

мальная величина кусков отходов пенополистирола для термокомпактирования (20×20×20 мм), а также оптимальная температура термокомпактирования, обеспечивающая оптимально-максимальное уменьшение объема кусочков отходов пенополистирола (140 °С). Обоснован выбор продолжительности термокомпактирования (5 мин) с целью обеспечения оптимальной усадки в зависимости от указанной температуры и размера исходных кусков отходов пенополистирола.

Необходимо отметить, что термокомпактирование отходов пенополистирола может быть выделено в отдельное производство. Его продукция – термокомпактированный пенополистирол с частицами заданного размера. Этот материал может быть успешно использован в технологических процессах в качестве связующего при получении композиционных материалов для изготовления изделий широкой номенклатуры.



### Список литературы

1. Пат 9003 Україна. Застосування живичного скипидару як розчинника для відходів пінополістиролу // О. Й. Шинський, Є. В. Терліковський, А. О. Стрюченко та інш. – Надр. 15.09.2005, Бюл. № 9.
2. Винахід № 77338 Україна, В22С9/10. Полістирольне зв'язуюче для виготовлення ливарних форм та стержнів / О. Й. Шинський, В. Л. Найдек, А. О. Стрюченко та інш. – Надр. 15.11.2006.
3. Recykling polistyrenu piankowego / O. Szinskiy, W. Doroszenko, A. Striyczenko, Y. Ladarieva // "Recykling", miesiecznik odolnopolski. – 2008. – № 1 (85). – С. 28-29.
4. Винахід № 89977 Україна, С08J3/18. Спосіб одержання пластифікованого полістиролу з відходів пінополістиролу / О. Й. Шинський, В. Л. Найдек, А. О. Стрюченко, І. О. Шинський. – Надр. 25.03.2010.
5. Винахід № 77105 Україна, В22С9/10. Суміш для ливарних форм та стержнів / О. І. Шинський, В. Л. Найдек, А. О. Стрюченко, І. О. Шинський та інш. – Надр. 16.10.2006.
6. А. с. № 88670 Україна, В22С9/10. Спосіб одержання формувальних сумішей із зв'язуючим з відходів пінополістиролу / О. Й. Шинський, В. Л. Найдек, А. О. Стрюченко, І. О. Шинський. – Надр. 10.11.2009.
7. Тагер А. А. Физико-химия полимеров. – М.: Химия, 1978. – 544 с.
8. Шуляк В. С. Литье по газифицированным моделям. – Киев: Ин-т пробл. литья АН УССР, 1979. – С. 130-135.

Поступила 01.06.2010

УДК 669.162.221:62-541.4:62-404

**В. П. Лихошва, Е. А. Рейнталь, Л. А. Бондарь,  
А. Н. Тимошенко, Л. Е. Угрин\***

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

\*Институт предпринимательства и перспективных технологий, Львов

## **ВОЗДЕЙСТВИЕ ГАЗОВЫХ ПОТОКОВ, ПОДАВАЕМЫХ С ПОМОЩЬЮ ФУРМЫ, НА ЖИДКИЕ СРЕДЫ**

*Исследованы процессы взаимодействия газовых потоков, подаваемых с помощью фурмы, с жидкими средами. Проведено сравнение результатов экспериментальных исследований*

*и математического моделирования. Соответствие расчетных и экспериментальных данных позволяет адекватно анализировать гидродинамическое состояние зоны взаимодействия.*

**Ключевые слова:** жидкая среда, газовый поток, фурма, каверна, турбулентность кинетической энергии.

*Досліджено процеси взаємодії газових потоків, що подаються з застосуванням фурми, з рідкими середовищами. Проведено порівняння результатів експериментальних досліджень і математичного моделювання. Відповідність розрахункових і експериментальних даних дозволяє адекватно аналізувати гідродинамічний стан зони взаємодії.*

**Ключові слова:** рідке середовище, газовий потік, фурма, каверна, турбулентність кінетичної енергії.

*The processes of co-operation of the gas streams given by tuyeres with liquid environments are explored. Comparison of experimental researches results and mathematical design is given. Accordance of computation and experimental data allows analyse the hydrodynamic state of interaction zone adequately.*

**Keywords:** liquid environment, gas flow, tuyere, cavity, turbulence kinetic energy.

Эффективное воздействие высококонцентрированных источников энергии [1] и газореагентных сред [2] на металлический расплав оказывает существенное влияние на структуру и свойства готового литого изделия. Кроме того, в процессах газолазерной наплавки [3], а также при формировании композитов с применением лазерных технологий [4] используют различные схемы подачи дисперсного материала на поверхность подложки расплава и с заглублением фурмы в матрицу расплава. Ранее было установлено [5], что при лазерной обработке поверхности расплавов наиболее активно испаряются легкоплавкие элементы. Это не всегда является полезным, а для некоторых видов сплавов и вовсе нежелательно. При лазерном облучении металлических мишеней с высокими плотностями энергии вблизи поверхности расплава возможно образование плазмы оптического пробоя [6-8]. Чтобы использовать давление реактивной струи пара, а также плазмы в случае ее образования при лазерной обработке расплавов, лазерное облучение необходимо проводить в замкнутом объеме, поскольку известно [9], что в условиях повышенного давления газов и паров возрастает вероятность образования плазменного облака над поверхностью расплава и поглощения части лазерной энергии плазмой. Поэтому для обработки жидкого металла в замкнутой области, в том числе с возможностью полезного использования лазерной плазмы и реактивной струи отдачи пара для обработки металлического расплава, в металлургических и литейных процессах используются заглубляемые фурмы. Таким образом, исследование процессов взаимодействия газовых и газолазерных потоков, подаваемых с помощью фурмы, с металлическими расплавами является важным и актуальным.

В настоящей работе рассмотрены процессы образования каверны при воздействии газового потока, сформированного в канале наиболее распространенной конструкции фурмы, на поверхность модельной жидкости и в условиях заглубления потока.

Область воздушной воронки визуально определяли на основе результатов модельных экспериментов, где в качестве модельной жидкости использовалась вода. Выбор воды в качестве модели жидкого расплава обусловлен, в соответствии с критериями подобия Рейнольдса и Фруда, равенством кинематических вязкостей воды и металлического расплава вблизи температур плавления, а также на основе данных, представленных в работе [10].

Исследования гидродинамических эффектов при взаимодействии газовых по-

токов с расплавом проводили по двум схемам: фурма не погружена в модельную жидкость (рис. 1, а), фурма заглублена в жидкость (рис. 1, б). Расстояние от края фурмы до поверхности жидкости  $H$  в обоих случаях выбрали равным 10 мм. Общий расход подаваемого газа варьировали в пределах значений 270-342 см<sup>3</sup>/с, выходное отверстие сопла  $d = 6$  мм.

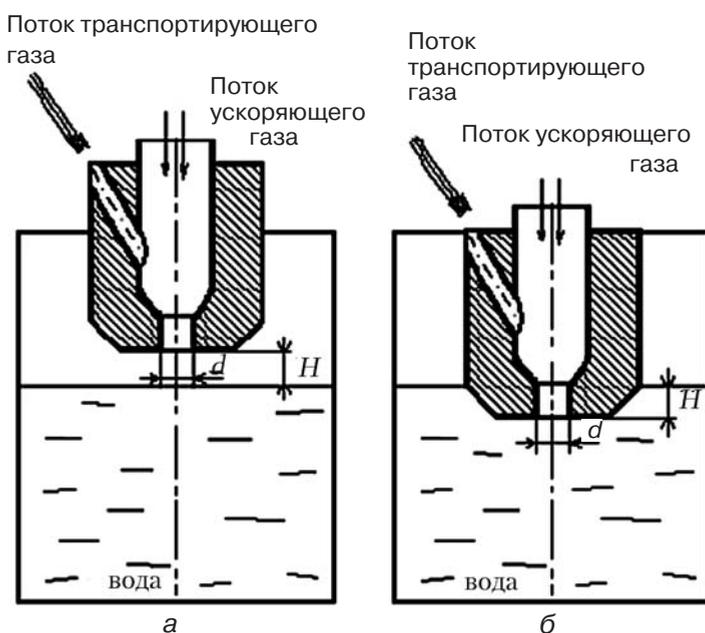


Рис. 1. Схемы формирования воздушной каверны через цилиндрическое сопло без заглубления (а) и с заглублением фурмы в жидкость (б)

Фотоизображение формы каверны для различных вариантов расположения фурмы и расходов воздуха представлено на рис. 2.

При недостаточном объеме подаваемого газа (менее 120 см<sup>3</sup>/с) в случае заглубленной фурмы образуется несколько вихрей, в том числе боковых, увеличивается ширина каверны. Формируется достаточно плоская каверна, что является неблагоприятным обстоятельством, так как для улучшения процесса продувки газами требуется увеличение расхода газа, которое обеспечивает получение стабильной каверны, устраняет возможность попадания жидкости (вода, жидкий металл) и пара внутрь фурмы.

Исследования показали, что при выбранных расходах воздуха вид каверны с изменением величины  $H$  не меняется – происходит только изменение ее геометрических размеров. Следовательно, расположение фурмы относительно поверхности расплава нужно выбирать, исходя из технологической целесообразности, а именно, увеличения стойкости фурмы и расхода газа.

При разработке технологий для большинства процессов обработки расплавов газореагентными средами необходимо знать распределение давлений и скоростей газовых и газопорошковых потоков после выхода из фурмы до границы воздушная каверна/расплав. Измерить эти величины в условиях модельных и особенно натуральных экспериментов крайне затруднительно, а вернее практически невозможно.

С этой целью было проведено математическое моделирование рассматривае-

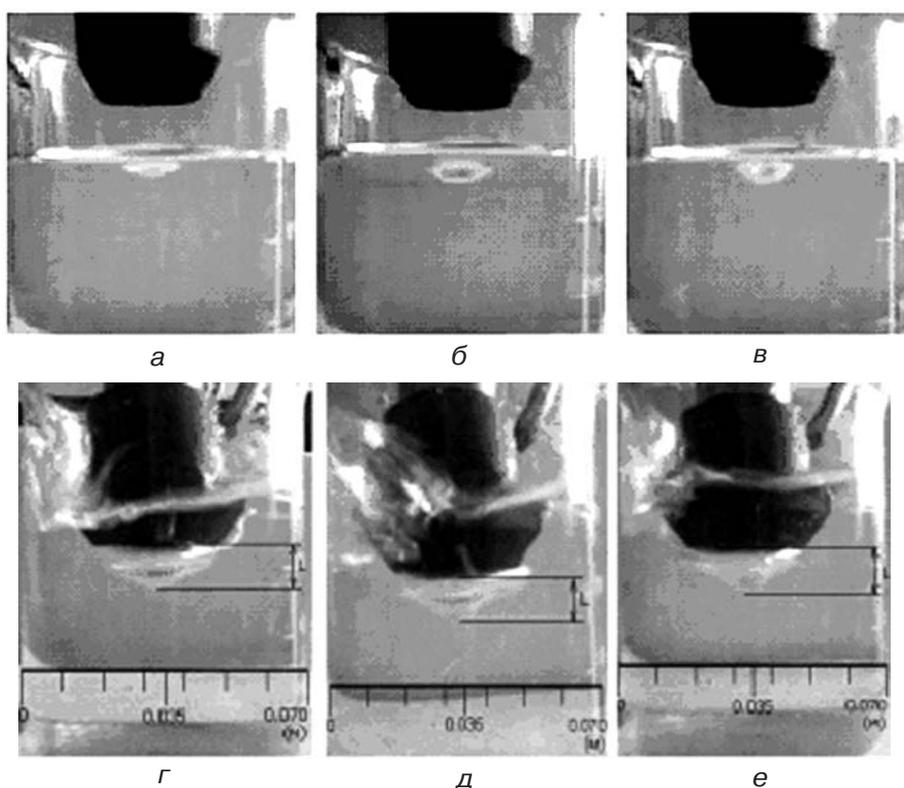


Рис. 2. Вид каверны при расположении фурмы над поверхностью воды (а-в) и при ее заглублении (г-е); общий расход газа, см<sup>3</sup>/с: а, г – 270; б, д – 306; в, е – 342

мых процессов, которое позволяет не только визуально оценить геометрические размеры каверн, но и рассчитать все необходимые технологические параметры и их вариации.

Математическое моделирование проводили на основе совместного решения уравнений неразрывности и Навье-Стокса в приближении упрощений, основанных на усреднении по Фавру-Рейнольдсу и использовании моделей турбулентной вязкости для их замыкания. Трехмерная модель проточной части расчетной области моделировалась с учетом величины  $H$  [11].

В качестве начальных условий приняты: объемная концентрация воды  $W_b = 1$  с равенством нулю трех компонент скорости, объемная концентрация и скорость воздушного потока определялись автоматически.

Граничные условия на входе следующие: полная температура потока  $T^* = 300$  К; расход газа через транспортирующий и внутренний каналы  $Q_{тр} = 39$  см<sup>3</sup>/с;  $Q_y = 230-303$  см<sup>3</sup>/с; объемные концентрации газа и воды равны 1 и 0 соответственно. На выходе моделировалось условие дегазации со средним диаметром пузырьков воздуха 6 мм, температура и давление окружающей среды  $T^* = 288$  К,  $P_{атм} = 101325$  Па. На адиабатических и непроницаемых стенках приняли условие свободного скольжения для воздуха и воды, скорости для обеих сред равны нулю.

Сравнение расчетных данных с модельным экспериментом осуществляли для стационарного течения газа по ряду признаков: геометрическим размерам каверны, зонам расположения вихрей и др. Удовлетворительное соответствие расчетных и экспериментальных данных (рис. 2, 3) позволяет адекватно анализировать гидро-

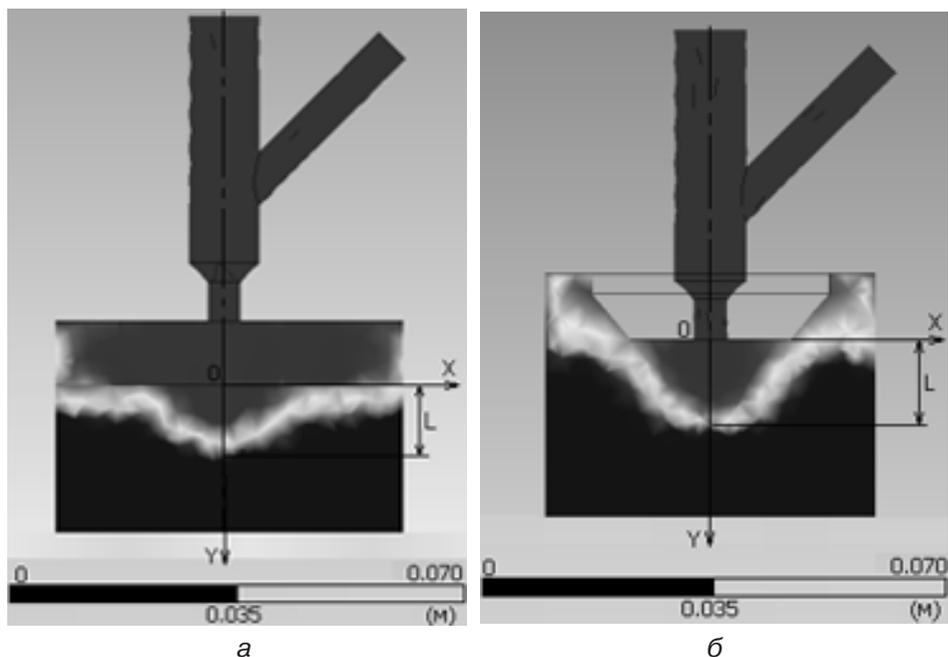


Рис. 3. Глубина воздушной каверны при расположении фурмы над поверхностью жидкости (а) и при заглублении фурмы (б), значение ускоряющего потока газа  $Q_y = 230 \text{ см}^3/\text{с}$

динамическое состояние зоны взаимодействия заглубленного газового потока в модельную жидкость методами математического моделирования.

Как в экспериментах, так и при математическом моделировании общий расход газа, подаваемого через фурму, изменялся только за счет варьирования потока ускоряющего газа, транспортирующий поток не изменялся.

Расчеты процесса образования каверны показали, что увеличение ускоряющего потока газа  $Q_y$  с 230 до 303  $\text{см}^3/\text{с}$  при заглублении фурмы на величину  $H = 10 \text{ мм}$  приводит к росту глубины каверны  $L$  (рис. 3) с 12,5 до 14 мм.

Скорости газовых потоков в центральных областях газовых каверн (рис. 4) для незаглубленной фурмы (рис. 4, а), а также заглубленной (рис. 4, б) имеют схожие тенденции изменения величин. Однако, скорости потоков на выходе из незаглубленной и заглубленной фурм при одних и тех же параметрах расхода газа отличаются. Это обусловлено различиями в значениях давлений на выходе газового потока из фурм (рис. 5). При этом в условиях погружения фурмы сопротивление струи отдачи по сравнению с непогруженной значительно выше, что прослеживается углом наклона кривых в плоскости  $V-L$  (рис. 4).

Распределение скоростей в радиальных сечениях потока на разных расстояниях от среза сопла представлено на рис. 6.

К основным отличительным особенностям распределения скоростей в радиальном сечении для незаглубленной и заглубленной фурм можно отнести ширину зоны течения газа (радиус сечения потока) и размеры зоны турбулентности кинетической энергии потока (вихревых зон). Если незаглубленный поток характеризуется большим по сравнению с заглубленным потоком радиусом сечения потока при практически одинаковых значениях скоростей и меньшими значениями турбулентности

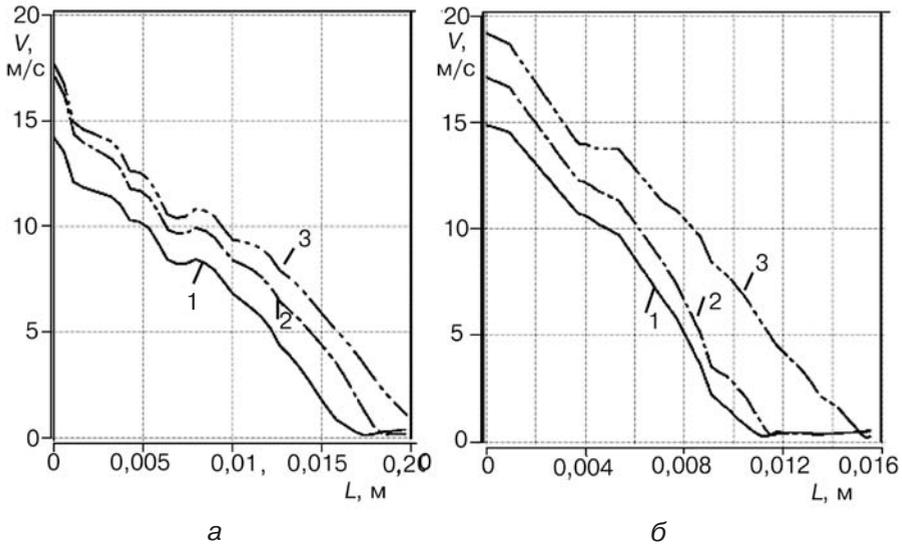


Рис. 4. Распределение скоростей вдоль центральной линии потока для незаглубленной фурмы (а) и при заглублении фурмы (б); 1 –  $Q_y = 230$ ; 2 –  $Q_y = 267$ ; 3 –  $Q_y = 303$  см<sup>3</sup>/с

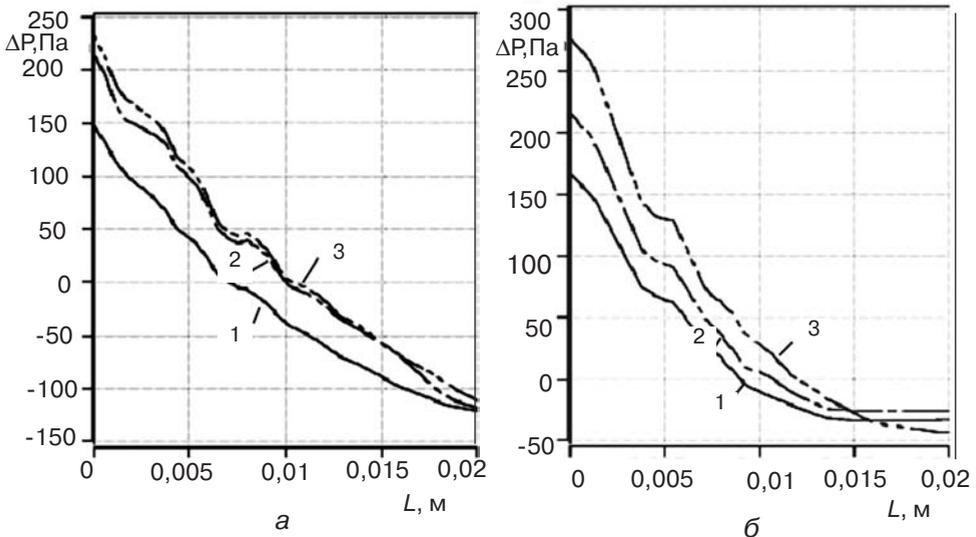


Рис. 5. Распределение давлений вдоль центральной линии потока для незаглубленной фурмы (а) и при заглублении фурмы (б), где  $\Delta P = P_B - P_{атм}$ ;  $P_B$  – давление потока на выходе; 1 –  $Q_y = 230$ , 2 –  $Q_y = 267$ , 3 –  $Q_y = 303$  см<sup>3</sup>/с

кинетической энергии потока, то заглубленный поток более сфокусирован, но имеет несколько большие размеры вихревых зон по периферии потока.

Таким образом, учет формы и величины глубины каверны, а также полученных данных значений давлений, скоростей потоков и турбулентности кинетической энергии дает возможность правильно оценить работоспособность транспортирующего устройства (фурмы) для подачи газа или двухфазного потока при различных условиях эксплуатации, а также время нагрева частиц дисперсных материалов в поле лазерного излучения.

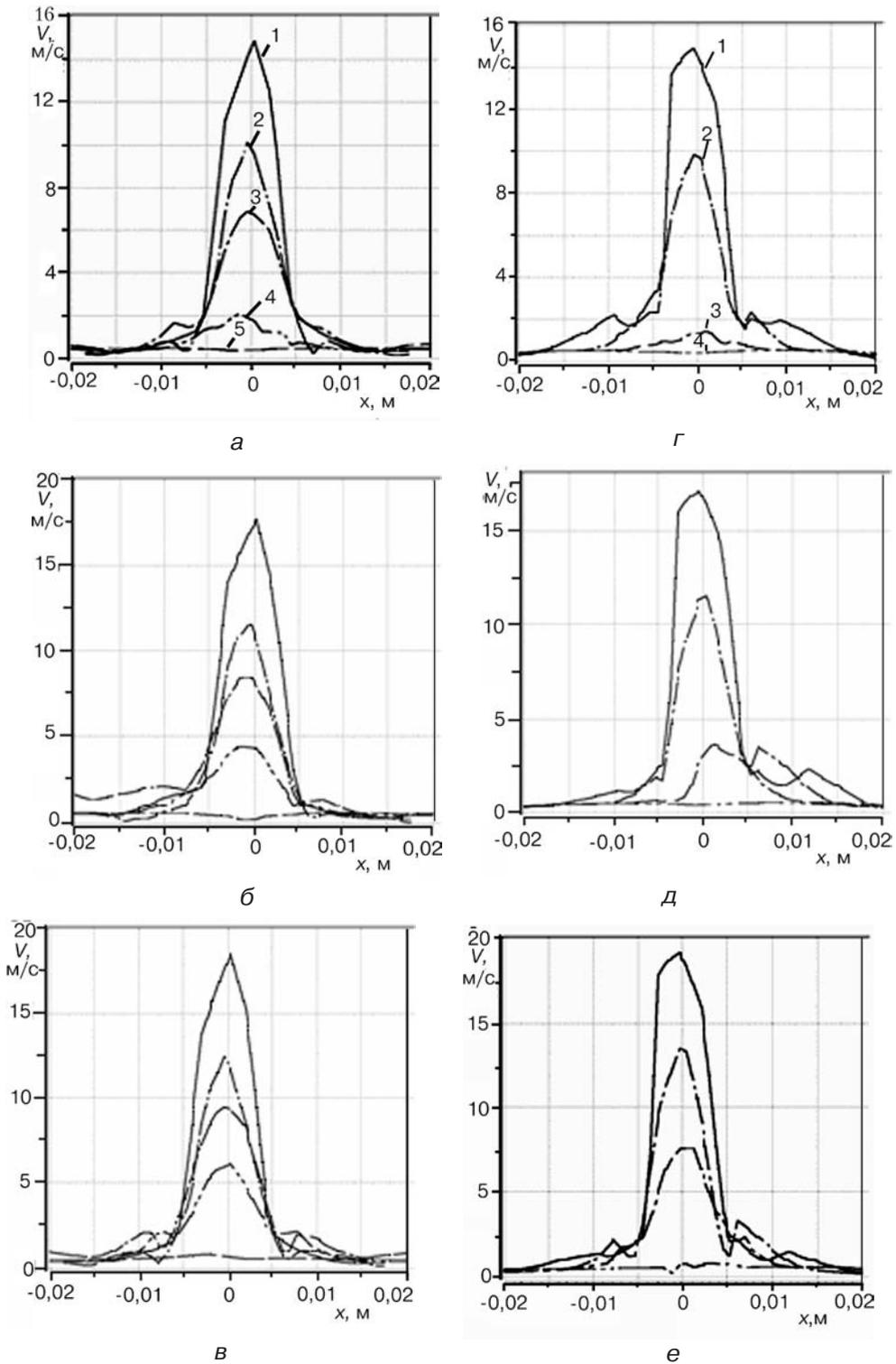


Рис. 6. Изменение скоростей воздушных потоков в зависимости от глубины воронки  $L$  для незаглубленной фурмы (а-в) и при заглублении фурмы (г-е); общий расход газа, см<sup>3</sup>/с: а, г – 270; б, д – 306; в, е – 342; 1 –  $L = 0$ ; 2 –  $L = 5$ ; 3 –  $L = 10$ ; 4 –  $L = 15$ ; 5 –  $L = 20$  мм



### Список литературы

1. Лихошва В. П., Марковский Е. А., Рейнталь Е. А. Лазерное облучение металлических расплавов // *Металл и литье Украины*. – 2007. – № 11-12. – С. 24-26.
2. Найдек В. Л., Наривский А. В. Повышение качества отливок из алюминиевых и медных сплавов плазмореагентной обработкой их расплавов. – Киев: Наук. думка, 2008. – 167 с.
3. Найдек В. Л., Лихошва В. П. Лазерная наплавка аморфных и композиционных покрытий // *Актуальные проблемы современного материаловедения*. – Киев: Академперіодика, 2008. – Т. 1. – С. 185-212.
4. Лихошва В. П. Получение композиционных лазерных наплавов замораживанием жидкометаллических эмульсий // *Процессы литья*. – 2004. – № 3. – С. 77-84.
5. Перелома В. А., Лихошва В. П. Лазерное воздействие на жидкое и жидкотвердое состояние алюминиевых сплавов. – М.: Литейн. пр-во. – 1992. – № 9. – С. 8.
6. Пространственно-временная структура плазменного факела, образующегося в зоне воздействия излучения непрерывного СО<sub>2</sub>-лазера на металлы / Ж. В. Васильченко, В. В. Ажаронк, И. И. Филатова и др. // *Физика и химия обработки материалов*. – 1996. – № 6. – С. 27-33.
7. Хайоров С. С., Курбатова А. В. Технология легких сплавов. – М.: Машиностроение, 1978. – Т. 5. – 28 с.
8. Мазорра Х. А. Структурные и фазовые изменения поверхностных слоев сплавов на железной основе после воздействия излучения лазера: Дис. . . . канд. техн. наук. – М.: МИСиС, 1981. – 161 с.
9. Воздействие лазерного излучения на материалы / Р. В. Арутюнян, В. Ю. Баранов, Л. А. Большов и др. – М.: Наука, 1989. – 367 с.
10. Вихревая струя расплава и взаимодействие с ванной. Сообщение 1 / В. А. Перелома, В. Л. Найдек, Г. Ф. Петров и др. // *Процессы литья*. – 1990. – № 1. – С. 10-13.
11. Моделирование газолазерных потоков при создании оборудования для нагревания дисперсных материалов / В. П. Лихошва, Е. А. Рейнталь, Ф. И. Кирчу и др. // *Металл и литье Украины*. – 2009. – № 11-12. – С. 77-81.

Поступила 25.02.2010

### **Вниманию авторов!**

*В соответствии с требованиями ВАКа все статьи, поступающие в редакции научных журналов, должны обязательно проходить рецензирование, иметь аннотации и ключевые слова на русском, украинском и английском языках. Объем статьи – не более **10 стр.**, рисунков – не более **5**.*

*Статьи в редакции поступают как на бумажном, так и электронном носителе. Для текстовых материалов желательно использовать формат **doc**. Для графических материалов – формат **jpeg**. Графические материалы необходимо сохранять в отдельных файлах. Фотографии, рисунки, графики и чертежи должны быть черно-белыми, четкими и контрастными.*