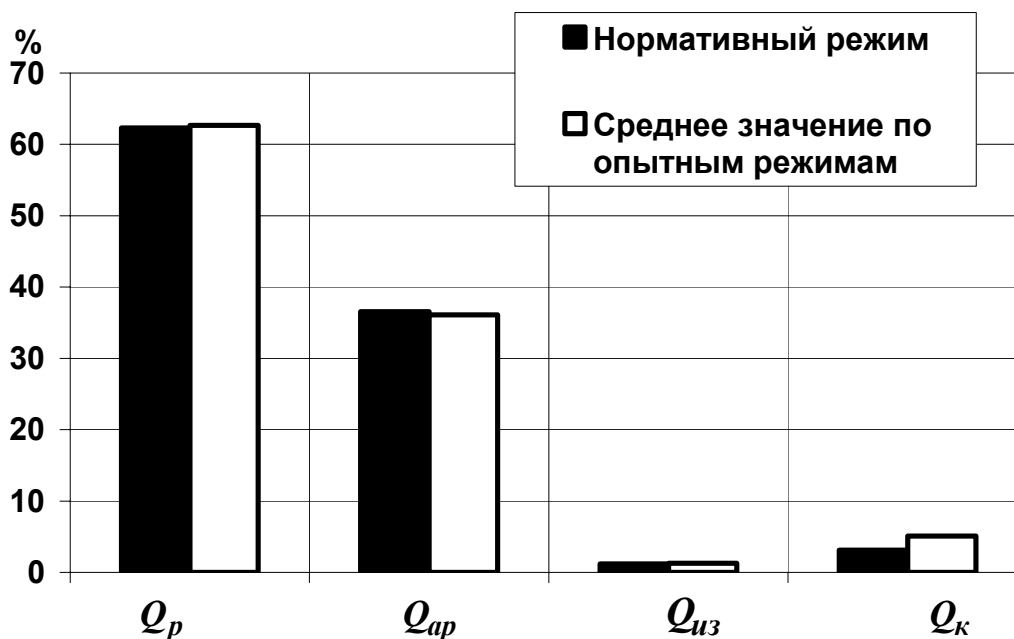


Рис. 5. Соотношение между статьями полезно использованной теплоты при разогреве ковшей:  $Q_p$ ,  $Q_{ap}$ ,  $Q_{из}$ ,  $Q_k$  – расходы теплоты, соответственно, на нагрев рабочей кладки, арматурного ряда, теплоизоляции и кожура ковша

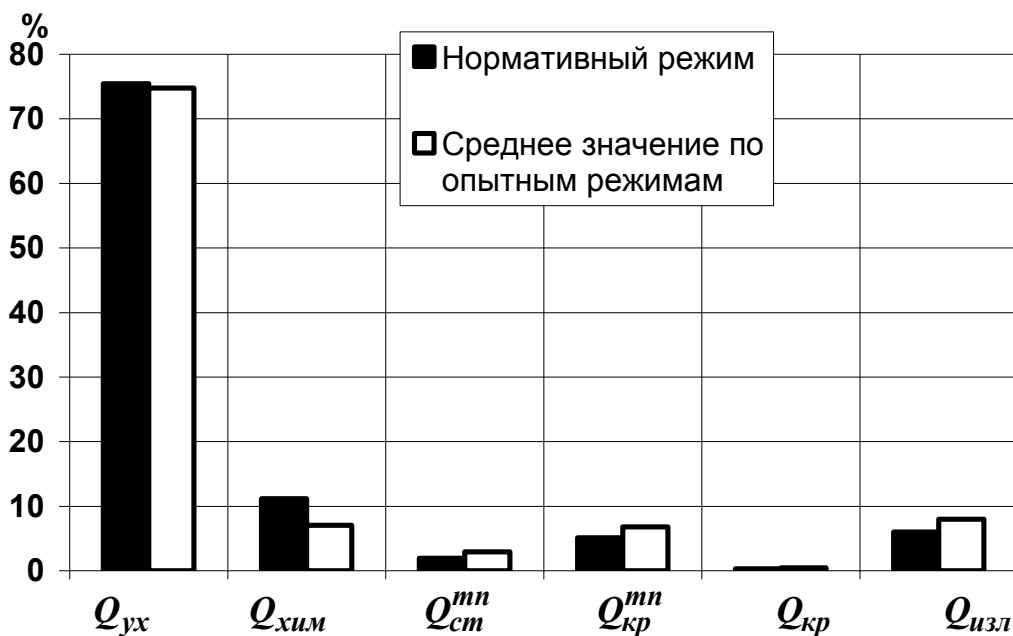


Рис. 6. Соотношение между статьями потерь теплоты при сушке ковшей:  $Q_{ух}$ ,  $Q_{хим}$ ,  $Q_{ст}^{mn}$ ,  $Q_{кр}^{mn}$ ,  $Q_{кр}$ ,  $Q_{изл}$  – потери теплоты, соответственно, с уходящими газами, от химического недожога топлива, теплопередачей через стенку ковша и крышку, нагрев крышки и излучение через зазор между верхним срезом ковша и крышкой

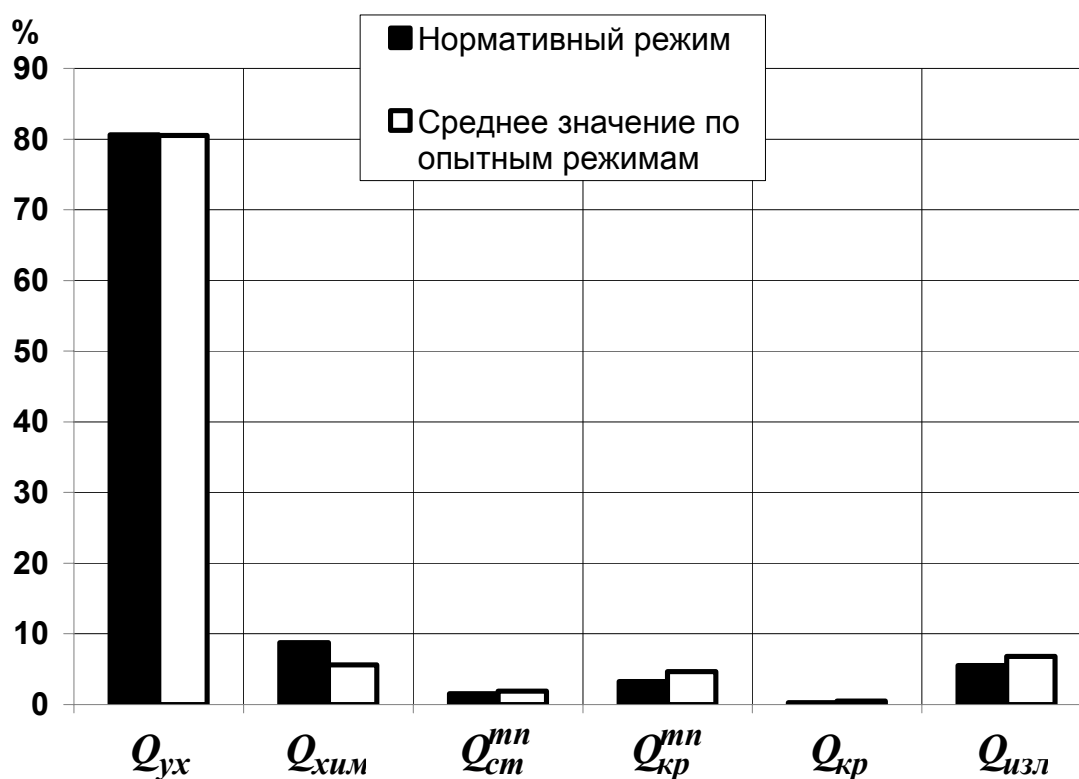


Рис. 7. Соотношение между статьями потерь теплоты при разогреве ковшей:

$Q_{ух}$ ,  $Q_{хим}$ ,  $Q_{ст}^{mn}$ ,  $Q_{кр}^{mn}$ ,  $Q_{кр}$ ,  $Q_{изл}$  – потери теплоты, соответственно, с уходящими газами, от химического недожога топлива, теплопередачей через стенку ковша и крышку, нагрев крышки и излучение через зазор между верхним срезом ковша и крышкой

В целом анализ тепловых балансов опытных режимов пульсационного сжигания топлива при сушке и разогреве сталеразливочных ковшей позволяет сделать следующее заключение в отношении тепловой эффективности пульсационной термообработки ковшей:

а) при пульсационной обработке заметно возрастает полезное использование теплоты топлива, что обеспечивает повышение к.п.д. термообработки и соответствующую экономию топлива по сравнению с обычной термообработкой ковшей;

б) увеличение доли полезно использованной теплоты происходит в основном за счет увеличения аккумуляции теплоты кладкой, арматурным рядом и другими элементами корпуса ковша, что свидетельствует об интенсификации теплоотдачи от продуктов сгорания топлива к внутренней поверхности стенки ковша. Интенсификации теплообмена способствует также исключение застойных зон в рабочем объеме ковша вследствие пульсации и соответствующего увеличения активной тепловоспринимающей поверхности рабочего объема ковша;

в) увеличению доли полезно использованной теплоты способствует также снижение химического недожога топлива, что снижает потери топлива и повышает температуру в рабочем объеме ковша, обеспечивая интенсификацию теплоотдачи;

г) при пульсационной термообработке существенно снижаются потери теплоты с уходящими газами, что в совокупности отражает факт интенсификации теплообмена, лучшего использования рабочего объема ковша и снижение недожога топлива.

Вышеуказанное позволяет заключить, что пульсационное сжигание топлива является эффективным способом его экономии при сушке и разогреве сталеразливочных ковшей и может быть рекомендовано для внедрения.

### **Выводы**

1. Опытные-промышленные исследования показали достаточно высокую работоспособность системы пульсационного сжигания топлива при сушке и разогреве сталеразливочных ковшей. Уменьшение потребления природного газа и, соответственно, его экономия составили при сушке ковшей  $7,8 \div 25,3\%$ , а при разогреве  $19,5 \div 37,8\%$ .

2. При пульсационной обработке заметно возрастает полезное использование теплоты топлива. Увеличение доли полезно использованной теплоты происходит в основном за счет увеличения аккумуляции теплоты кладкой, арматурным рядом и другими элементами корпуса ковша, что свидетельствует об интенсификации теплоотдачи от продуктов сгорания топлива к внутренней поверхности стенки ковша. Интенсификации теплообмена способствует также исключение застойных зон в рабочем объеме ковша вследствие пульсаций и соответствующего увеличения активной тепловоспринимающей поверхности рабочего объема ковша. Увеличению доли полезно использованной теплоты способствует также снижение химического недожога топлива, что снижает потери топлива и повышает температуру в рабочем объеме ковша.

3. Пульсационное сжигание топлива является эффективным способом его экономии при сушке и разогреве сталеразливочных ковшей и может быть рекомендовано для внедрения.

### **Список литературы**

1. Гичёв Ю. А. Эффективность пульсационного сжигания топлива при сушке и разогреве сталеразливочных ковшей / Ю. А. Гичёв, Д. С. Адаменко // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2007. – № 7. – С. 236–240.

2. Гичёв Ю. А. Результаты исследования пульсационного сжигания топлива при сушке и разогреве сталеразливочных ковшей /

Ю. А. Гичёв, Д. С. Адаменко, Г. А. Ткаченко // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2006. – № 7. – С. 161–164.

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

*Рукопись поступила 03.07.2009 г.*