

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ АКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ВЫНОСА ПЫЛИ ИЗ РАБОЧЕГО ПРОСТРАНСТВА ПЕЧИ ВАНЮКОВА

© 2017 г. **В.И. Матюхин, В.А. Гольцев, С.Я. Журавлёв, В.А. Дудко**

Уральский федеральный университет
имени первого президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ), г. Екатеринбург

Статья поступила в редакцию 16.01.17 г., доработана 10.04.17 г., подписана в печать 20.04.2017 г.

Для организации внутриваночного пылеосаждения на печи Ванюкова в ОАО «СУМЗ» (Россия, г. Ревда) была применена технология с использованием акустических излучателей. Конструкция излучателя включала сопловую трубу, воздушное сопло, резонатор и фокусирующую поверхность. Исходя из площади поверхности ванны расплава печи и рекомендуемых значений удельной акустической мощности для внутриваночного пылеосаждения, была рассчитана суммарная звуковая мощность акустического поля и определены оптимальное количество и места расположения акустических излучателей. Для формирования акустического поля на печи Ванюкова для плавки сульфидного медного цинксодеждающего сырья и обеднения жидких конвертерных шлаков в торцевой стене через смотровое окно были установлены 4 акустических излучателя: два со стороны аптейка и два со стороны загрузки шихтовых материалов. Всего было реализовано шесть опытных режимов испытаний системы внутриваночного пылеосаждения с различными настройками работы акустических излучателей и один базовый – для сравнения показателей работы. Продолжительность опытных периодов колебалась от 5 до 18 сут, причем общее время работы агрегата с использованием акустических излучателей составило 68 сут. Наличие в рабочем пространстве печи акустического поля при любых настройках работы излучателей в той или иной мере способствовало снижению концентрации пылевых частиц после цепочки газоочистных аппаратов (в товарной точке). По экспериментальным данным было выявлено, что минимальная суммарная звуковая мощность акустического поля, обеспечивающая снижение концентрации пыли за счет коагуляции пылевых частиц внутри печного пространства, составляет 800 Вт.

Ключевые слова: печь Ванюкова, вынос пыли, осаждение пыли, акустический газоструйный излучатель, выход штейна.

Матюхин В.И. – канд. техн. наук, доцент кафедры теплофизики и информатики в металлургии УрФУ (620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19). E-mail: matyhin53@mail.ru.

Гольцев В.А. – канд. техн. наук, доцент той же кафедры. E-mail: v.a.goltsev@urfu.ru.

Журавлёв С.Я. – бакалавр, магистрант той же кафедры. E-mail: stepan.zhuravlyov@gmail.com.

Дудко В.А. – бакалавр, магистрант той же кафедры. E-mail: v.a.dudko@urfu.ru.

Для цитирования: Матюхин В.И., Гольцев В.А., Журавлёв С.Я., Дудко В.А. Использование энергии акустического поля для снижения выноса пыли из рабочего пространства печи Ванюкова // Изв. вузов. Цвет. металлургия. 2017. No. 4. С. 4–11. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2017-4-4-11.

Matyukhin V.I., Goltsev V.A., Zhuravlev S.Ya., Dudko V.A.

Acoustic field energy utilization for lowering dust removal from the Vanyukov furnace

The acoustic generator technology was used to arrange in-furnace dust deposition in the Vanyukov furnace, OJSC SUMZ (Revda, Russia). The generator design included a nozzle tube, an air nozzle, a resonator and a focusing surface. The total acoustic power of the acoustic field and the optimum number and location of the acoustic generators were determined based on the surface area of the furnace molten pool and the recommended values of specific acoustic power for in-furnace dust deposition. To create an acoustic field in the Vanyukov's furnace for melting the sulfide copper zinc-containing raw material and depleting the liquid converter slag, four acoustic generators were installed in the end wall through the inspection window: two on the uptake side and two on the charge material loading side. In total, six pilot modes of in-furnace dust deposition system testing at different operation settings of acoustic generators were implemented with one basic mode to compare performance. The duration of test periods ranged from 5 to 18 days, and the total operation time of the unit using acoustic generators was 68 days. It should be noted that the presence of an acoustic field in the furnace body at any operation settings of generators in one way or another helped to reduce the concentration of dust particles downstream the chain of gas purifiers (at the commodity point). According to test data, it was found that the minimum total acoustic power of the acoustic field, which reduces the dust concentration due to the coagulation of dust particles within the furnace space, is 800 W.

Keywords: Vanyukov furnace, dust removal, dust deposition, acoustic gas-jet generator, matte discharge.

Matyukhin V.I. – Cand. Sci. (Eng.), Associate professor, Department of thermophysics and informatics in metallurgy (TIM), Ural Federal University (UrFU) name of the first president of Russia B.N. Yeltsin (620002, Russia, Yekaterinburg, Mira str., 19). E-mail: matyhin53@mail.ru.

Goltsev V.A. – Cand. Sci. (Eng.), Associate professor, TIM Department, UrFU. E-mail: v.a.goltsev@urfu.ru.

Zhuravlev S.Ya. – Bachelor, Undergraduate, TIM Department, UrFU. E-mail: stepan.zhuravlyov@gmail.com.

Dudko V.A. – Bachelor, Undergraduate, TIM Department, UrFU. E-mail: v.a.dudko@urfu.ru.

Citation: *Matyukhin V.I., Goltsev V.A., Zhuravlev S.Ya., Dudko V.A. Ispol'zovanie energii akusticheskogo polya dlya snizheniya vynosa pyli iz rabocheho prostranstva pechi Vanyukova. Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya. 2017. No. 4. P. 4–11. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2017-4-4-11.*

Введение

Одним из наиболее эффективных и высокопроизводительных агрегатов для переработки неомокнованного медьсодержащего сырья является печь Ванюкова (ПВ). Ее отличительная особенность проявляется в получении, независимо от вида исходных рудных компонентов, относительно богатого штейна (не менее 45 % меди), отвальных шлаков и богатых по диоксиду серы отходящих газов [1]. При этом технологические условия плавки обеспечивает тепловая энергия, выделяющаяся непосредственно в расплаве в результате барботирования его газообразным окислителем. Благодаря интенсивно протекающим теплообменным процессам между твердыми, жидкими и газообразными компонентами в печи Ванюкова достигаются низкий удельный расход топлива, высокая удельная производительность агрегата при возможности регулирования в широком диапазоне содержания меди в штейне. Принцип работы и перспективы развития плавки в ПВ изложены во многих публикациях [2–8].

Практически все технологические процессы в металлургии, связанные с операциями переработки шихтовых материалов, содержащих мелкодисперсные фракции, сопровождаются значительным пылевыделением. Причина этого явления заключается не столько в технологических особенностях плавильного передела, сколько в неудовлетворительной подготовке исходной шихты. В данном случае использование различных технологических систем очистки отходящих технологических газов — это борьба с последствиями, а не с причинами пылеобразования. Сокращение выноса пыли из печи путем ее осаждения на поверхность расплава не только облегчит работу оборудования системы газоочистки, но и увеличит выход основного продукта — штейна. Коагуляция мелких частиц пыли в крупные, их выпадение из газового потока могут быть достигнуты при воздействии

акустического поля на поверхность расплава и технологические газы непосредственно в рабочем пространстве печи [9–13].

Цель настоящей работы заключалась в исследовании возможности уменьшения пылевыноса из печи Ванюкова при использовании газоструйных акустических излучателей.

Методика исследований

Исследования по влиянию энергии акустического поля на пылеосаждение проводили на печи ПВ-1 для плавки сульфидного медного цинксодержащего сырья и обеднения жидких конвертерных шлаков ОАО «СУМЗ» (г. Ревда).

Для обеспечения максимального результата акустического воздействия на запыленный поток был выбран излучатель, схема которого приведена на рис. 1. Подаваемый в трубу 1 компрессорный воздух через сопло 2 поступает в металлический резонатор 3, выполненный в виде полого цилиндра. Воздушная струя, достигнув торцевой стенки резонатора, отражается от нее и возвращается в обратном направлении. При столкновении двух воздушных струй — первичной из сопла и отраженной от внутренней стенки резонатора —



Рис. 1. Схема акустического излучателя

1 – сопловая труба, 2 – воздушное сопло, 3 – резонатор, 4 – фокусирующая поверхность

формируется энергия акустического излучения, которая с помощью вогнутой фокусирующей поверхности 4 направляется в область воздействия.

Для минимизации затрат на настройку и максимальной эффективности использования энергии акустического поля при реализации процессов осаждения пыли внутри печного пространства и сокращения времени пусконаладочных работ использовали излучатель с постоянными геометрическими размерами. Изменение энергетических параметров акустического поля для обеспечения резонанса собственной частоты колебаний частичек пыли в рабочем пространстве печи с несущей частотой внешнего акустического поля осуществляли варьированием давления компрессорного воздуха, подаваемого в трубу 1 (см. рис. 1), в диапазоне от 0,2 до 0,4 МПа.

Вначале определили количество звуковых излучателей (n , шт.) по величине звуковой мощности, необходимой для реализации эффекта акустического пылеосаждения в рабочем пространстве:

$$n = \frac{N_{уд}S}{N_1},$$

где $N_{уд} = 140 \div 160$ Вт/м² — рекомендуемые [14] значения удельной акустической мощности для внутрипечного пылеосаждения; N_1 — акустическая мощность одного излучателя, Вт; S — площадь поверхности, на которую оказывается акустическое воздействие, м².

Исходя из площади поверхности ванны печи ПВ-1 (36,5 м²) и рекомендуемых значений $N_{уд} = 150$ Вт/м², суммарная звуковая мощность акустического поля должна составить 5475 Вт. Для одного излучателя (см. рис. 1), в зависимости от величины подводимого давления воздуха, значение N_1 варьируется в диапазоне от 300 до 475 Вт.

В связи с технологическими ограничениями по использованию компрессорного воздуха для формирования акустического поля на печи ПВ-1 установили 4 акустических излучателя: два в торцевой стене через смотровое окно со стороны аптека и два — со стороны загрузки шихтовых материалов. Схема размещения излучателей и вспомогательного оборудования приведена на рис. 2. Акустические излучатели 3 монтировали на волноводы 4, изготовленные из трубы диаметром 134 мм. Расстояние между излучателями с каждой стороны составляло 500 мм, а угол наклона был равен 15°. Волноводы защищали излучатели от агрессивного действия печных газов и высокой температуры. Настройку акустической мощности излучателей осуществляли изменением давления компрессорного воздуха регулировочным краном 1.

Отработку режимных параметров использования энергии акустического поля в рабочем пространстве печи Ванюкова производили изменением давления компрессорного воздуха, варьируя также количество включенных излучателей. Влияние энергии акустического поля на показатели

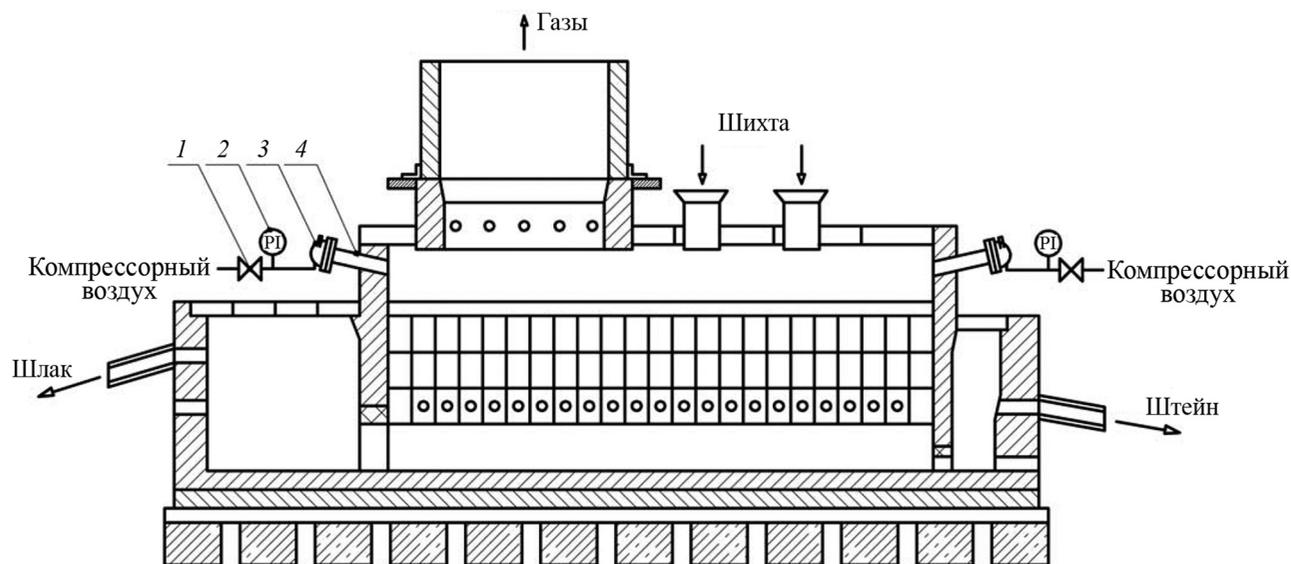


Рис. 2. Схема установки акустических излучателей на ПВ-1

1 — регулировочный кран, 2 — манометр, 3 — акустические излучатели, 4 — волноводы

работы печи ПВ-1 и пылевынос из рабочего пространства оценивали на основании анализа производственных данных за относительно длительный период (более 7 дней) работы агрегата. Для этого использовали результаты приборных замеров основных параметров плавки, полученные по данным информационной системы агрегата, а также контролировали температуру шлака и штейна с помощью переносной термопары.

Результаты работы и их обсуждение

Усредненные показатели, характеризующие работу печи Ванюкова без использования акустических излучателей, полученные по показаниям стационарных контрольно-измерительных приборов и измерений материальных потоков исходных компонентов и продуктов плавки, приведены ниже:

Расход кислорода, м ³ /ч	17338
Расход известняка, т/ч	30,49
Расход шихты, т/ч.....	55,24
Расход газа, м ³ /ч	1057,09
Расход воздуха, м ³ /ч	2093
Температура отходящих газов, °С.....	1111
Запыленность газа на выходе из электрофильтра, мг/м ³	102,2
Выход штейна, кг/ч	31250
Выход шлака, кг/ч	32924
Температура шлака, °С.....	1220
Температура штейна, °С.....	1140

Используя эти данные, составили материальный баланс плавки в ПВ-1 (табл. 1).

Исследования особенностей пылеобразования в печи Ванюкова методами физического и матема-

тического моделирования позволили установить [15] наличие в ее рабочем пространстве зон вихревого неупорядоченного движения газовой среды в области загрузочных отверстий, заливочного окна и пристеночного пространства над ванной. Именно в этих зонах образуется большое количество взвешенных пылевых частиц. В других частях печи (в области арочной сводовой перегородки, у поверхности ванны в головной части печи) формируются зоны, в которых, в свою очередь, создаются условия для значительного выноса пылевых частиц. Более крупные частицы расплава и пыли выносятся в газоотводящий канал с последующим осаждением на теплообменных поверхностях котла-утилизатора и в системе газоочистки.

Газовая среда ПВ характеризуется значительной температурой, повышенной агрессивностью (ввиду присутствия в ней сернистых соединений), присутствием расплавленных частиц штейна и шлака [16]. Располагая акустические излучатели в местах формирования пылевых потоков и активно воздействуя на них энергией акустического поля, можно снизить образование пыли непосредственно в рабочем пространстве печи [17, 18]. Результат внешнего акустического воздействия на пылевые частицы, распределенные в газовом потоке, в основном зависит от наличия вязкостных сил Стокса между колеблющимся потоком внешней среды, омывающим твердые элементы. Образующиеся в нем стоячие звуковые волны формируют нестационарное скоростное поле, тем самым способствуя коагуляции и дальнейшему осаждению укрупнившихся частиц [19–22].

Поскольку акустическое воздействие осуществляется только на рабочее пространство печи Ванюкова без изменения условий работы системы газоочистки, то для анализа условий пылеосаждения достаточно использовать данные о запыленности

Таблица 1
Материальный баланс плавки

Приход массы			Расход массы		
Статьи	кг/кг штейна	%	Статьи	кг/кг штейна	%
Расход шихты	1,90	49,8	Выход штейна	1,0	26,2
Расход известняка	1,07	28,0	Выход шлака	1,05	27,5
Расход кислорода	0,75	19,6	Выход пыли	0,02	0,5
Расход воздуха	0,08	2,1	Выход отходящих газов	1,75	45,8
Расход природного газа	0,02	0,5			
Общий приход	3,82	100,0	Общий расход	3,82	100

Таблица 2

Усредненные показатели работы ПВ-1 с использованием энергии акустического поля по периодам испытаний

Режим	Длительность, сут	Акустическая мощность, Вт	Расход шихты, т/ч	Температура отходящих газов, °С	Запыленность технологических газов после системы газоочистки (в товарной точке), мг/м ³	Выход штейна, т/сут	Выход шлака, т/сут	Температура шлака, °С	Температура штейна, °С
1 Базовый, без воздействия акустического поля	7	–	55,17	1134	130,16	806,64	846,97	1226	1176
2 1 излучатель $P_{к.в}^* = 0,3$ МПа	5	427	56,48	1144	119,83	812,50	853,13	1227	1193
3 2 излучателя со стороны загрузки $P_{к.в} = 0,3$ МПа	11	854	56,43	1136	31,33	808,34	848,76	1226	1183
4 2 излучателя со стороны загрузки, 1 – со стороны аптейка $P_{к.в} = 0,3$ МПа	9	1281	54,45	1172	41,75	761,54	799,62	1211	1198
5 2 излучателя со стороны загрузки, 2 – со стороны аптейка $P_{к.в} = 0,4$ МПа	18	1903	52,81	1007	44,17	645,00	677,25	1230	1180
6 2 излучателя со стороны загрузки, 1 – со стороны аптейка $P_{к.в} = 0,2$ МПа	15	928	53,99	1169	53,42	771,74	801,91	1227	1194
7 2 излучателя со стороны загрузки $P_{к.в} = 0,2$ МПа	10	618	62,86	1134	91	Нет данных	Нет данных	1225	1100
* $P_{к.в}$ – давление компрессорного воздуха, подаваемого на излучатель.									

в товарной точке (после последней ступени очистки — электрического фильтра). Если считать, что на печи выполняется технологическая инструкция на плавку медного сырья, то при длительном периоде исследований (не менее недели) усредненные данные, полученные за этот промежуток времени, могут служить критерием для анализа поведения агрегата в измененных условиях.

Всего на ПВ-1 провели 6 опытных режимов испытаний системы внутриванного пылеосаждения с различными настройками работы акустических излучателей и 1 базовый — для сравнения

показателей работы (табл. 2). Продолжительность опытных режимов колебалась от 5 до 18 сут, причем общая длительность работы агрегата с использованием акустических излучателей составила 68 сут. Во все периоды испытаний, кроме 5-го и 7-го (отсутствие данных), производительность агрегата по расплаву (совместный выход штейна и шлака) была постоянной. Анализируя данные табл. 2, необходимо отметить, что наличие в рабочем пространстве печи акустического поля при любых настройках работы излучателей в той или иной мере способствовало снижению concentra-

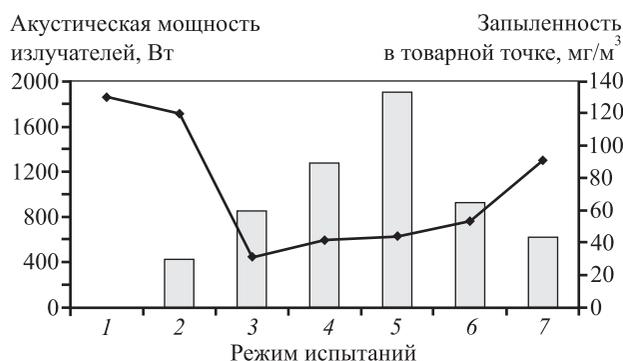


Рис. 3. Зависимость средней запыленности (ломаная линия) технологических газов в товарной точке от акустической мощности по периодам испытаний

ции пылевых частиц после цепочки газоочистных аппаратов (в товарной точке).

На рис. 3 представлена экспериментальная зависимость изменения запыленности отходящих газов в товарной точке от общей акустической мощности, подаваемой в рабочее пространство ПВ-1 в ходе отработки опытных режимов. Ее анализ показал, что с увеличением суммарной звуковой мощности акустического поля до уровня 800 Вт и более (режимы испытаний 3–6 в табл. 2) средняя запыленность потока газов после цепочки аппаратов газоочистки составляет приблизительно 50 мг/м³, что примерно в 2 раза ниже по сравнению с базовым периодом испытаний без воздействия акустического поля. Следует отметить, что высокие значения общей акустической мощности (1900 и 1280 Вт на режимах 5 и 4) не приводят к повышению эффективности пылеосаждения. Однако и относительно небольшая ее величина (периоды испытаний 2 и 7) не оказывает значительного влияния на концентрацию пылевых частиц в отходящих газах печи в товарной точке.

Средствами центральной заводской лаборатории ОАО «СУМЗ» были выполнены непрерывные сравнительные измерения и расчеты пылевыноса из печи ПВ-1 без использования энергии акустического поля и с ее применением. В обоих случаях продолжительность экспериментов составляла 10 сут. Генерацию акустического поля осуществляли двумя излучателями, установленными со стороны загрузки шихтовых материалов с акустической мощностью 860 Вт, и двумя излучателями со стороны аптейка с мощностью 950 Вт. В процессе испытаний контролировали основные параметры печи с учетом особенностей выгрузки пылевых компонентов из котла-утилизатора и электрофильтра. По результатам расчетов выяв-

лено снижение общего пылевыноса из рабочего пространства печи при применении акустического поля с 0,77 до 0,69 % от общей массы шихтовых материалов, загружаемых в печь. Сравнительный анализ уровня звукового давления на рабочих площадках печи показал отсутствие существенного изменения его значений при использовании энергии акустического поля.

Выводы

1. Доказана эффективность использования энергии акустического поля для организации пылеосаждения в рабочем пространстве печи Ванюкова. Опытным путем определена минимальная акустическая мощность газоструйных излучателей, необходимая для снижения пылевыноса, которая составила 800 Вт.

2. Средствами центральной заводской лаборатории ОАО «СУМЗ» показано, что в период применения акустических излучателей суммарной мощностью 1800 Вт средний вынос пыли из печи ПВ-1 составил 0,69 % от массы загруженной шихты, а без их использования — 0,77 %.

3. Установлено, что применение акустического поля не привело к изменению уровня звукового давления на рабочих площадках печи.

Литература

1. Гуцин С.Н., Телегин А.С., Лобанов В.И., Корюков В.Н. Теплотехника и теплоэнергетика металлургического производства. М.: Metallurgy, 1993.
2. Ванюков А.В., Уткин Н.И. Комплексная переработка медного и никелевого сырья. Челябинск: Metallurgy, 1988.
3. Han Feng, Yu Fei, Cui Zhaojie. Industrial metabolism of copper and sulfur in a copper-specific eco-industrial park in China // J. Clean. Product. 2015. Vol. 133. P. 459–466.
4. Набойченко С.С., Агеев Н.Г., Дорошкевич А.П., Жуков В.П., Елисеев Е.И., Карелов С.В., Лебедь А.Б., Мамяченков С.В. Процессы и аппараты цветной металлургии: Учеб. для вузов / Под ред. С.С. Набойченко. Екатеринбург: УГТУ—УПИ, 2005.
5. Vaishurd S., Berner A., Brandon D.G., Kozhakhmetov S., Kenzhaliyev E., Zhalelev R. Slags and mattes in Vanyukov's process for the extraction of copper // Metal. Mater. Trans. 2015. Vol. 33. No. 4. P. 551–559.
6. Chen L., Bin W., Yang T., Liu W., Bin S. Research and industrial application of oxygen-rich side-blow bath smelt-

- ing technology // Proc. of 4-th Int. Symp. on High-Temperature Metallurgical Processing (TMS 2013). Annual Meeting and Exhibition (San Antonio, TX, United States, 3–7 March 2013). 2013. P. 49–55.
7. Ярошенко Ю.Г., Матюхин О.В., Паньшин А.М., Коновалов И.С. Использование энергии акустического поля для улучшения показателей работы шахтных печей // Цвет. металлы. 2013. No. 8. С. 64–70.
 8. Asanov D.A., Filyanova L.A., Zapasnyi V.V., Sukhova N.M. Study of the performance indices of a dust-cleaning system at the balkhash copper smelter // Metallurgist. 2016. No. 3-4. P. 331–338.
 9. Zhang H.L., Zhou C.Q., Bing W.U., Chen Y.M. Numerical simulation of multiphase flow in a Vanyukov furnace // J. Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2015. Vol. 115. No. 5. P. 457–463.
 10. Кутамеладзе С.С. Тепло- и массообмен в звуковом поле. Новосибирск: СО АН СССР, 1970.
 11. Cafiero G., Greco C.S., Astarita T., Discetti S. Flow field features of fractal impinging jets at short nozzle to plate distances // Exp. Therm. Fluid Sci. 2016. No. 78. P. 334–344.
 12. Andrade M.A.B., Skotis G.D., Ritchie S.B., Cumming D.R.S., Riehle M.O., Bernassau A.L. Contactless acoustic manipulation and sorting of particles by dynamic acoustic fields // IEEE Trans. Ultrason., Ferroelectr., Frequ. Contr. 2016. Vol. 63. Iss. 10. P. 1593–1600.
 13. Dong X.-R., Liu Y.-X., Chen Y.-H., Dong G. Research on control of hypersonic shock wave/boundary layer interactions by double micro-ramps // Binggong Xuebao. Acta Armamentarii. 2016. Vol. 37. No. 9. P. 1624–1632.
 14. Долинский А.А., Басок Б.И., Гулый С.И. Дискретно-импульсный ввод энергии в теплотехнологиях. Киев: ИТТФ НАНУ, 1996.
 15. Серегин П.С. Исследование газовой динамики внутрипечного пространства, пылевыноса и настывлеобразования в печи Ванюкова с использованием метода физического моделирования: Дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург: Институт Гипронибель, 2001.
 16. Селиванов Е.Н., Скопов Г.В., Гуляева Р.И., Матвеев А.В. Вещественный состав пыли электрофильтров печи Ванюкова ОАО «Среднеуральский медеплавильный завод» // Металлург. 2014. No. 5. С. 92–95.
 17. Кардашев Г.А. Физические методы интенсификации процессов в химической технологии. М.: Химия, 1990.
 18. Коновалов И.С. Совершенствование тепловой и газодинамической работы шахтных медеплавильных печей: Дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург: УрФУ, 2012.
 19. Shilton R.J., Yeo L.Y., Friend J.R. Quantification of surface acoustic wave induced chaotic mixing-flows in microfluidic wells // Sensors and Actuators. B: Chem. 2011. Vol. 160. No. 1. P. 1565–1572.
 20. Khabeev N.S. Intensification of the effect exerted by bubbles on a body immersed in a liquid due to the radial bubble oscillations // J. Eng. Phys. Thermophys. 2015. Vol. 88. No. 3. P. 645–651.
 21. Ивановский А.И. Теоретическое и экспериментальное изучение потоков, вызванных звуком. М.: Гидрометеиздат, 1959.
 22. Руденко О.В., Молен С.И. Теоретические основы нелинейной акустики. М.: Наука, 1978.

References

1. Gushchin S.N., Telegin A.S., Lobanov V.I., Koryukov V.N. Teplotekhnika i teploenergetika metallurgicheskogo proizvodstva [Heating engineer and power system of metallurgical production]. Moscow: Metallurgiya, 1993.
2. Vanyukov A.V., Utkin N.I. Kompleksnaya pererabotka mednogo i nikelvogo syr'ya [Complex processing of copper and nickel raw materials]. Chelyabinsk: Metallurgiya, 1988.
3. Han Feng, Yu Fei, Cui Zhaojie. Industrial metabolism of copper and sulfur in a copper-specific eco-industrial park in China. J. Clean. Product. 2015. Vol. 133. P. 459–466
4. Naboichenko S.S., Ageev N.G., Doroshkevich A.P., Zhukov V.P., Eliseev E.I., Karelov S.V., Lebed' A.B., Mamyachenkov S.V. Protsessy i apparaty tsvetnoi metallurgii [Processes and devices of nonferrous metallurgy]. Ekaterinburg: UGTU—UPI, 2005.
5. Vaisburd S., Berner A., Brandon D.G., Kozhakhmetov S., Kenzhaliyev E., Zhalelev R. Slags and mattes in Vanyukov's process for the extraction of copper. Metall. Mater. Trans. 2015. Vol. 33. No. 4. P. 551–559.
6. Chen L., Bin W., Yang T., Liu W., Bin S. Research and industrial application of oxygen-rich side-blow bath smelting technology. In: Proc. of 4-th Int. Symp. on High-Temperature Metallurgical Processing (TMS 2013). Annual Meeting and Exhibition (San Antonio, TX, United States, 3–7 March 2013). 2013. P. 49–55.
7. Matyukhin V.I., Yaroshenko Yu.G., Matyukhin O.V., Pan'shin A.M., Konovalov I.S. Ispol'zovanie energii akusticheskogo polya dlya uluchsheniya pokazatelei raboty shakhtnykh pechei [Using the energy of the acoustic field to improve the performance of the shaft furnace]. Tsvet. metallurgy. 2013. No. 8. P. 64–70.
8. Asanov D.A., Filyanova L.A., Zapasnyi V.V., Sukhova N.M. Study of the performance indices of a dust-cleaning sys-

- tem at the balkhash copper smelter. *Metallurgist*. 2016. No. 3-4. P. 331—338.
9. Zhang H.L., Zhou C.Q., Bing W.U., Chen Y.M. Numerical simulation of multiphase flow in a Vanyukov furnace. *J. Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2015. Vol. 115. No. 5. P. 457—463.
 10. Kutateladze S.S. Teplo i massoobmen v zvukovom pole [Heat and mass transfer in the acoustic field]. Novosibirsk: SO AN SSSR, 1970.
 11. Cafiero G., Greco C.S., Astarita T., Discetti S. Flow field features of fractal impinging jets at short nozzle to plate distances. *Exp. Therm. Fluid Sci.* 2016. No. 78. P. 334—344.
 12. Andrade M.A.B., Skotis G.D., Ritchie S.B., Cumming D.R.S., Riehle M.O., Bernassau A.L. Contactless acoustic manipulation and sorting of particles by dynamic acoustic fields. *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelectr., Frequ. Contr.* 2016. Vol. 63. Iss. 10. P. 1593—1600.
 13. Dong X.-R., Liu Y.-X., Chen Y.-H., Dong G. Research on control of hypersonic shock wave/boundary layer interactions by double micro-ramps. *Binggong Xuebao. Acta Armamentarii*. 2016. Vol. 37. No. 9. P. 1624—1632.
 14. Dolinskii A.A., Basok B.I., Gulyi S.I. Diskretno-impul'snyi vvod energii v teplotekhnologiyah [Discrete and pulse input of energy in heattechnologies]. Kiev: ITTF NANU, 1996.
 15. Seregin P.S. Issledovanie gazovoi dinamiki vnutripechnogo prostranstva, pylevynosa i nastyleobrazovaniya v pechi Vanyukova s ispol'zovaniem metoda fizicheskogo modelirovaniya: Diss. PhD. Sankt-Peterburg: Institut Gipronikel', 2001.
 16. Selivanov E.N., Gulyaeva R.I., Skopov G.V., Matveev A.V. Material composition of the dust from the electrostatic precipitators of a Vanyukov furnace at the Middle Ural Copper Smelter. *Metallurgist*. 2014. No. 5-6. P. 431—435.
 17. Kardashev G.A. Fizicheskie metody intensivatsii protsessov v khimicheskoi tekhnologii [Physical methods of intensification of processes in chemical technology]. Moscow: Khimiya, 1990.
 18. Kononov I.S. Sovershenstvovanie teplovoi i gazodinamicheskoi raboty shakhtnykh medeplavil'nykh pechei: Diss. PhD. Ekaterinburg: UFU, 2012.
 19. Shilton R.J., Yeo L.Y., Friend J.R. Quantification of surface acoustic wave induced chaotic mixing-flows in microfluidic wells. *Sensors and Actuators. B: Chem.* 2011. Vol. 160. No. 1. P. 1565—1572.
 20. Khabeev N.S. Intensification of the effect exerted by bubbles on a body immersed in a liquid due to the radial bubble oscillations. *J. Eng. Phys. Thermophys.* 2015. Vol. 88. No. 3. P. 645—651.
 21. Ivanovskii A.I. Teoreticheskoe i eksperimental'noe izuchenie potokov, vyzvannykh zvukom [Theoretical and experimental study of the flow caused by the sound]. Moscow: Gidrometeoizdat, 1959.
 22. Rudenko O.V., Molen S.I. Teoreticheskie osnovy nelineinoi akustiki [Theoretical foundations of nonlinear acoustics]. Moscow: Nauka, 1978.