

УДК 681.3

Т.А. Рузова, канд. техн. наук,
 А.П. Толстопят, канд. техн. наук, ст. научн. сотр,
 Л.А. Флеер

Днепропетровский национальный университет
 им. О. Гончара, г. Днепропетровск, Украина,
 e-mail: ruzov1973@bk.ru

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГАЗОЖИДКОСТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРИ ДУТЬЕ ПОГРУЖНЫМИ ФУРМАМИ

Т.А. Ruzova, Cand. Sci. (Tech.),
 А.Р. Tolstopyat, Cand. Sci. (Tech.),
 Senior Research Fellow,
 L.A. Fleyer

O. Gonchar Dnepropetrovsk National University,
 Dnipropetrovsk, Ukraine, e-mail: ruzov1973@bk.ru

EFFICIENCY OF GAS-LIQUID INTERACTION AT IMMERSIBLE TUYER BLOWING

Газожидкостное взаимодействие является одним из основных в ряде технологических процессов.

Цель. Определение наиболее эффективного дутьевого фурменного устройства, обеспечивающего более развитую межфазовую поверхность в системе „газ-жидкость“ при наиболее спокойной ванне.

Методика. Экспериментальное исследование газожидкостного взаимодействия проводилось на прозрачной модели технологического аппарата. Модельная жидкость – вода, модельный газ – воздух (расход – 0,4 ÷ 2,0 м³/ч). Дутьевое устройство с V-наконечником (угол 90° между соплами наконечника фурмы) и одиночное (угол отклонения сопла наконечника 45° от оси фурмы) погружено в жидкость. Регистрация процесса велась на видеокамеру (VPC-HD1000 с затвором ~ 1/10000с, 60 кадр/сек) в проходящем свете. Полученный видеоматериал обрабатывался на компьютере, в результате чего были определены аналоги газосодержания, фазовой поверхности и коэффициенты неравномерности распределения этих параметров в диаметральном сечении аппарата. Видеосъемка также дала прямую регистрацию высоты всплесков жидкости на поверхности ванны.

Научная новизна. Проведено экспериментальное исследование по определению эффективности различных конструкций погружных дутьевых устройств и их положения (пристеночное и осевое положение одиночной фурмы и фурмы с V-наконечником) в технологическом аппарате.

Результаты. На основании анализа статистической обработки видеоизображений процесса установлено, что фурма с V-наконечником и фурма, смещенная от оси ковша, к его стенке, имеют заметное преимущество в сравнении с одиночной фурмой, установленной на оси ковша по большей части измеренных параметров видеоизображения, но фурма смещенная от оси несколько уступает фурме с V-наконечником.

Выявлены экстремальные всплески жидкости на поверхности ванны ($Q_{г} > 1,3 \text{ м}^3/\text{ч}$), которые наиболее выражены при центральной установке одиночной фурмы.

Практическая значимость. Результаты исследований применяются при разработке схем внепечной обработки металла в чугуновозных ковшах.

Ключевые слова: дутье в жидкость, обработка видеоизображения, фурма, газораспределение, всплески поверхности жидкости, осевая установка фурмы, пристеночная установка фурмы

Введение. Дутье газа в жидкость широко используется различными технологическими процессами в отраслях промышленности: в горнорудной– флотация, в металлургии – конвертерная выплавка стали и внепечная обработка металла в ковшах, в химической промышленности – реакторы различного назначения. В металлургии внепечная обработка давно стала в один ряд с основными металлургическими процессами. Последнее связано с тем, что включение внепечной обработки в цепочку металлургических переделов позволило как снизить удельные энергозатраты на тонну продукции, так и добиться более высокого качества металла в конце технологической цепочки. Вместе с тем ковшевая обработка металла, в свою

очередь, выдвигает ряд вопросов по повышению эффективности, которые требуют проведения исследований.

Постановка задачи. К одному из таких вопросов относится дутье газа в жидкость в ковше погружным дутьевым устройством (фурмой). В общем случае задачей такого дутья является введение в жидкость (в металл) различного рода дисперсных присадок, обеспечивающих получение металла требуемого качества (удаление серы, фосфора и т.п.), при одновременном повышении эффективности использования вдуваемых реагентов (высокая стоимость) и минимизации расхода дутьевого газа – носителя (переохлаждение металла в ковше).

Методы решения. Описание экспериментального стенда. Для решения этих задач нами были

проведені експериментальні дослідження по порівнянню ефективності газового дуття фурменними пристроями різної конструкції і при різному положенні їх в ковше.

Експерименти проводились на прозорій моделі чугуновозного ковша (рис.1) $D = 330$ мм, запов-

неною водою ($H_v = 300$ мм). Досліджувалися три варіанта фурм, два з яких відрізнялися конструкцією трубки – поглибленим кінцем. Трубка (фурма) з зовнішнім діаметром $d_H = 6$ мм встановлювалася по осі сосуда. Варіювалися параметри наконечника фурми (сопла).

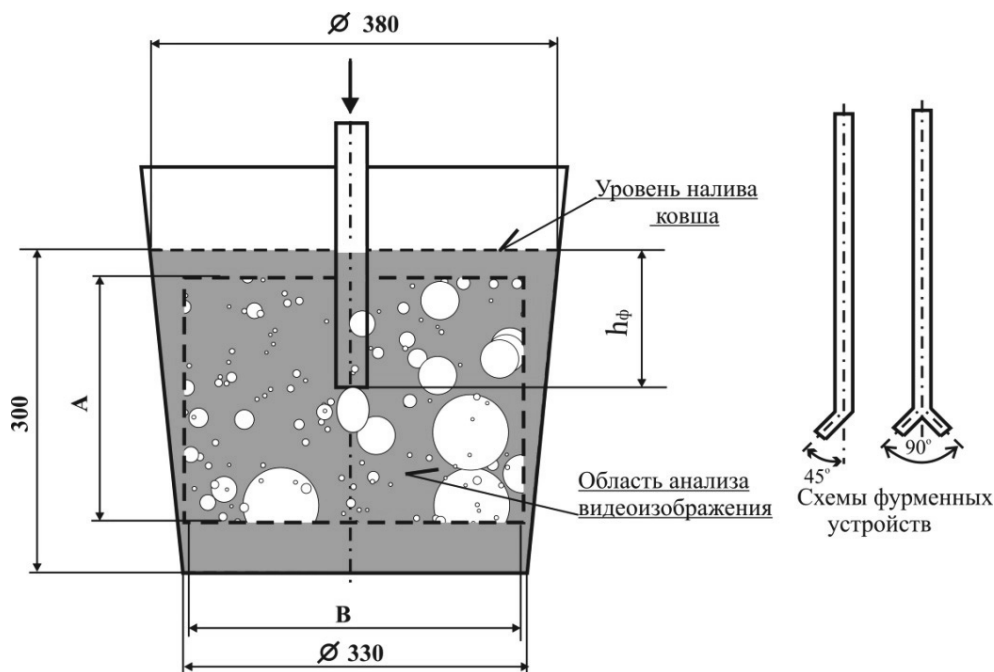


Рис.1. Схема експериментальної установки

Рабочим газом служив повітря, подаваний через фурму, заглиблену під зеркало рідини на величину $h_\phi = 200$ мм. Расход газу в ході експериментів змінювався в діапазоні $0,4\text{--}2,0$ м³/ч. В вказаному інтервалі расхода газу (Q_f) задавалися 8–10 значень (приблизно з рівним кроком) цієї величини, при яких досліджувалося відеоіображення процесу газорідинного взаємодіяння.

В першому варіанті конструкції наконечник являвся продовженням трубки з внутрішнім діаметром $d = 1,4$ мм і мав кут відхилення 45° від осі трубки. Во другому – представляв собою V-образний насадок, виконаний з двох патрубків $d = 1,0$ мм. Таким чином, площа одиночного сопла першого наконечника була рівна сумарній площі двох сопел V-образного насадка. Кут розв'язку між осями патрубків V-образного насадка становив 90° , а площина розв'язку кута збігалася з діаметральною площиною циліндричного сосуда.

Третій варіант складав в тому, що конструкція першого варіанта з тим же заглибленням – 200 мм, була переміщена в діаметральному плоскості сосуда к його стінці (120 мм від осі).

Основним інструментом нинішньої роботи являється комп'ютерна обробка відеоіображення [1, 2], що складає в виділенні на відеоіображенні досліджуваного режиму газорідинного взаємодіяння

оптичних неоднорідностей і їх оцифруванні для подальшого аналізу.

Відеозапис велася на цифрову відеокамеру VPC-HD1000 з затвором $\sim 1/10000$, 60 кадр/сек в проходять світлі – джерело світла, модель ковша і об'єктив камери розміщалися на одній осі.

Відеозапис кожного режиму процесу проводилася в теченні 10 сек, за які реєструвалося 600 кадрів процесу.

Отримані матеріали по кожному з режимів далі піддавалися комп'ютерній обробці спеціально розробленою програмою аналізу відеоіображень. Як відзначалося в [2], особливістю методу комп'ютерної обробки відеоіображення являється дослідження об'ємної картини як її проєкції на діаметральну площину досліджуваної моделі.

Обробка відеоіображень. Метою обробки зображень являється отримання розподілів площей (газосодержання S_f) і периметрів (фазової поверхні P_f) бульбашок по діаметру ковша. Величини S_f і P_f віднесені до площі виділеного прямокутника (об'єму ковша) – області обробки відеоіображення, причому газосодержання визначено в процентах цієї площі, а фазова поверхня – як довжина контура бульбашок на одиницю цієї площі.

На рис. 2 представлені фотографії процесу дуття при заглибленому положенні фурми при різних варіантах виконання наконечника. Видно, що при однаковому расходе дутья і центральному положенні фурми диспергація газу в об'ємі моде-

ли при V-образному насадці в 1,5–2 рази вище, ніж в разі одиночного сопла. При всій тривіальності цього висновку кількісну оцінку тут дозволяє дати лише комп'ютерна обробка відеоізоображень.

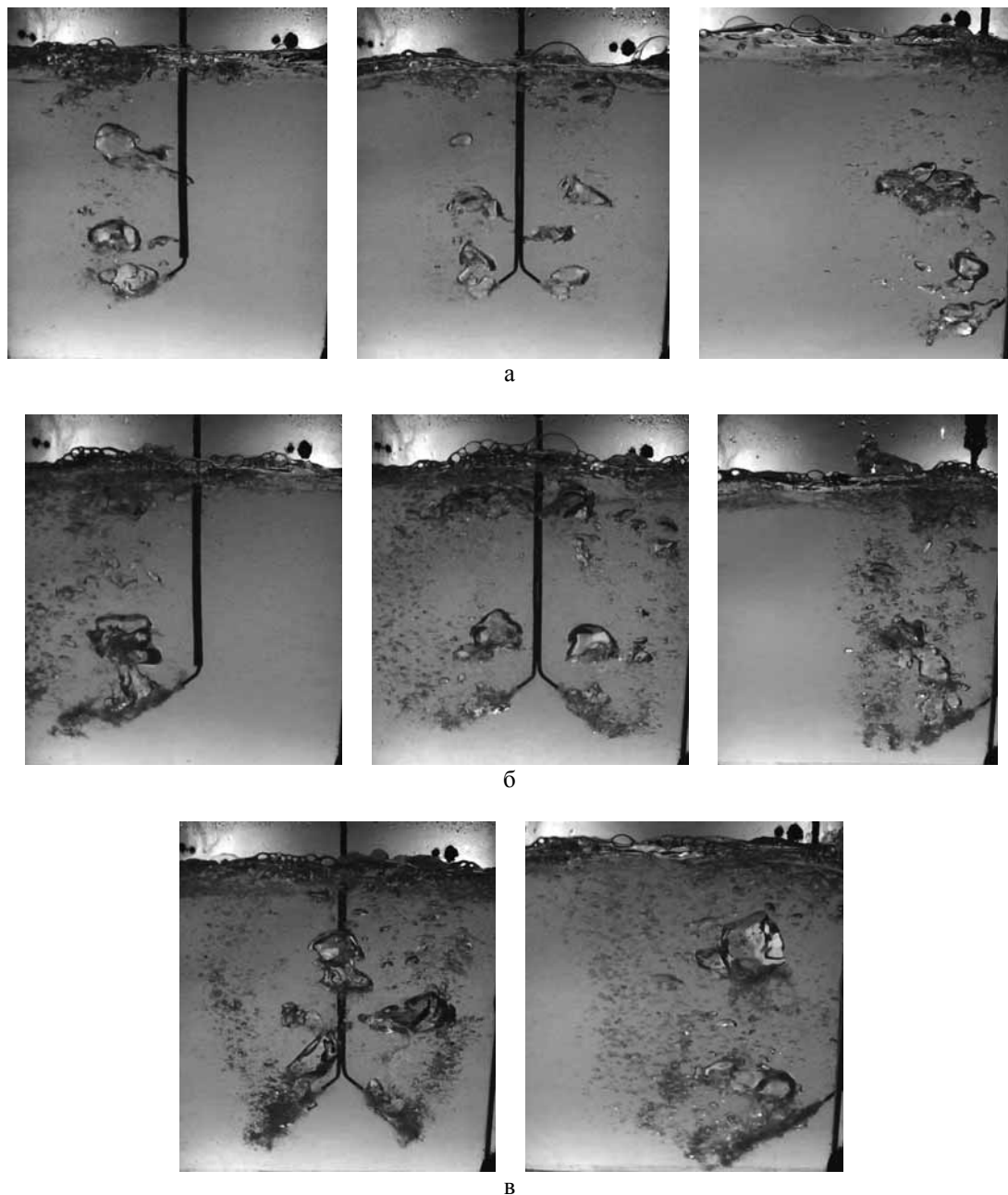


Рис. 2. Фотографії різних режимів і схем дуття: а – $Q_{Г} = 0,8 \text{ м}^3/\text{ч}$; б – $Q_{Г} = 1,5 \text{ м}^3/\text{ч}$; в – $Q_{Г} = 1,8 \text{ м}^3/\text{ч}$

На рис. 3 і рис. 4 представлені результати цієї обробки. Видно, що величина $S_{Г}$ (рис. 3) в усьому діапазоні зміни $Q_{Г}$ при V-образному насадці суттєво вище відповідної величини для одиночного сопла, встановленого на осі ковша, і, практично, збігається з нею в разі зміщення

фурми до стінки ковша. По величині нерівномірності газосодержання ($K_{Г}$) V-наконечник переважає два інших варіанта (величина нерівномірності менше) і лише при $Q_{Г} \geq 1,8 \text{ м}^3/\text{ч}$ (присіночний варіант положення фурми) досягає такого ж невеликого значення $K_{Г}$.

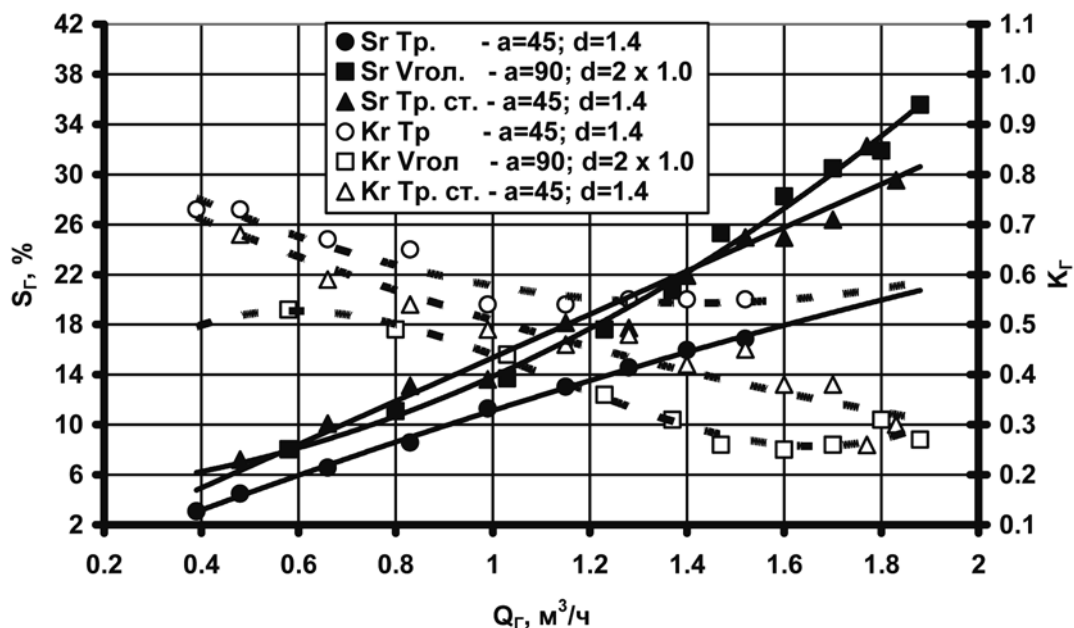


Рис. 3. Параметры газосодержания: S_r – газосодержание, Q_r – расход газа, K_r – коэффициент неравномерности газосодержания

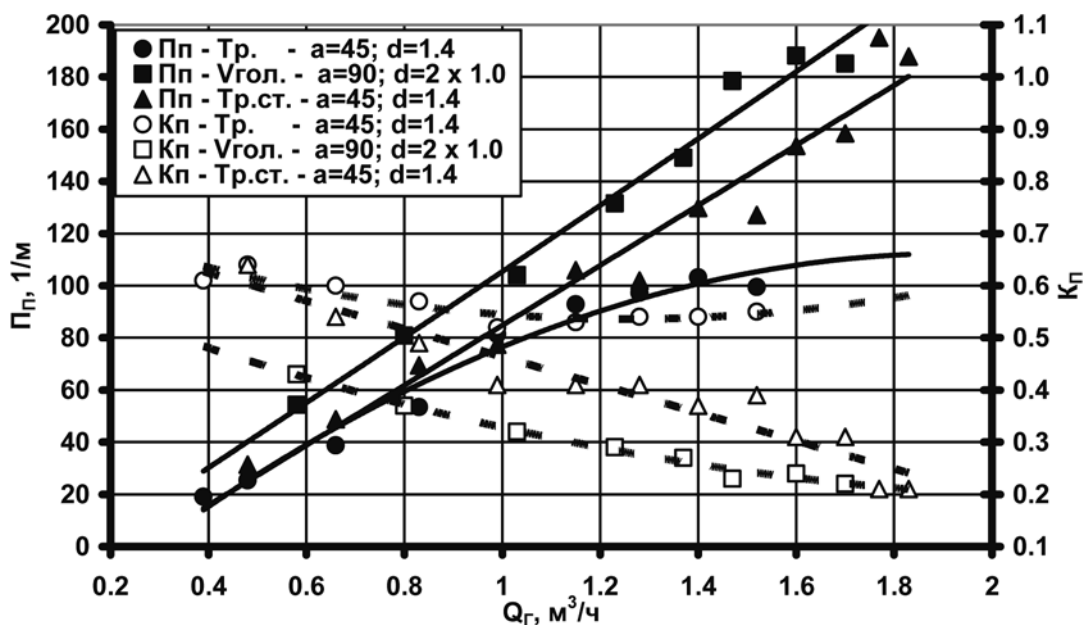


Рис. 4. Параметры фазовой поверхности: $П_p$ – фазовая поверхность; Q_r – расход газа; K_p – коэффициент неравномерности фазовой поверхности

Здесь K_p – интегральная величина неравномерности распределения параметра (газораспределение, фазовая поверхность) определена как

$$K_p = \frac{p_c - p}{p_c}, \text{ при } p < p_c,$$

где p_c – среднее значение параметра.

Величина K_p является характеристическим параметром данной конструкции фурмы – режима ее работы, и численно определяет качество ведения процесса или эффективность работы фурменного

устройства. При $K_p \rightarrow 0$ достигается наибольшая равномерность распределения параметра.

Следует отметить, что при центральном положении одиночной фурмы величина K_r в принципе не может быть меньше 0,5 вне зависимости от режима дутья, что видно на рис. 3 и рис. 4. В то же время два других варианта показывают снижения K_r с ростом расхода дутья (Q_r).

Рис. 4 дает представление о характере изменения фазовой поверхности при газожидкостном взаимодействии. Если рис. 3 не показывает заметного превосходства V-наконечника по величине S_r , то на

рис. 4 видно, що величина Π_{II} суттєво вище, ніж для пристеночного положення фурми і тем більше вище, ніж при центральній установці останньої.

На рис. 2 приведені також фотографії режиму $Q_G = 1,8 \text{ м}^3/\text{час}$ для V-наконечника і пристеночного положення фурми для наглядного представлення о характері процесу, оскільки по результатам обробки (рис. 3 і рис. 4) вимірювані параметри ($S_G, \Pi_{II}, K_G, K_{II}$) тут близькі. Останнє можна віднести, ймовірно, за рахунок структури течія рідини в ковше, яка сприяє ефективній диспергації газу при заглибленому дутті.

На рис. 5 дано порівняння одиночної фурми і V-наконечника в безрозмірних комплексах, де

$$S'_G = S_{G-V} / S_{G-TP}; \Pi'_{II} = \Pi_{II-V} / \Pi_{II-TP}.$$

Здесь S_{G-V} – газосодержание при работе V-наконечника; S_{G-TP} – газосодержание при работе одиночного сопла; Π_{II-V} – периметры газовых образований при работе V-наконечника; Π_{II-TP} – периметры газовых образований при работе одиночного сопла.

На рис. 6 дано сравнение указанных вариантов по оценке величины фазовой поверхности (Φ) двумя методами:

$$\begin{aligned} \text{по } S_G \quad \Phi_G &= S_{G-V} / S_{G-TP}, \\ \text{по } \Pi_{II} \quad \Phi_{II} &= (\Pi_{II-V} / \Pi_{II-TP})^2. \end{aligned}$$

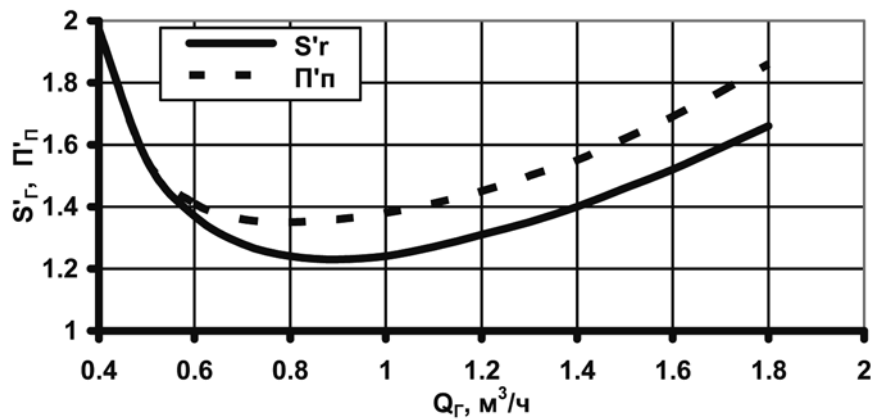


Рис. 5. Сравнение эффективности заглибленого дуття: S'_G – параметр сравнения газосодержания фурм, Π'_{II} – параметр сравнения фазовой поверхности фурм

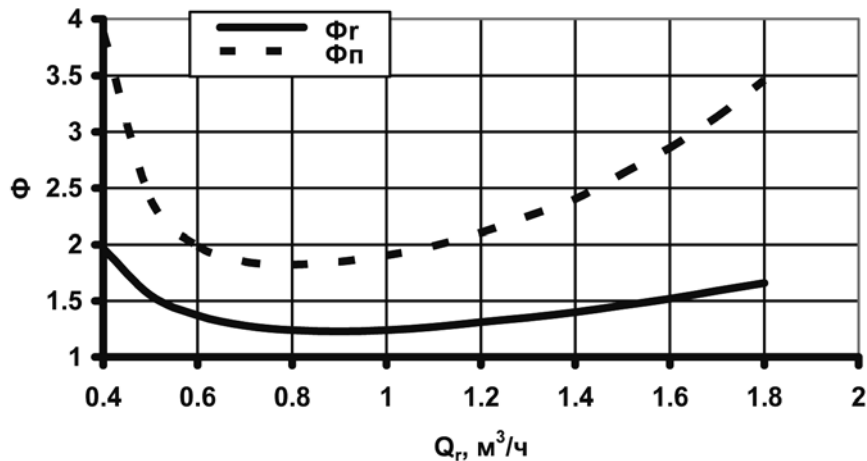


Рис. 6. Изменение поверхности раздела фаз: Φ_G – по газосодержанию; Φ_{II} – по периметрам

Видно, что эффективность V-наконечника зависит от режима дуття и может в 1,5–3,0 раза быть выше, чем одиночного сопла.

Еще одним параметром, характеризующим работу фурменного устройства, является величина всплеска жидкости над зеркалом в ковше.

На рис. 7 даны наибольшие величины всплеска L_{BM} , зарегистрированные за время выдержки (600 с)

заданного значения параметра Q_G . Видно, что V-наконечник дает наименьшие величины L_{BM} во всем диапазоне расходов дуття. Это объясняется тем, что величины всплеска определяются величиной выходящего на поверхность жидкости пузыря. Величина последнего тем больше, чем больше диаметр сопла и расход дуття через сопло (при примерно постоянной частоте их отрыва $\sim 10 \text{ Гц}$). Поскольку диаметр каж-

дого из сопел V-наконечника меньше одиночного сопла, а расход дутья на каждое из сопел в 2 раза меньше, чем через одиночное сопло, то, соответственно этому, имеет место и меньший всплеск при работе V-наконечника.

Интересно, что в случае смещенного к стенке сопла имеем L_{BM} меньше, чем при его центральной установке, что объясняется большей степенью дисперсии газа в объеме жидкости (рис. 2) за счет измененной структуры течения в ковше.

Следует также отметить, что при сравнительно больших расходах дутья ($Q_{Г} > 1,3 \text{ м}^3/\text{ч}$) наблюдаются экстремальные всплески жидкости, которые в 2–3 раза больше наиболее вероятных значений этой величины и зависят от конструкции фурмы и положения ее в ковше.

На рис. 8 даны наиболее вероятные значения всплеска в ковше (L_{BW}). Видно, что они в 2–3 раза меньше максимальных и практически одинаковы для исследованных вариантов заглубленного дутья.

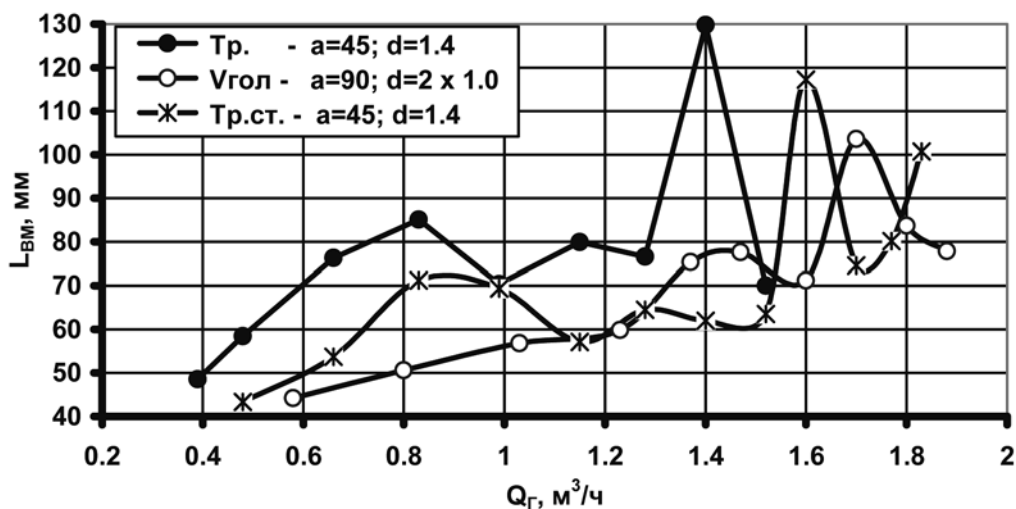


Рис. 7. Сравнение эффективности дутья по наибольшей величине всплеска: L_{BM} – выплеск максимальный

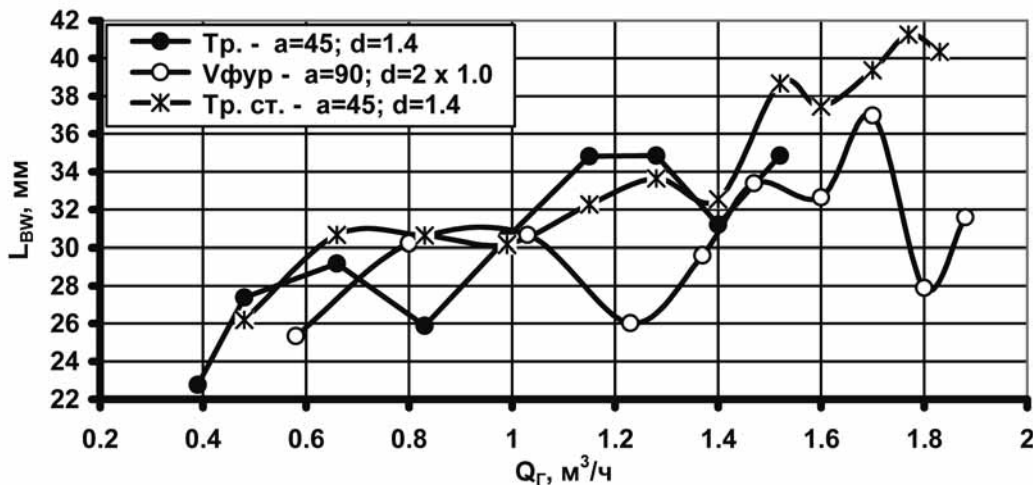


Рис. 8. Сравнение эффективности дутья по наиболее вероятной величине всплеска: L_{BW} – всплеск вероятный

Выводы. Авторами проведено экспериментальное исследование эффективности заглубленного дутья в жидкость в ковше при различных конструкциях дутьевого устройства и положении его в ковше. На основании анализа статистической обработки видеозаписей процесса установлено:

– фурма с V-наконечником имеет заметное преимущество (по большей части измеренных параметров видеозаписи – $S_{Г}$, $P_{П}$, $K_{Г}$, $K_{В}$, Φ , L_{BM}) в

сравнении с одиночной фурмой, установленной на оси ковша;

– фурма, смещенная от оси ковша к его стенке, несколько уступает фурме с V-наконечником, но имеет лучшие показатели, чем установленная по оси сосуда;

– выявлены экстремальные всплески на поверхности ванны ($Q_{Г} > 1,3$), которые наиболее выражены при центральной установке одиночной фурмы.

Список літератури / References

1. Компьютерная обработка видеоизображений газовых пузырей в жидкости / [Рузова Т.А., Елисейев В.И., Толстопят А.П. и др.] // Оптические методы исследования потоков: труды IX международной научно-технической конференции. – М., 2007. – С. 48–49.

Ruzova, T.A., Yeliseyev, V.I., Tolstopyat, A.P. and Fleyer, L.A. (2007), "Computer processing videoimages gas bubbles in liquid", *papers of the 9th international scientific and technical conference "Optical methods of flow investigation"*, Moscow, pp. 48–49.

2. Компьютерная обработка кинограмм процесса взаимодействия газовых струй с жидкостью / [Рузова Т.А., Толстопят А.П., Шевченко А.Ф. и др.] // Научный вестник Национального горничого университета. – Дніпропетровськ, 2007. – №12. – С. 91–96

Ruzova, T.A., Tolstopyat, A.P., Shevchenko, A.F., Shevchenko, S.A. (2007), "Computer processing of interaction between gas jets and liquid", *Naukoviy visnyk Natzionalnoho hirnychoho universytetu*, Dnipropetrovsk, no. 12, pp. 91–96.

Газорідинна взаємодія є однією з основних у ряді технологічних процесів.

Мета. Визначення найбільш ефективного дуттьового фурменого пристрою, що забезпечує більш розвинену міжфазову поверхню в системі „газ-рідина“ при найбільш спокійній ванні.

Методика. Експериментальне дослідження газорідинної взаємодії буде проведено на прозорій моделі технологічного апарату. Модельна рідина – вода, модельний газ – повітря (витрата – $0,4 \div 2,0 \text{ м}^3/\text{год}$). Дуттьовий пристрій з V-наконечником (кут 90° між соплами наконечника фурми) і одиночний (кут відхилення сопла наконечника 45° від осі фурми) занурено в рідину. Реєстрація процесу велася на відеокамеру (VPC-HD1000 із затвором $\sim 1/10000 \text{ с}$ і частотою $1/60 \text{ кадр/сек}$) у прохідному світлі. Отриманий відеоматеріал оброблявся на комп'ютері, у результаті чого було визначено аналоги газомісту, фазової поверхні й коефіцієнти нерівномірності розподілу цих параметрів у діаметральному перетині апарату. Відеозйомка також дала пряму реєстрацію висоти сплесків рідини на поверхні ванни.

Результати. На підставі аналізу статистичної обробки відеозображень процесу встановлено, що фурма з V-наконечником і фурма, зміщена від осі ковша до його стінки, мають помітну перевагу в порівнянні з одиночною фурмою, встановленою на осі ковша по більшій частині обмірюваних параметрів відеозображення, але фурма зміщена від осі трохи уступає фурмі з V-наконечником.

Виявлено екстремальні сплески рідини на поверхні ванни ($Q_g > 1,3 \text{ м}^3/\text{год}$), що найбільш виражені при центральному встановленні одиночної фурми.

Наукова новизна. Проведено експериментальне дослідження з визначення ефективності різних конструкцій заглиблених дуттьових пристроїв і їх положення (пристінкове й осьове положення одиночної фурми й фурми з V-наконечником) у технологічному апараті.

Практична значимість. Результати досліджень застосовуються при розробці схем позапічної обробки металу в чавуновозних ковшах.

Ключові слова: дуття в рідину, обробка відеозображення, фурма, газорозподіл, сплески поверхні рідини, осьове встановлення фурми, пристінкове встановлення фурми

Interaction between liquid and gas is basic in wide range of technological processes.

Purpose. To determine the most efficient blowing tuyere unit to provide the more developed interphase surface in gas-liquid system at the most quiet bath.

Methodology. We have done the experimental investigation of liquid-gas interaction at the transparent model of technological unit. Water acted as model liquid, and air acted as model gas (consumption – $0.4 \div 2.0 \text{ m}^3/\text{h}$). Blowing V-tip unit (angle between tuyere tip nozzles is 90°) and the single one (deviation angle of tip's nozzle from tuyere axe is 45°) are submerged in liquid. Process recording has been realized by camcorder (VPC-HD1000, shutter speed $\sim 1/10000$, 60 fps) in transmitted light. Obtained video has been processed on computer to determine gas content and phase surface analogs and irregularity factor of their distribution in diametrical cross-section of the unit. Direct recording of liquid spatter height at the bath surface has been done by video filming.

Findings. On the ground of statistical treatment analysis of the process video-images we have determined that V-tip tuyere and tuyere shifted from ladle axe to its wall have significant advantage in comparison with the single tuyere placed at the ladle axe according to the majority of measured parameters of video-images. But the tuyere shifted from ladle axe appears worse than V-tip one.

We have detected extreme liquid splatters on the bath surface ($Q_g > 1.3 \text{ m}^3/\text{h}$), which appear when the single tuyere has central position.

Originality. We have carried out the experimental investigation to determine efficiency of blowing units of different construction and position (near-wall and axial position of the single tuyere and V-tip tuyere) in technological unit.

Practical value. Investigation results are used at developing schemes of out-of-furnace metal working in hot-metal ladle cars.

Keywords: blowing in liquid, video-image processing, tuyere, gas distribution, spatter on liquid surface, axial tuyere position, near-wall tuyere position

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук В.І. Корсунюм. Дата надходження рукопису 23.04.12.