

Оценка глубины проникновения газовой струи в жидкость на базе статистических моделей

Проведена оценка глубины проникновения газовой струи в жидкость для различных способов подвода дутья и предложена обобщённая статистическая модель глубины проникновения газовой струи, учитывающая способ подвода дутья и базирующаяся на полной силовой характеристике струи.

Ключевые слова: газовая струя, дутьё, силовая характеристика струи, безразмерный импульс, архимедовы силы

Постановка проблемы. В чёрной и цветной металлургии ряд технологических процессов базируется на продувке жидкости неизотермическими газовыми струями. Подача газа может осуществляться 3-мя основными способами: сверху, снизу и сбоку. При этом преследуются две противоположные цели, с одной стороны глубина проникновения должна быть как можно больше, что увеличивает контактную поверхность между струёй и жидкостью, а с другой – глубина проникновения ограничивается опасностью воздействия на огнеупорную футеровку либо возможностью пробоя ванны. Таким образом, вопросы, связанные с глубиной проникновения газовых струй в жидкость представляют большой практический интерес.

Анализ последних достижений в данной области. Исследованию вопросов, связанных с внедрением и распространением неизотермических газовых струй в жидкости, посвящено значительное количество экспериментальных и теоретических исследований [1-14], в большинстве из них основное внимание уделяется вопросам продувки сверху [1, 3-6], либо через днище [10-12].

Основная часть работ, посвящённых боковой продувке, связана с моделированием внедрения и распространения газовых струй во фьюминговых печах [2, 7-9, 13] цветной металлургии либо агрегата Romelt [14].

Постановка задачи. Целью данной работы была оценка глубины проникновения газовой струи в жидкость для различных способов подвода дутья и создание статистических моделей глубины проникновения газовой струи базирующихся на полной силовой характеристике струи.

Изложение основных материалов исследования. При проведении физического моделирования процесса продувки, в качестве моделирующих жидкостей, различными авторами был опробован достаточно широкий спектр жидкостей, с разнообразным набором физических свойств (масла, растворы солей, ртуть, вода), газов (воздух, кислород, перегретый водяной пар, водород, гелий, аммиак) и параметров продувки (различные скорости истечения, давления дутья, профили и диаметры сопел).

В таблице приведены уравнения для расчёта длины струи газа в жидкости по различным литературным данным.

Как видим, большинство исследований использовали при описании экспериментальных результатов число Архимеда. Использование этого критерия имеет ряд существенных недостатков и его недостаточно для полной силовой характеристики струи.

Критерием, позволяющим оперировать полной силовой характеристикой струи, является безразмерный импульс струи [1]:

$$L = \frac{l}{(i / \rho_{ж} g)^{0,333}}. \quad (1)$$

Для проведения сравнительного анализа были заданы одинаковые начальные условия продувки. Принято, что продувка ведётся через одно цилиндрическое сопло ($d_c = 3$ мм), давление дутья изменяется от 1 до 4 атм, продуваемая жидкость – вода, вдуваемый газ – кислород. Числа Архимеда были пересчитаны на импульс кислородной струи.

Затем, для уравнений, приведённых в таблице, было рассчитано изменение длины газовой струи в жидкости, при различных значениях комплекса $(i/\rho_{ж}g)^{1/3}$.

Полученные значения были объединены в группы, в соответствии со способом подвода дутья и для каждой из групп построены линии тренда.

Усреднённые значения длины газовой струи в жидкости, в зависимости от способа подвода дутья и комплекса $(i/\rho_{ж}g)^{1/3}$, приведены на рисунке.

Уравнения регрессии, описывающие усреднённые длины газовой струи в жидкости, в зависимости от способа подвода дутья и комплекса $(i/\rho_{ж}g)^{1/3}$, представлены ниже:

– для продувки сверху

$$L_{св} = 2,7488 (i / \rho_{ж} g)^{1/3} + 0,0427; R^2 = 0,9994; \quad (2)$$

– для продувки сбоку

$$L_{сб} = 3,5821 (i / \rho_{ж} g)^{1/3} + 0,0158; R^2 = 0,9979; \quad (3)$$

Длина струи газа в жидкости по различным литературным данным

Уравнение	Условия проведения экспериментов	Источник
продувка сверху		
$l = 3,25(i/\rho_{ж}g)^{0,333}, h_c = 0$	вода, раствор KJ, CCl ₄ , керосин, ртуть – воздух, гелий	[1]
$l = 0,5nAr d_c$	вода-воздух	[3]
$l = \sqrt{Ar} \cdot d_c, 10 < Ar < 1000$	вода-воздух	[4]
$l = 2,1 \left(\frac{Ar^{0,4}}{1 + \frac{1}{60} \frac{h_c}{d_c}} \right) d_c$	сталь-кислород	[5]
$l = 2,81Ar^{0,35} d_c, Ar \geq 50$	вода, уксусная кислота, глицерин-воздух	[6]
продувка горизонтальным соплом		
$l = 1,9Ar^{0,47} d_c$	вода-воздух	[7]
$l = 1,85Ar^{0,4} d_c, 50 \leq Ar \leq 10^5$	вода-воздух	[2,8]
$l = \left(1,261g \left(\frac{p_r}{p_{ж}} 10^3 \right) + 0,96 \right) Ar^{0,4} d_c$	вода, раствор ZnCl ₂ , раствор Туле, расплав Ni ₃ S ₂ , ртуть-аргон	[9]
$l = 1,7Ar^{0,5} d_c, Ar < 10$ (а) $l = 3,4 \cdot Ar^{0,3} d_c, Ar > 10$ (б)	вода-аммиак	[13]
$l = 3,6 (i/\rho_{ж}g)^{0,333}$	вода-воздух	[15]
продувка снизу		
$l = 3,23Ar^{0,376} d_c$	сталь-кислород	[10]
$l = 5,1 (i/\rho_{ж}g)^{0,333}$	раствор NaOH-CO ₂	[11]
$l = 4,15 \sqrt[3]{\frac{i}{\rho_{ж}g}} \cos \alpha$	сталь-кислород	[12]

Примечание: i – импульс газовой струи, Н; Ar – критерий Архимеда; d_c – диаметр сопла, м; g – ускорение силы тяжести, м/с²; $\rho_r, \rho_{ж}$ – плотность газа и жидкости, кг/м³; h_c – высота расположения сопла над поверхностью жидкости, м; n – коэффициент проникновения струи газа в жидкость

– для продувки снизу

$$L_{сн} = 4,3054(i/\rho_{ж}g)^{1/3} + 0,0241; R^2 = 0,9999. \quad (4)$$

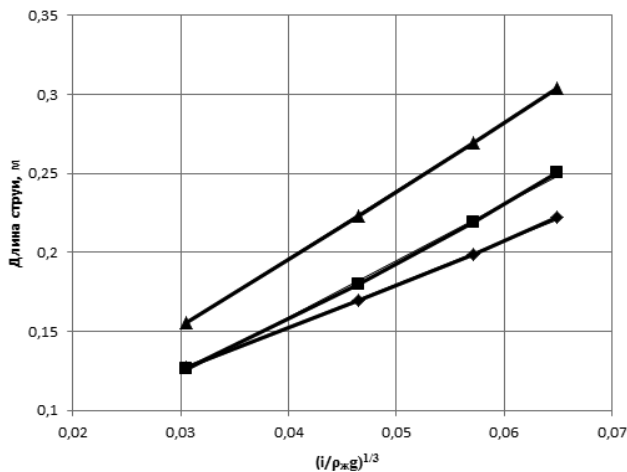
Изменение длины газовой струи в жидкости, для различных способов подвода дутья, происходит практически симбатно. Наложение значений длин струи для вертикальной и боковой продувки, при малых расходах газа, может быть связано с тем, что авторы различных исследований использовали различные методики для определения длины струи и при малых размерах струи это приводит к разночтению получаемых результатов. В целом же, учитывая симбатный характер изменения кривых и, сравнивая значения множителей перед комплексом $(i/\rho_{ж}g)^{1/3}$ в уравнениях (2-4), можно сказать, что при прочих равных условиях, решающих влияние на

длину газовой струи в жидкости оказывают, архимедовы силы. Соответственно, при продувке снизу они складываются с динамическим напором, при продувке сверху – вычитаются, а при боковом подводе дутья – действуют ортогонально. При этом влияние силы Архимеда на длину струи в жидкости, составляет 17-23 %.

Учитывая вышесказанное обобщённое статистическое уравнение, описывающее глубину проникновение газовой струи в жидкость с учётом способа поддачи дутья будет иметь вид:

$$L = (3,58 - 0,8 \cos \alpha) (i/\rho_{ж}g)^{1/3}, \quad (5)$$

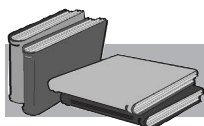
где α – угол наклона сопла к вертикали, град (при продувке сверху $\alpha = 0^\circ$, продувке снизу $\alpha = 180^\circ$).



Усреднённые значения длины газовой струи в жидкости в зависимости от способа подвода дутья и комплекса $(i/r_{жг})^{1/3}$; ◆ — продувка сверху, ■ — продувка сбоку, ▲ — продувка снизу

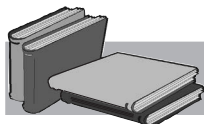
Выводы и перспективы исследований

Проведённый анализ влияния способа подачи дутья на глубину проникновения газовой струи в жидкость с использованием полной силовой характеристики струи показал, что при прочих равных условиях, решающее влияние на длину газовой струи в жидкости оказывают архимедовы силы. Влияние силы Архимеда на длину струи в жидкости, составляет 17-23 %. Исходя из полученных результатов, было предложено обобщённое уравнение, описывающее глубину проникновения газовой струи в жидкость с учётом способа подачи дутья.



ЛИТЕРАТУРА

1. Марков Б. Л. Методы продувки мартеновской ванны / Б. Л. Марков. - Москва: Metallurgia, 1975. - 280 с.
2. Изучение процесса истечения в жидкость газового потока из заглублённого сопла / И. П. Гинзбург, В. А. Сурин, А. А. Багаутдинов, А. С. Григорьянц, Л. И. Шуб // Инженерно-физический журнал. - 1977. - Т. 33. - № 2. - С. 213-223.
3. Казанцев И. Г. Исследование динамики газообразной струи втекающей в жидкость / И. Г. Казанцев // Термическая и пластическая обработка металлов: Сб. науч. тр. Ждановского металлургического института. В. 2. - Москва: Metallurgizdat, 1952. - С. 56-68.
4. Ефимов Л. М. Труды научно-технического общества чёрной металлургии: материалы всесоюзного совещания сталеплавателей, т. XVIII, ч. 1. / Л. М. Ефимов. - Москва: Metallurgia, 1957. - С. 40-57.
5. Баптизманский В. И. Размеры реакционной зоны при продувке металла кислородом сверху / В. И. Баптизманский, Г. А. Щедрин, К. С. Просвирин. - Москва: Изв. ВУЗов. Чёрная металлургия, 1975. - № 10. - С. 44-48.
6. Хмелевская Е. Д. Использование твёрдых топлив сернистых мазутов и газов / Е. Д. Хмелевская. - Москва: Наука, 1964. - С. 193-219.
7. Фролов В. А. Глубина проникновения газовой струи в жидкость при горизонтальном вдувании газа / Фролов В. А. // Москва: Изв. ВУЗов. Чёрная металлургия, 1967. - № 3. - С. 37-40.
8. Некоторые вопросы гидрогазодинамики и массообмена в процессах металлургии и химической технологии: сб. Гидроаэромеханика и теория упругости. В. 22. / И. П. Гинзбург, В. А. Сурин, А. М. Сизов и др. // Днепропетровск: ДГУ, 1977. - С. 3-17.
9. Слесивцев В. А. Взаимодействие газовой струи с плотными средами при боковой подаче дутья / В. А. Слесивцев, В. В. Мечев, Г. Б. Стрекаловский, А. В. Ванюков // Цветные металлы. - 1973. - № 2. - С. 12-14.
10. Баптизманский В. И. Взаимодействие газовых струй с жидким металлом в кислородных конвертерах донного дутья / В. И. Баптизманский, В. М. Трубакин, Б. М. Бойченко // Москва: Изв. ВУЗов. Чёрная металлургия. - 1980. - № 10. - С. 33-28.
11. Талдыкин И. А., Балакин В. В., Цыганкова В. П. Предотвращение пробоя конвертерной ванны при донном дутье // Там же. - 1989. - № 1. - С. 36-38.
12. Особенности взаимодействия донных кислородно-топливных струй с конвертерной ванной / Е. В. Протопопов, А. Г. Чернятевич, Д. А. Лаврик, Е. Л. Мастеровенко // Там же. - 2002. - № 10. - С. 14-17.
13. Гречко А. В. Практика физического моделирования на металлургическом заводе / А. В. Гречко, Р. Д. Нестеренко, Ю. А. Кудинов - Москва: Metallurgia, 1976. - 224 с.
14. Паниотов Ю. С. Гидродинамика ванны агрегата Ромелт: труды XII международной науч. техн. конференции «Теория и практика сталеплавиельных процессов» (Днепропетровск, 2006) / Ю. С. Паниотов, В. П. Иващенко, А. К. Тараканов, В. С. Мамешин, А. Н. Бутурлим. - С. 272-275.
15. Мамешин В. С. Удосконалення технології рідкофазного відновлення на основі дослідження гідродинаміки ванни методом холодного моделювання: Автореф. дис. к-та техн. наук: 05.16.02 / Національна металургійна академія України. - Дніпропетровськ, 2008. - 20 с.



REFERENCES

1. Markov B. L. (1975). Metody proizvodki martenovskoj vanny / B. L. Markov. – Moscow: Metallurgija, pp. 280. [in Russian].
2. Ginzburg I. P., Surin V. A., Bagautdinov A. A., Grigor'janc A. S., Shub L. I. (1977). Izuchenie processa istecheniya v zhidkost' gazovogo potoka iz zaglublennogo sopla. Minck: Inzhenerno-fizicheskij zhurnal, no 2, pp. 213-223. [in Russian].
3. Kazancev I. G. (1952). Issledovanie dinamiki gazoobraznoj strui vtekajushhej v zhidkost. Termicheskaja i plasticheskaja obrabotka metallov: Sb. nauch. tr. Zhdanovskogo metallurgicheskogo institute, – Moskva: Metallurgizdat, V. 2. pp. 56-68. [in Russian].
4. Efimov L. M. (1957). Trudy nauchno-tehnicheskogo obshhestva chornoj metallurgii: materialy vsesojuznogo soveshhanija staleplavil'shnikov, t. XVIII, ch. 1. Moscow: Metallurgija, pp. 40-57. [in Russian].
5. Baptizmanskij V. I., Shhedrin G. A., Prosvirin K. S. (1975). Razmery reakcionnoj zony pri proizvodke metalla kislorodom sverhu. Moscow: Izv. VUZov. Chjornaja metallurgija, no 10, pp. 44-48. [in Russian].
6. Hmelevskaja E. D. (1964). Ispol'zovanie tvjordyh topliv sernistyh mazutov i gazov. Moscow: Nauka, pp. 193-219. [in Russian].
7. Frolov V. A. (1967). Glubina proniknovenija gazovoj strui v zhidkost' pri gorizontaln'nom vduvanii gaza. Moscow: Izv. VUZov. Chjornaja metallurgija, no 3, pp. 37-40. [in Russian].
8. Ginzburg I. P., Surin V. A., Sizov A. M. et al. (1977). Nekotorye voprosy gidrogazodinamiki i massoobmena v processah metallurgii i himicheskoi tehnologii: sb. Hidroajeromehanika i teorija uprugosti. V. 22. Dnepropetrovsk: DGU, pp. 3-17. [in Russian].
9. Spesivcev V. A., Mechev V. V., Strekalovskij G. B., Vanjukov A. V. (1973). Vzaimodejstvie gazovoj strui s plotnymi sredami pri bokovoj podache dut'ja. Moscow: Cvetnye metally, no 2, pp. 12-14. [in Russian].
10. Baptizmanskij V. I., Trubavin V. M., Bojchenko B. M. (1980). Vzaimodejstvie gazovyh struj s zhidkim metallom v kislorodnyh konverterah donnogo dut'ja. Moscow: Izv. VUZov. Chiornaia metallurgija, no 10, pp. 33-28. [in Russian].
11. Taldykin I. A., Balakin V. V., Cygankova V. P. (1989). Predotvrashhenie proboja konverternoj vanny pri donnom dut'e. no 1, pp. 36-38. [in Russian].
12. Protopopov E. V., Chernjatevich A. G., Lavrik, E. L. Masterovenko D. A. (2002). Osobennosti vzaimodejstvija donnyh kislorodno-toplivnyh struj s konverternoj vannoy. Moscow: Izv. VUZov. Chiornaia metallurgija, no 10, pp. 14-17. [in Russian].
13. Grechko A. V., Nesterenko R. D., Kudinov Ju. A. (1976). Praktika fizicheskogo modelirovanija na metallurgicheskome zavode. Moscow: Metallurgija, pp. 224. [in Russian].
14. Paniotov Ju. S., Ivashhenko V. P., Tarakanov A. K., Mameshin V. S., Buturlim A. N. (2006). Gidrodinamika vanny agregata Romelt: trudy XII mezhdunarodnoj nauchn. tehn. konferencii «Teorija i praktika staleplavil'nyh processov» (Dnepropetrovsk, 2006). Dnepropetrovsk. [in Russian].
15. Mameshin V. S. (2008). Udoskonalennja tehnologii ridkofaznogo vidnovlennja na osnovi doslidzhennja gidrodinamiki vanni metodom holodnogo modeljuvannja: Avtoref. dis. k-ta tehn. nauk: 05.16.02 / Nacional'na metalurgijna akademija Ukraïni. – Dnipropetrovsk. [in Russian].

Анотація

Паніотов Ю. С., Мамешин В. С., Журавльова С. В.

Оцінка глибини проникнення газового струменя у рідину на базі статистичних моделей

Проведено оцінку глибини проникнення газового струменя в рідину для різних способів підведення дуття та запропонована узагальнена статистична модель глибини проникнення газового струменя, що враховує спосіб підведення дуття, який базується на повній силовій характеристиці струменя.

Ключові слова

газовий струмінь, дуття, силова характеристика струменя, безрозмірний імпульс, архімедові сили

Summary

Paniotov U., Mameshin V., Zhuravleva S.

Estimation of the penetration depth of a gas jet in liquid on the basis of statistical models

The estimation of the penetration depth of the gas jet into liquid for different methods of blowing was carried out and the generalized statistical model of the penetration depth of the gas jet, considering the method of blowing and based on the full jet power characteristic was proposed.

Keywords

gas jet, blowing, the jet power characteristics, the dimensionless momentum, Archimedean force

Поступила 28.04.2016