

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ ВИХРЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ ОГНЕУПОРНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ФУТЕРОВКУ КОНВЕРТЕРОВ. СООБЩЕНИЕ 1. ОСОБЕННОСТИ ДРОБЛЕНИЯ ЖИДКОГО ШЛАКА ПРИ РАЗДУВКЕ ВИХРЕВОЙ ФУРМОЙ*

Калиногорский А.Н.¹, аспирант кафедры металлургии черных металлов

Протопопов Е.В.¹, д.т.н., профессор, ректор (protopopov@sibsiu.ru)

Чернятевич А.Г.², д.т.н., профессор, заведующий отделом

физико-технических проблем металлургии стали

Фейлер С.В.¹, к.т.н., заведующий кафедрой металлургии черных металлов

Багрянцев В.И.¹, к.т.н., заведующий экспериментальной лабораторией

автоматизированных энергогенерирующих технологий

¹ Сибирский государственный индустриальный университет
(654007, Россия, г. Новокузнецк, Кемеровская обл., ул. Кирова, 42)

² Институт черной металлургии Национальной академии наук Украины
(49050, Украина, г. Днепропетровск, пл. Академика Стародубова, д. 7)

Аннотация. Перспективным направлением повышения эффективности нанесения огнеупорных покрытий на футеровку конвертеров является применение специальных дутьевых устройств разработанных конструкций, в том числе вихревых фурм, для максимального разбрызгивания шлакового расплава. С использованием основных положений механики газожидкостных систем выполнено численное моделирование дробления жидкого шлака при различных режимах его раздувки вихревыми струями. Получено, что размер частиц шлака, выносимых из зоны взаимодействия, определяется скоростью газового потока и расходом газа. Снижение вязкости шлака способствует уменьшению минимального размера частиц. При раздувке шлака в режиме «пробоя» возможно вспенивание шлакового расплава, что приводит к снижению скорости шлаковых частиц и отрицательно влияет на создание гарнисажа на футеровке конвертера.

Ключевые слова: конвертер, вихревая фурма, скорость струи, жидкий шлак, дробление, размер капель, раздувка, огнеупорное покрытие.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-10-756-760

В последнее десятилетие общепризнанным и эффективным является использование специальных дутьевых устройств и технологий нанесения шлакового гарнисажа на футеровку конвертеров для повышения их стойкости [1 – 4].

Как известно [5 – 7], формы совместного движения газа и жидкости (в том числе в металлургических системах) исключительно многообразны: от движения двух сплошных параллельных потоков, взаимодействующих по одной непрерывной границе раздела, до движения пены, в которой обе фазы образуют сложную и неустойчивую структуру.

На поверхности раздела фаз возникают силовые, тепловые и массообменные взаимодействия, которые оказывают влияние на поля скоростей, давлений, температур и концентраций в различных фазах, отделенных друг от друга поверхностью раздела. На границе раздела фаз возникают скачки давления, температуры, концентрации и скорости течения.

* Работа выполнена в СибГИУ по государственному заданию Минобрнауки России (проект 2556).

Изучению механики газожидкостных систем посвящено множество работ [5 – 10], тем не менее проблема далека от решения. Это связано со значительными трудностями теоретических и экспериментальных исследований.

Возможным вариантом оптимизации «гарнисажных» технологий является использование в специальных дутьевых устройствах элементов конструкций аппаратов для получения вихревых газовых струй [8 – 11], что позволяет обеспечить максимальное разбрызгивание шлакового расплава и использовать положения механики газожидкостных сред при анализе и расчетах.

Принцип работы вихревой фурмы и режимы взаимодействия вихревых газовых потоков со шлаковым расплавом описаны в работах [11, 12]. Установлено [11], что при подаче газа через сопло вихревой фурмы газовый поток движется вниз и, отражаясь от поверхности расплава и захватывая при этом частицы шлака, устремляется в верхние горизонты рабочего пространства агрегата [13].

В миделевых сечениях газовой струи при построении эпюр скоростей на начальном участке струи (ядро начальных скоростей) радиальная скорость потока равна нулю. По мере распространения газовой струи в рабочем пространстве агрегата за счет центробежных сил струя начинает расширяться, наблюдается снижение осевой и увеличение скорости в пограничном слое. Интенсивное взаимодействие с окружающей средой способствует развитию этого процесса, а использование закрученных газовых струй усиливает описанный эффект.

Как установлено в работе [11], количество шлакового расплава, увлекаемого газовым потоком и наносимого на огнеупорную футеровку конвертера, определяется размером (D) частиц шлака, образующихся при взаимодействии с вихревыми газовыми струями:

$$D \approx 6 \frac{\tau^{1/3}}{\rho_r \Delta u^2} (\sigma + \mu_r \Delta u), \quad (1)$$

где $\tau = Q_{ж}/Q_r$ – отношение объемных расходов газа и жидкой фазы; ρ_r – плотность газа, кг/м³; u – тангенциальная скорость потока, м/с; Δu – разность скоростей частицы и пульсаций газовой среды, м/с; σ – коэффициент поверхностного натяжения, Н/м; μ_r – динамическая вязкость газа, Па·с.

При делении левой и правой частей соотношения (1) на эффективный диаметр (d) поднятого столба шлака получаем критериальное уравнение:

$$\frac{D}{d} = 6\tau^{1/3} \left(We^{-1} + Re^{-1} \frac{\mu}{\mu_r} \right), \quad (2)$$

где d – эффективный диаметр столба шлака, равный диаметру выходного сопла вихревой фурмы, м; $We = \rho_r \Delta u^2 \frac{d}{\sigma}$ – число Вебера; $Re = \frac{\rho \Delta u d}{\mu_r}$ – число Рейнольдса; $\rho_r \Delta u^2$ – аналог кинетической энергии пульсаций газовой среды, кг/(м·с²); μ – динамическая вязкость шлака, Па·с.

При выполнении расчетов были использованы следующие значения физико-химических свойств жидкого шлака [13]: $\rho = 3 \cdot 10^3$ кг/м³; $\mu = 0,1 - 0,3$ Па·с при $T = 1450$ °С; $\nu = (0,3 - 1,0) \cdot 10^{-4}$ м²/с – кинематическая вязкость; $\sigma = 0,5 - 0,6$ Н/м при 1400 – 1600 °С. Вязкость шлака зависит от химического состава и температуры. В качестве несущего газа при дроблении и разбрызгивании шлака применяется азот, для которого принимается $\rho_N = 1,25$ кг/м³, $\mu_N = 2,1 \cdot 10^{-5}$ Па·с. Результаты предварительных расчетов при скорости u газожидкостного потока 100 м/с показали, что эффект, связанный с действием поверхностного натяжения, в сравнении с действием, оказываемым трением, составляет не более 2 % и с увеличением скорости его действие уменьшается. В связи с этим в дальнейших расчетах учитывали только действие вязкостного трения.

Использование известково-магнезиальных флюсов по ходу продувки в конвертере обеспечивает более высокую вязкость шлака, поэтому второй член в выражении (2) намного больше первого: следовательно, выражение (2) значительно упрощается:

$$\frac{D}{d} = 6\tau^{1/3} \left(Re^{-1} \frac{\mu}{\mu_r} \right). \quad (3)$$

На рис. 1 приведены результаты расчетов по уравнению (3) относительного диаметра капель шлака, получаемых при разбрызгивании с изменением относительного объемного расхода жидкой фазы τ в диапазоне $10^{-3} - 10^{-2}$. Установлено, что при диаметре выходного сопла вихревой фурмы $d = 0,2$ м и скорости газового потока 300 м/с диаметр капли равен примерно 600 мкм.

Очевидно, что размер капель определяется не только скоростью газового потока, но и расходом газа. Предварительный расчет размера шлаковых частиц проводили при значении $\tau \sim 10^{-3}$, что соответствует соотношению $G_{ж}/G_r = 2,4$ (где $G_{ж}$ – массовый расход жидких шлаковых частиц, кг/с, G_r – массовый расход газа, кг/с). При уменьшении соотношения $G_{ж}/G_r$ до 0,5 минимальный размер капли шлака будет составлять порядка 300 мкм при максимальных значениях вязкости шлакового расплава. Снижение вязкости шлака в три раза способствует уменьшению минимального размера частиц примерно до 100 мкм.

Описание физического механизма диспергирования как в центральной зоне, так и на границе взаимодействия газового потока, шлакового расплава и огнеупорной футеровки конвертера при раздувке шлака в режиме «пробоя» аналогично. Это позволяет оценить размер капель следующим образом [11]: в соотношении (3) за масштаб можно принять диаметр ($d_{вз}$) зоны взаимодействия, из которой струя газа вытесняет жидкий шлак, что позволяет использовать поправочный коэффициент k , причем $k = D/d_{вз}$. Тангенциальная скорость

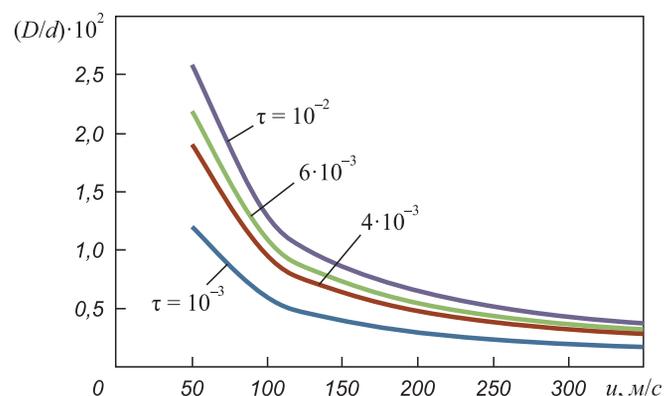


Рис. 1. Зависимость D/d от скорости потока газа и отношения объемного расхода фаз

Fig. 1. Dependence D/d on gas stream velocity and the relation of phase volume flow rate

снижается, исходя из типичного распределения $1/r$ (где $r = d/2$) [14], которое также является отношением диаметров, то есть поправка будет определяться как $(D/d_{вз})^2$. Пульсационная составляющая взаимодействия также снижается по такой же зависимости, поэтому при раздувке шлакового расплава по периферии ванны вероятно увеличение диаметра частиц шлака.

Размер частиц, образующихся на границе шлакового расплава, ограничен. Это связано с образованием в данной области двухфазного потока частиц шлака и газа, который способствует некоторому вспениванию газошлаковой эмульсии, в связи с чем частицы шлака выносятся из зоны взаимодействия со скоростью, не превышающей скорость распространения звука в смеси. Скорость звука для смеси азота и жидкого шлака ($a_{см}$) определяется из выражения работы [15]:

$$\frac{1}{a_{см}^2} = \frac{\partial \rho_{см}}{\partial P} = \rho_{см} \left(\frac{\phi}{\rho_{г} a_{г}^2} + \frac{1-\phi}{\rho_{ш} a_{ш}^2} \right);$$

$$\rho_{см} = \rho_{ш} (1-\phi) + \rho_{г} \phi;$$

здесь $a_{г}^2 = \frac{\partial \rho_{г}}{\partial P}$ – скорость звука в среде азота; $a_{ш}^2 = \frac{\partial \rho_{ш}}{\partial P}$ – скорость звука в среде шлака; $\rho_{г}$ и $\rho_{ш}$ – плотность азота и шлака; P – давление среды; ϕ – газосодержание потока.

Результаты расчета скорости звука для газошлаковой эмульсии представлены на рис. 2. Практически во всем диапазоне скорость звука не превышает 30 м/с и только в крайних случаях (при незначительном газосодержании или при практически полном отсутствии шлака в эмульсии) скорость распространения звука увеличивается: при $\phi = 0,01$ до 69,8 м/с, при $\phi = 0,99$ до 68,0 м/с.

Как установлено в работе [11], на выходе газового потока из сопла фурмы над поверхностью шлака образуется вихревой поток, который имеет область пониженного давления в осевой зоне. Если предположить, что тангенциальная скорость убывает при удалении от

центра вихря как $1/r$, то давление над поверхностью определяется уравнением [10]

$$\frac{1}{\rho_r} \frac{dP}{dr} = \frac{\Gamma^2}{r^3}, \tag{4}$$

где Γ – циркуляция скорости.

Решением этого уравнения является выражение

$$P = P_0 - \frac{\rho \Gamma^2}{r^2},$$

где P_0 – атмосферное давление.

При истечении газового потока из сопла вихревой фурмы давление в окрестности выхода газа из фурмы значительно меньше, чем в окружающей среде. Таким же будет давление и в целом над поверхностью шлаковой ванны. В результате за счет перепада давления шлаковый расплав в зоне взаимодействия перемещается от периферии к центру. Необходимо отметить, что только при определенной высоте фурмы относительно поверхности шлака реализуется течение шлака по описанной траектории. Движение шлака под действием перепада давления над плоскостью определяется уравнением

$$V \frac{dV}{dr} = - \frac{1}{\rho_{ш}} \frac{dP}{dr},$$

где V – скорость течения шлака.

Вязкостью шлака пренебрегаем, в результате получаем завышенное значение скорости движения расплава. Подставляя значение давления из соотношения (4), получаем

$$\frac{V^2}{2} = \frac{\rho_{г}}{\rho_{ш}} \frac{\Gamma^2}{2r^2}.$$

Откуда следует, что

$$V = \frac{2\Gamma}{d \left(\frac{\rho_{г}}{\rho_{ш}} \right)^{1/2}}.$$

Тогда объемный расход шлака, поступающего в зону взаимодействия, можно оценить следующим соотношением:

$$Q = \frac{\pi \xi^2 d_0 \Gamma \left(\frac{\rho_{г}}{\rho_{ш}} \right)^{1/2}}{2},$$

где ξ – параметр, характеризующий положение границы вихря, где давление меньше атмосферного.

Положение границы вихря определяется параметрами фурмы ($\xi \sim 0,5 \div 0,6$). В этих условиях скорость движения шлака на уровне среза фурмы составляет примерно 4 м/с, а расход вовлекаемого шлака – 0,016 м³/с (или 57 м³/ч).

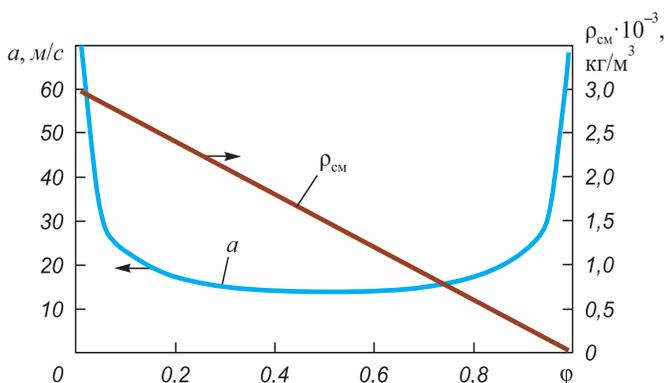


Рис. 2. Зависимость скорости звука в газошлаковой эмульсии и плотности смеси от газосодержания

Fig. 2. Change of sound speed in gas-slag emulsion and the mixture density from the gas content

Выводы. При реализации технологии нанесения защитного покрытия на футеровку конвертера с использованием вихревой раздувки шлакового расплава размер частиц шлака, выносимых из зоны взаимодействия, определяется скоростью газового потока и расходом газа. Снижение вязкости шлака способствует уменьшению минимального размера частиц. Реализация раздувки шлака в режиме «пробоя» способствует некоторому вспениванию шлакового расплава, снижению скорости шлаковых частиц, что отрицательно влияет на создание защитного гарнисажного слоя на футеровке конвертера.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Петракова Т.М., Иванова И.М. Итоги работы предприятий черной металлургии России за 9 мес. 2014 г. // Черная металлургия: бюл. НТИ. 2014. № 1. С. 3 – 16.
2. Лякишев Н.П., Шалимов А.Г. Сравнительная характеристика состояния кислородно-конвертерного производства стали в России и за рубежом. – М.: Элиз, 2000. – 64 с.
3. Айзатулов Р.С., Протопопов Е.В., Соколов В.В. и др. Совершенствование способов ремонта футеровки 160-т конвертера с применением нейтральных газов // Сталь. 1999. № 5. С. 39 – 43.
4. Нугуманов Р.Ф., Протопопов Е.В., Черныатеич А.Г., Галиуллин Т.Р. Новое направление в совершенствовании технологии нанесения шлакового гарнисажа на футеровку конвертеров // Изв. вуз. Черная металлургия. 2006. № 12. С. 7 – 12.
5. Явойский В.И., Явойский А.В., Сизов А.М. Применение пульсирующего дутья при производстве стали. – М.: Металлургия, 1985. – 176 с.
6. Теория турбулентных струй / Г.Н. Абрамович, Т.А. Гиршович, С.Ю. Крашенинников и др. – М.: Наука, 1984. – 716 с.
7. Гиршович Т.А., Леонов В.А. Влияние разности скоростей фаз на турбулентную структуру струи, несущей тяжелые примеси // ИФЖ. 1982. № 4. С. 541 – 548.
8. Гольдштик М.А. Вихревые потоки. – Новосибирск: Наука, 1981. – 367 с.
9. Гупта А., Лилли Д., Сайред Н. Закрученные потоки. – М.: Мир, 1987. – 588 с.
10. Кутателадзе С.С., Волчков Э.П., Терехов В.И. Аэродинамика и тепломассообмен в ограниченных вихревых потоках. – Новосибирск: АН СССР, 1987. – 282 с.
11. Фейлер С.В., Протопопов Е.В., Черныатеич А.Г. и др. Изучение особенностей применения вихревых течений для нанесения огнеупорных покрытий на футеровку конвертеров // Изв. вуз. Черная металлургия. 2014. № 8. С. 28 – 33.
12. Bagryantsev V.I., Nikolaev A.L., Poltoratskii L.M., Chevalkov A.V. Causes of breakdown of oxygen-powder lances // Steel in Translation. 1988. Vol. 18. No. 2. P. 59 – 61.
13. Баптизманский В.И., Меджибожский М.Я., Охотский В.Б. Конвертерные процессы производства стали. Теория, технология, конструкции агрегатов. – Киев, Донецк: Вища школа, 1984. – 343 с.
14. Багрянцев В.И., Волчков Э.П., Терехов В.И., Титков В.И. Исследование течения в вихревой камере лазерным доплеровским измерителем скорости // Препринт ИТФ СОАН СССР. – Новосибирск, 1980.
15. Кутателадзе С.С., Накоряков В.Е. Тепломассообмен и волны в газожидкостных системах. – Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1987. – 301 с.

Поступила 16 сентября 2015 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2015. VOL. 58. NO. 10, PP. 756–760.

APPLICATION OF VORTEX TECHNOLOGIES OF REFRACTORY COATING FORMATION FOR CONVERTER LINING. REPORT 1. FEATURES OF LIQUID SLAG CRUSHING AT BLOWING BY VORTEX TUYERE

A.N. Kalinogorskii¹, Postgraduate of the Chair of Ferrous Metallurgy

E.V. Protopopov¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Ferrous Metallurgy, Rector (protopopov@sibsiu.ru)

A.G. Chernyateich², Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Physical and Technical Problems in Steel Metallurgy

S.V. Feiler¹, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor, Head of the Chair of Ferrous Metallurgy

V.I. Bagryantsev¹, Cand. Sci. (Eng.), Head of the Experimental Laboratory of Automated Energy Generating Technologies

¹ Siberian State Industrial University (42, Kirov str., Novokuznetsk, Kemerovo Region, 654007, Russia)

² Institute of Ferrous Metallurgy of Ukrainian National Academy of Science (1, Ak. Starodubova sq., Dnepropetrovsk, 49050, Ukraine)

Abstract. The development of blowing devices with special designs including vortex lances for maximum spraying of molten slag is the promising way of increasing the efficiency of refractory coatings application for converter lining. The numerical simulation of liquid slag crushing has been carried out at different modes of blowing with vortex tuyeres with the use of the main conditions of the mechanics of gas-liquid systems. It has been found out that the particle sizes of the slag carried out of the in-

teraction zone are determined by the gas velocity and gas discharge. The decrease of slag viscosity characteristics helps to reduce the minimum size of the particles. When the slag blowing in the mode of “break”, slag melt foaming is possible, resulting in a decrease in the rate of slag particles and affects adversely the creation of skull on the converter lining.

Keywords: converter, vortex tuyere, jet velocity, liquid slag, crushing, drop size, blowing, refractory coating.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-10-756-760

REFERENCES

1. Petrakova T.M., Ivanova I.M. The work results of ferrous metal enterprises in Russia for the 9 months in 2014. *Chernaya metallurgiya: bull. NTI*. 2014, no. 1, pp. 6–9. (In Russ.).
2. Lyakishev N.P., Shalimov A.G. *Sravnitel'naya kharakteristika sostoyaniya kislorodno-konverternogo proizvodstva stali v Rossii i za rubezhom* [Comparative state characteristics of basic oxygen steel production in Russia and abroad]. Moscow: Eliz, 2000. 64 p. (In Russ.).
3. Aizatulov R.S., Protopopov E.V., Sokolov V.V., Komshukov V.P., Buimov V.A., Chernysheva N.A. Improvements of the ways to repair linings of a 160-tonne converter using neutral gases. *Stal'*. 1999, no. 5, pp. 39–43. (In Russ.).
4. Nugumanov R.F., Protopopov E.V., Chernyateich A.G., Galiullin T.R. New approaches in the improvement of slag scull coating technology on the converter lining. *Izvestiya VUZov. Chernaya met-*

- allurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2006, no. 12, pp. 7–12. (In Russ.).
5. Yavoiskii V.I., Yavoiskii A.V., Sizov A.M. *Primenenie pul'siruyushchego dut'ya pri proizvodstve stali* [Usage of pulsating blowing at steel producing]. Moscow: Metallurgiya, 1985. 176 p. (In Russ.).
 6. Abramovich G.N., Girshovich T.A., Krashennnikov S.Yu., Sekundov A.N., Smirnova I.P. *Teoriya turbulentnykh strui* [Theory of turbulent jets]. Moscow: Nauka, 1984. 716 p. (In Russ.).
 7. Girshovich T.A., Leonov V.A. Influence of phase differential velocity on turbulent jet structure, carrying heavy impurities. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*. 1982, no. 4, pp. 541–548. (In Russ.).
 8. Gol'dshtik M.A. *Vikhrevye potoki* [Vortex flows]. Novosibirsk: Nauka, 1981. 367 p. (In Russ.).
 9. Gupta A.K., Lilley D.G., Syred N. *Swirl flows*. Abacus Press, England, 1984, 475 p. (Russ.ed.: Gupta A., Lilley D., Syred N. *Zakruchennyye potoki*. Moscow: Mir, 1987. 588 p.).
 10. Kutateladze S.S., Volchkov E.P., Terekhov V.I. *Aerodinamika i teploobmen v ogranichennykh vikhrevykh potokakh* [Aerodynamics and heat-mass exchange in restricted vortex flows]. Novosibirsk: AN SSSR, 1987. 282 p. (In Russ.).
 11. Feiler S.V., Protopopov E.V., Chernyatevich A.G., Kalinogorskii A.N., Bagryantsev V.I. Study of the peculiarities of the usage of vortex flows for refractory coating on the converter lining. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2014, no. 8, pp. 28–33. (In Russ.).
 12. Bagryantsev V.I., Nikolaev A.L., Poltoratskii L.M., Chevalkov A.V. Causes of breakdown of oxygen-powder lances. *Steel in Translation*. 1988, Vol. 18, no. 2, pp. 59–61.
 13. Baptizmanskii V.I., Medzhibozhskii M.Ya., Okhotskii V.B. *Konverterskiye protsessy proizvodstva stali. Teoriya, tekhnologiya, konstruktivnyye agregaty* [Converter processes of steel production. Theory, technology, set constructions]. Kiev, Donetsk: Vishcha shkola, 1984. 343 p. (In Russ.).
 14. Bagryantsev V.I., Volchkov E.P., Terekhov V.I., Titkov V.I. *Issledovanie techeniya v vikhrevoi kamere lazernym dopplerovskim izmeritelem skorosti* [Researches of flows in a vortex chamber with laser Doppler velocimeter]. Novosibirsk, 1980. (In Russ.).
 15. Kutateladze S.S., Nakoryakov V.E. *Teplomassoobmen i volny v gazozhidkostnykh sistemakh* [Heat-mass exchange and waves in gas-liquid systems]. Novosibirsk: Nauka. Sibirskoe otdelenie, 1900. 301 p. (In Russ.).
- Acknowledgements.** The work was performed in SibSIU by the state task of Russian Ministry of Education and Science (project 2556).

Received September 16, 2015