

впливу високочастотних гідродинамічних коливань на фізико-хімічні параметри для інших аліфатичних спиртів, з метою розширення областей застосування технології.

**Список літератури:** 1. *Рогов, И. А.* Электрофизические методы обработки пищевых продуктов [Текст] / И. А. Рогов. – М.: Агрпромпиздат, 1988. – 272 с. 2. Food processing operations modeling. Design and analysis [Text] / [second edition] : edited by Soojin Jun, Joseph M. Irudayaraj. – London, New York : CRC Press is an imprint of the Taylor & Francis Group, an informa business, 2009. – 340 p. 3. *Долгинский, А. А.* Наномасштабные эффекты при дискретно-импульсной трансформации энергии [Текст] / А. А. Долгинский, Б. И. Басок // ИФЖ. – 2005 – Т.78, No 1. – С. 15–23. 4. *Дубовкина, И. А.* Моделирование процессов гидратации и структурирования этанола в условиях обработки ДИВЭ [Текст] / И. А. Дубовкина // "Восточно-Европейский журнал передовых технологий". – 2012. – No 6/6 (60). – С. 50–51. 5. *Marcin, R.* Influence of ions on molecular vibrations and hydrogen bonds in methanol–water mixtures: MD simulation study [Text] / Marcin Rybicki, Ewa Hawlicka // Original Research Article Journal of Molecular Liquids. – 2014. – Vol. 196. – P. 300–307. 6. *Yves, Marechal.* The Hydrogen Bond and the Water Molecule: The Physics and Chemistry of Water, Aqueous and Bio-Media [Text] / Marechal Yves // Elsevier Science & Technology, 2006. – 332 p. 7. *Менделеев, Д. И.* Растворы [Текст] / Д. И. Менделеев // Москва: Издательство Академии Наук СССР, 1959. – С. 256–274. 8. *Адлер, Ю. П.* Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий [Текст] / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 280 с. 9. Техно-

логічний регламент на виробництво горілок і лікєро-горілочаних напоїв [Текст]: ТР У 18.5084-96. - К.: УкрНДспиртбіопрод, 1996. – 330 с. 10. Водка: технология, качество, инновации: монография [Текст] / О. В. Кузьмин [и др.]. – Донецк: ДонНУЭТ, 2011. – 307 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. *Rogov, I. A.* (1988). Elektrofizicheskie metody obrabotki pishhevyykh produktov. Moscow : Agropromizdat, 272. 2. Food processing operations modeling. (2009). Design and analysis: edited by Soojin Jun, Joseph M. Irudayaraj. London, New York : CRC Press is an imprint of the Taylor & Francis Group, an informa business, 340. 3. *Dolinskij, A. A., Basok, B. I.* (2005). Nanomasshtabnye efekty pri diskretno-impulsnoj transformacii energii. IFZh, T. 78, No 1, 15–23. 4. *Dubovkina, I. A.* (2012). Modelirovanie processov gidratatsii i strukturirovaniya etanola v usloviyax obrabotki DIVE. "Eastern-European Journal of Eenterprise Technologies", No 6/6 (60), 50–51. 5. *Marcin, Rybicki, Ewa, Hawlicka* (2014). Influence of ions on molecular vibrations and hydrogen bonds in methanol–water mixtures: MD simulation study. Original Research Article Journal of Molecular Liquids, Vol. 196, 300–307. 6. *Yves, Marechal.* (2006). The Hydrogen Bond and the Water Molecule: The Physics and Chemistry of Water, Aqueous and Bio-Media. Elsevier Science & Technology, 332. 7. *Mendeleev, D. I.* (1959). Rastvory. Moskva: Izdatelstvo Akademii Nauk SSSR, 256–274. 8. *Adler, Yu. P., Markova, E. V., Granovskij, Yu. V.* (1976). Planirovanie eksperimenta pri poiske optimalnykh uslovij. Moskva: Nauka, 280. 9. Technologichnij reglament na virobniцtvo gorilok i likero-gorilchanix napoiv: TR U 18.5084-96. Kiev: UkrNDIspirtbioprod, 1996, 330. 10. *Kuzmin, O. V.* [i dr.]. (2011). Vodka: tehnologiya, kachestvo, innovacii: monografiya. Doneck: DonNUET, 307.

Надійшла (received) 15.12.2015

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Шурчкова Юлія Олександрівна** – доктор технічних наук, професор, головний науковий співробітник відділу тепломасообміну в дисперсних системах, Інститут технічної теплофізики НАН України; вул. Булаховського, 2а, м. Київ, Україна, 03164; тел.: (044) 424 14 96; e-mail: [itf\\_tds@ukr.net](mailto:itf_tds@ukr.net).

**Шурчкова Юлія Олександрівна** – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник отдела тепломассообмена в дисперсных системах, Институт технической теплофизики НАН Украины; ул. Булаховского, 2а, г. Киев, Украина, 03164; тел.: (044) 424 14 96; e-mail: [itf\\_tds@ukr.net](mailto:itf_tds@ukr.net).

**Shurchkova Juliya** – Professor, Doctor of technical sciences, Chief Researcher, The department of heat and mass exchange in disperse systems, Institute of Engineering Thermophysics NAS of Ukraine; st. Bulakhovskogo 2a, Kyiv, Ukraine, 03164; e-mail: [itf\\_tds@ukr.net](mailto:itf_tds@ukr.net).

**Дубовкіна Ірина Олександрівна** – кандидат технічних наук, с.н.с., старший науковий співробітник відділу тепломасообміну в дисперсних системах, Інститут технічної теплофізики НАН України; вул. Булаховського, 2а, м. Київ, Україна, 03164; тел.: 097-674-36-72; e-mail: [idubovkina@yandex.ru](mailto:idubovkina@yandex.ru).

**Дубовкіна Ірина Олександрівна** – кандидат технических наук, с.н.с., старший научный сотрудник отдела тепломассообмена в дисперсных системах, Институт технической теплофизики НАН Украины; ул. Булаховского, 2а, г. Киев, Украина, 03164; e-mail: [idubovkina@yandex.ru](mailto:idubovkina@yandex.ru).

**Dubovkina Irina** – Associate professor, Candidate of technical science, Principal research scientist The department of heat and mass exchange in disperse systems, Institute of Engineering Thermophysics NAS of Ukraine; st. Bulakhovskogo 2a, Kyiv, Ukraine, 03164; e-mail: [idubovkina@yandex.ru](mailto:idubovkina@yandex.ru).

УДК 621.793.7

**О. КАНАЛЕС, А. А. ЛИТВИНОВ, А. О. ВОЛКОВ, С. Е. МАРКОВИЧ, А. И. ДОЛМАТОВ**

#### АДИАБАТИЧЕСКАЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ СПЕЦИФИЧЕСКОЙ ГЕОМЕТРИИ СОПЛА ХОЛОДНОГО НАПЫЛЕНИЯ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

Изучение газодинамических характеристик процесса, как правило, проводится через адиабатические газодинамические модели и гидродинамические вычисления. В данной работе, представлена инновационная адиабатическая газодинамическая модель для расчета энергетических параметров потока в сопле при использовании метода холодного напыления низкого давления. Адиабатическая газодинамическая модель, представленная в этой работе, предназначена для изучения неправильной геометрии сопла. Результаты параметров потока газа через сопло используются для расчета скорости частиц и температуры коммерчески доступных порошкообразных материалов.

**Ключевые слова:** газодинамическая модель, число Маха, процесс холодного напыления, геометрия сопла.

© О. Каналес, А. А. Литвинов, А. О. Волков, С. Е. Маркович, А. И. Долматов. 2015

**Введение.** Чтобы произвести покрытия методом холодного напыления необходимо ускорить частицы металлического порошка до высоких скоростей посредством сверхзвукового потока газа воспользовавшись силами сопротивления, полученными при взаимодействии частиц с потоком газа и теплом, передаваемого к частицам. Многие лаборатории по всему миру работают над оптимизацией газового потока с целью достижения более высоких скоростей и температуры частиц.

Так как в процессе холодного напыления скорость частиц является основным параметром, отвечающим за напыление порошка важно понять в первую очередь как параметры процесса (рабочий газ, давление и температура) и геометрия сопла влияют на ускорение частиц. В полете скорость частицы через сопло может быть ограничена только скоростью газа, а некоторые параметры помогают частицам легче достичь скорости газа. Использование более высоких давлений, длинных сопел, высоких температур газа, мелких частиц и газа с низкой молекулярной массой может улучшить ускорение частиц. При практическом использовании, желательнее применение более низкого давления и более низких рабочих температур,

чтобы уменьшить поток газа и эксплуатационные затраты.

В этом исследовании анализируется общая изоэнтропическая модель газовой динамики на оборудовании для холодного напыления низкого давления ДИМЕТ 405. Цель этого анализа, определить скорость в полете и температуру выбранных порошковых материалов С-01-11, А-20-11 и N7-00-14.

В целях упрощения анализа, смеси порошкового материала данного исследования предполагаются, что частицы сферической формы и без примесей, имеющие те же физические свойства, как в начальном состоянии заготовки. Таблица 1 содержит свойства коммерческих порошков, предоставленных Обнинским центром порошкового напыления (ОЦПН). В модели, первоначально газовый поток вводится через сопло, чтобы впоследствии рассчитать воздействие газа на нагрев частиц и их ускорение.

Рис. 1 иллюстрирует сопло ДИМЕТ 405 СК-20 для холодного напыления низкого давления. Общая гидродинамика изоэнтропической модели не учитывает пограничный слой, который развивается вдоль внутренних стенок сопла, по этой причине данная модель применима только с теоретической точки зрения.

Таблица 1 – Состав композиционных порошков на металлической матрице Обнинского центра порошкового напыления (ОЦПН)

Код порошка	Процент содержания материала и размер	Процент содержания цинка и размер	Процент содержания корунда и размер
С-01-11	65% wt. Cu Размер: 20мкмSD 5	25% wt. Zn Размер: 10 мкмSD 5	10% wt. AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  Размер: 22 мкмSD 7
А-20-11	60% wt. AL Размер: 22 мкмSD 6	25% wt. Zn Размер: 10 мкмSD 5	15% wt. AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  Размер: 22 мкмSD 7
N7-00-14	65% wt. Ni Размер: 25 мкмSD 8	25% wt. Zn Размер: 10 мкмSD 5	10% wt. AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  Размер: 22 мкмSD 7

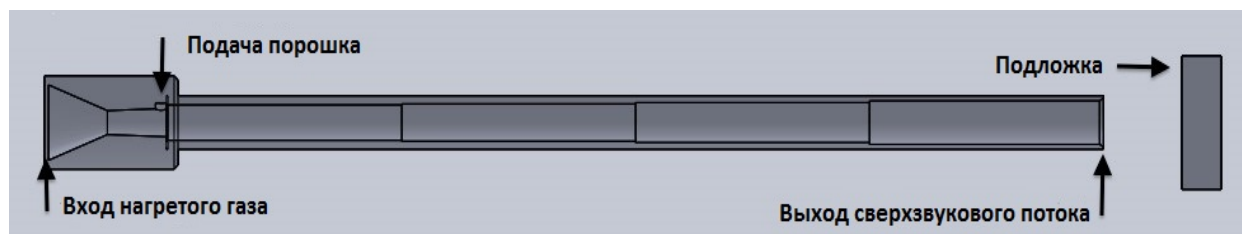


Рис. 1 – Сопло СК-20 для холодного напыления низкого давления установки ДИМЕТ 405

**Анализ литературных данных и постановка проблемы.** С целью изучения процессов холодного напыления в первую очередь, чтобы изучить процесс холодного напыления используется изоэнтропическая модель газового потока, которая подробно описана в [1-3]; эта модель предполагает, что поток изоэнтропичен (поток является адиабатическим и не имеет трения) по этой же причине эта модель не учитывает наличие пограничного слоя на стенках сопла, где газ движется медленнее, чем в центральной части сопла и, как правило, показывает более высокие результаты, чем полученные из экспериментальных [4] данных. Параметры газа (полная температура и давление торможения) напрямую зависят от геометрии сопла и являются функцией от числа Маха при их ускорении в расширяющейся части сопла. При попадании потока в канал сопла, он ускоряется или тормозится в зависимости от площади поперечного сечения. Геометрия оптимальной расширяющейся части сопла рассчитывается аналитически. В данных работах не рассматриваются сопла с нестандартной геометрией.

**Цель и задачи исследования.** Целью исследования является изучение газодинамических характеристик процесса холодного напыления низкого давления.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи :

1. Создание адиабатической газодинамической модели для расчета энергетических параметров потока в сопле нестандартной формы при использовании метода холодного напыления низкого давления.

2. Расчет скорости частиц и температуры коммерчески доступных порошкообразных материалов.

**Материалы и методы исследования газодинамических характеристик процесса холодного напыления низкого давления.** С целью определения энергетических параметров в сопле (давление, температура, число Маха и др.), была разработана одномерная газодинамическая модель. Данная модель была адаптированная под число Маха, которое увеличивается при расширении воздушного потока в расши-

ряжущей части сопла Лавалья [5-9]. В данной модели приняты следующие допущения:

- Течение газа принимается одномерным и изотропическим (адиабатное и без учета сил трения);
- Рассматривается идеальный газ;
- Теплоемкость принимается постоянной величиной.

С целью определения свойств сверхзвукового потока, получаемого при прохождении сопла СК-20 установки ДИМЕТ, его внутренний диаметр был измерен и значения координаты “Y” рассматривается как радиус сопла, а значения координаты “X” как расстояние от критического сечения сопла до его выходного сечения. С целью определения числа Маха вдоль сопла, необходимо решение соотношения 1 площадь-число Маха [6].

$$\frac{A}{A^*} = f_A(M) = \frac{1}{M} \left[ \frac{2+(k-1)M^2}{k+1} \right]^{\frac{k+1}{2(k-1)}}, \quad (1)$$

где A – площадь сопла в данной точке, A\* – площадь поперечного сечения сопла, M – число Маха, равное единице в критическом сечении, k – коэффициент теплоемкости; эта площадь рассчитывается при измерении координаты “Y” для радиуса внутреннего диаметра в каждой точке сопла.

После расчета числа Маха по всей длине от критического сечения сопла до его выхода, рассчитывается плотность газа  $\rho_0$  с помощью уравнения 2,

$$\rho_0 = \frac{P_0}{RT_0}, \quad (2)$$

где  $P_0$  – давление торможения,  $T_0$  – температура торможения R – универсальная газовая постоянная. Используя полученные значения числа Маха и плотности газа, при помощи уравнений 3-5 рассчитываются температура T и давление P,

$$\frac{\rho}{\rho_0} = f_\rho(M) = \left( 1 + \frac{k-1}{2} M^2 \right)^{-\frac{1}{k-1}}, \quad (3)$$

$$\frac{T}{T_0} = f_T(M) = \left( 1 + \frac{k-1}{2} M^2 \right)^{-1} \quad (4)$$

$$\frac{P}{P_0} = f_P(M) = \left( 1 + \frac{k-1}{2} M^2 \right)^{-\frac{k}{k-1}}, \quad (5)$$

где величины с “0” – значения параметров торможения.

Скорость звука a и скорость газа V рассчитывается по формулам 6-7,

$$a = \sqrt{kRT}, \quad (6)$$

$$v = aM. \quad (7)$$

Вязкость газа  $\mu$  рассчитывается при помощи температуры Сатерленда  $T_s$  (120 К для воздуха) и комнатной температуре  $\mu_0$  (уравнение 8),

$$\mu = \mu_0 \left( \frac{T}{273} \right)^{1.5} \frac{273+T_s}{T+T_s}. \quad (8)$$

Для определения скорости частиц используется дифференциальное уравнение 9 [10], которое решается методом конечных разностей,

$$V_p \frac{dV_p}{dz} = \frac{3}{4} C_D \frac{\rho(v-V_p)|v-V_p|}{\rho_p d_p}, \quad (9)$$

где  $V_p$  – скорость частицы,  $C_D$  – коэффициент сопротивления частицы,  $\rho_p$  – плотность частицы и  $d_p$  – диаметр частицы.

Для расчета температуры частиц используются следующие уравнения 10-15 [10-13],

$$\rho_p V_p C_p \frac{dT_p}{dz} = Nu \frac{6\lambda}{d_p^2} (T - T_p), \quad (10)$$

$$Nu = 2a + 0.459b Re_p^{0.55} Pr^{0.33}, \quad (11)$$

$$a = \exp(-M_p)(1 + 17M_p/Re_p)^{-1}, \quad (12)$$

$$b = 0.666 + 0.333 \exp(-17M_p/Re_p), \quad (13)$$

$$Re_p = (v - V_p)\rho d_p/\mu \quad (14)$$

$$M_p = (v - V_p)/a. \quad (15)$$

где  $T_p$  – температура частицы, Nu – число Нюсельта,  $\lambda$  – длина волны между двумя соседними вершинами распространения струи (в нашем случае 8 мм),  $Re_p$  – число Рейнольдса частицы и  $M_p$  – число Маха частицы.

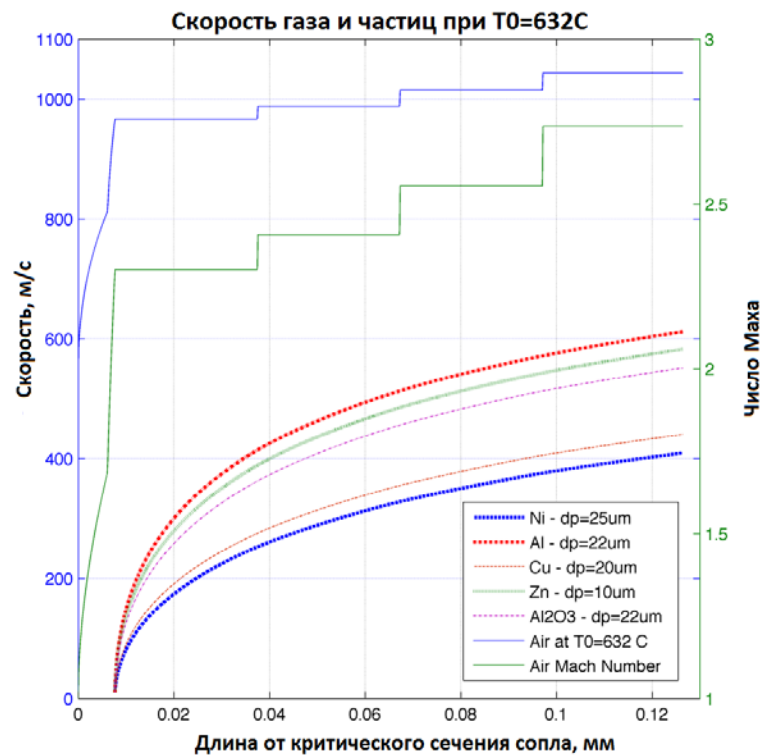
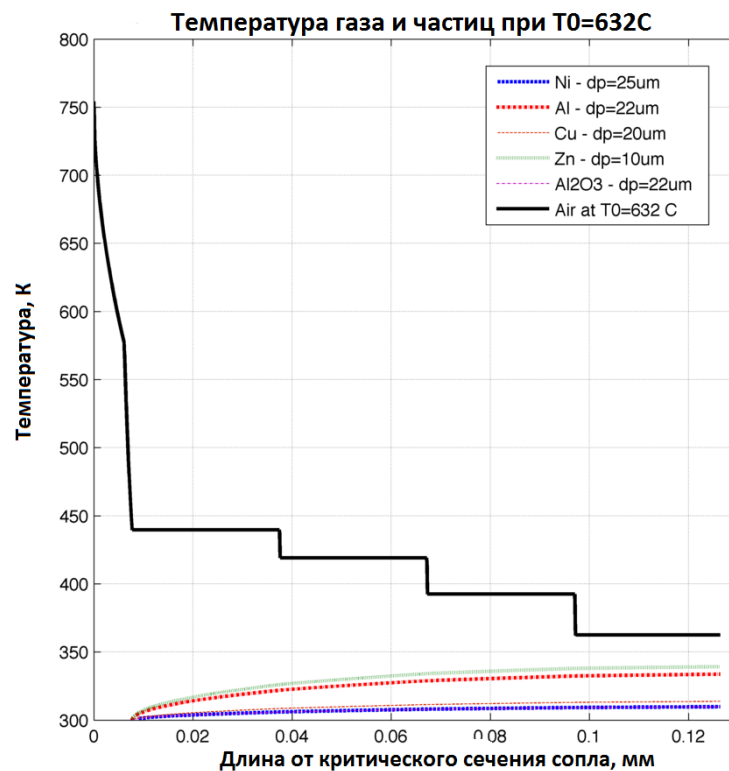
Представленная модель не учитывала влияние трения на стенках сопла, так как рассматривался идеальный вариант сверхзвукового течения. В реальном течении часть газовой струи, протекающей возле стенок сопла, имеет меньшие значения скорости в результате трения [6]. Это уменьшение скорости формирует пограничный слой особой толщины, в котором скорость газа изменяется от 0 до примерно 99 % от максимальной скорости газа. В сопле Лавалья число Маха изменяется на участке, в котором скорость газа рассматривается максимальной. По этой причине, когда пограничный слой изменяется по длине сопла, вполне нормально наблюдать уменьшение числа Маха с уменьшением эффективной площади сопла.

Были проведены эксперименты, выполненные с целью определения влияния толщины пограничного слоя на число Маха расширяющегося газа. Эксперименты проводились с использованием трубки Пито на выходе из сопла установки холодного газодинамического напыления низкого давления ДИМЕТ 405.

В ходе экспериментов были измерены полное  $q_c$  и статическое  $p_s$  давления, а также изменение числа Маха M при помощи уравнения 16,

$$\frac{q_c}{p_s} = \left( \frac{k+1}{2} M^2 \right)^{\frac{k}{k-1}} \cdot \left( \frac{k+1}{1-k+2kM^2} \right)^{\frac{1}{k-1}}. \quad (16)$$

**Результаты исследования газодинамических характеристик процесса холодного напыления низкого давления.** На рис. 2, 3 изображены результаты расчета адиабатической модели. Как видно при росте числа Маха и снижении температуры скорость газа и частиц возрастает.

Рис. 2 – Скорость частиц и газа относительно числа Маха при  $T_0=632\text{C}$  и  $P_0=0.8\text{МПа}$ Рис. 3 – Скорость частиц и газа относительно температуры газа при  $T_0=632\text{C}$  и  $P_0=0.8\text{МПа}$ 

На рис. 4 представленны результаты измерений, полученные в ходе эксперимента при различных температурах торможения; видно, что температура торможения не влияет на число Маха, несмотря на то, что пограничный слой есть функцией от скорости газа.

Существует также погрешность определения числа Маха с использованием трубки Пито. Эта погрешность находится в пределах  $\pm 5\%$  и обусловлена потерями полного давления газа в сопле.



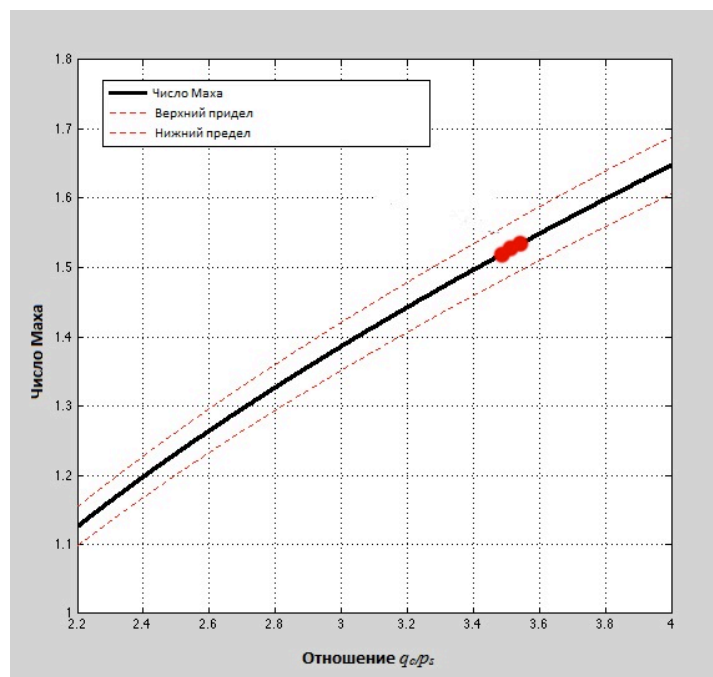


Рис. 4 – Данні динамічного і статического тиску, отримані з використання трубки Піто

**Обсуждение результатов исследования газодинамических характеристик процесса холодного напыления низкого давления.** Как ясно из уравнения 9 главными факторами, влияющими на скорость частиц, являются скорость и плотность газа носителя, но они находятся в противостоянии друг к другу, так как для роста скорости необходимо повышать температуру газа, а это в свою очередь уменьшает плотность газа и соответственно его способность ускорять частицы.

Число Маха на выходе из сопла СК-20 находится в диапазоне от 1,5 до 1,55. Так как экспериментальные значения числа Маха значительно ниже, чем идеальные значения, рассчитанные с помощью адиабатической модели, представленной в предыдущем пункте, целесообразно сделать вывод что пограничный слой в отдельности влияет на изменение числа Маха при расширении газа.

**Выводы.** В данной работе была представлена изоэнтропическая модель газовой динамики для расчета энергетических параметров сверхзвукового потока воздуха, проходящего через нестандартные сопла Лавала. Были рассчитаны сверхзвуковые параметры газа на основе числа Маха и отношения площади канала с использованием стандартных термодинамических соотношений для скорости газа, температуры, вязкости, плотности и т.д., в зависимости от развиваемых чисел Маха через сопло. Было изучено взаимодействие газа с частицами выбранных порошковых материалов для расчета их скорости в полете и температуры. В целом, представленная модель не учитывает толщины пограничного слоя, развивающегося по длине сопла за счет сил трения; по этой причине, она не может быть использована для практических целей, так как толщина пограничного слоя, как правило, влияет на развитие числа Маха, поскольку эффективная площадь канала уменьшается. Несмотря на неприменимость модели, она представляет

собой новый подход для расчета энергетических параметров сверхзвукового потока газа через сопла Лавала с нестандартной геометрией. Рекомендуется дальнейшее развитие, для вычисления влияния толщины развивающегося пограничного слоя вдоль длины сопла.

**Список литературы:** 1. Alkhimov, A. P. Gas Dynamic Spraying Method for Applying a Coating [Text] / A. P. Alkhimov, A. N. Papyrin, V. F. Dosarev, N. I. Nesterovich, M. M. Shuspanov // U. S. patent. – 12 April 1994. – P. 5,302,414. 2. Tokarev, A. O. Structure of Aluminum Powder Coatings Prepared by Cold Gasdynamic Spraying [Text] / A. O. Tokarev // Met. Sci. Heat Treat. – 1996. – Vol. 38. No 3–4. – P. 136–139. 3. Alkhimov, A. P. A Method of Cold Gas-Dynamic Deposition [Text] / A. P. Alkhimov, V. E. Kosareve, and A. N. Papyrin // Dokl. Akad. Nauk SSSR. – 1990. – Vol. 315. No 5. – P. 1062–1065. 4. McCune, R. C. An Exploration of the Cold Gas-Dynamic Spray Method for Several Materials Systems [Text] / R. C. McCune, A. N. Papyrin, J. N. Hall, W. L. Riggs, and P. H. Zajchowski // Thermal Spray Science and Technology C. C. Berndt and S. Sampath, Ed., ASM International. – 1995. – P. 1–5. 5. Pattison, J. Cold Gas Dynamic Manufacturing: a Non-Thermal Approach to Freeform Fabrication [Text] / Pattison J, Celotto S, Morgan R, Bray M and O'Neill W // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2007. – Vol. 47 (3–4). – P. 627–634. 6. Anderson, John D. Modern Compressive Flow by Anderson [Text] / John D. Anderson // McGraw-Hill, 1990. 7. McCune, R. C. Characterization of Copper and Steel Coatings Made by the Cold Gas-Dynamic Spray Method [Text] / R. C. McCune, W. T. Donoon, E. L. Cartwright, A. N. Papyrin, E. E. Rybicki, and J. R. Shadley // Thermal Spray Science and Technology, C. C. Berndt and S. Sampath, Ed., ASM International. – 1995. – P. 397–403. 8. Bishop, C. V. Practical Pollution Abatement Methods for Metal Finishing [Text] / C. V. Bishop and G. W. Loar // Plat. Surf. Finish. – 1993. – Vol. 80. No 2. – P. 37–39. 9. Shapiro, A. H. The Dynamics and Thermodynamics of Compressible Fluid Flow [Text] / A. H. Shapiro // Ronald Press. – 1953. 10. Papyrin, A. N. 'Cold Spray Technology' [Text] / A. N. Papyrin // Advanced Materials & Processes, 2001. 11. Dykhuizen, R. C. Investigations into the Plasma Spray Process [Text] / R. C. Dykhuizen and M. E. Smith // SurS Coat. Technol. – 1989. – Vol. 37. No 4. – P. 349–358. 12. Neiser, R. A. Wire Melting and Droplet Atomization in a High Velocity Oxy-Fuel Jet [Text] / R. A. Neiser, J. E. Brockman, T. J. Ohern, M. E. Smith, R. C. Dykhuizen, T. J. Roemer, and R. E. Teets // Thermal Spray Science and Technology, C. C. Berndt and S. Sampath, Ed., ASM International. – 1995. – P. 99–104. 13. Henderson, C. B. Drag Coefficients of Spheres in Continuum and Rarefied Flows [Text] / C. B. Henderson // AIAA J. – 1976. – Vol. 14. – P. 707–708.

- Bibliography (transliterated):** 1. *Alkhimov, A. P.* (1994). Gas Dynamic Spraying Method for Applying a Coating. U.S. patent, 5,302,414. 2. *Tokarev, A. O.* (1996). Structure of Aluminum Powder Coatings Prepared by Cold Gasdynamic Spraying. *Met. Sci. Heat Treat.*, Vol. 38, No. 3–4, 136–139. 3. *Alkhimov, A. P., Kosareve, V. E., Papyrin, A. N.* (1990). A Method of Cold Gas-Dynamic Deposition. *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, Vol. 315, No 5, 1062–1065. 4. *McCune, R. C., Papyrin, A. N., Hall, J. N., Riggs, W. L., Zajchowski, P. H.* (1995). An Exploration of the Cold Gas-Dynamic Spray Method for Several Materials Systems Thermal Spray Science and Technology C. C. Berndt and S. Sampath, Ed., ASM International, 1–5. 5. *Pattison, J., Celotto, S., Morgan, R., Bray, M., O'Neill, W.* (2007). Cold Gas Dynamic Manufacturing: a Non-Thermal Approach to Freeform Fabrication *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47 (3–4), 627–634. 6. *Anderson, John D.* (1990). Modern Compressive Flow by Anderson, McGraw-Hill. 7. *McCune, R. C., Donoon, W. T., Cartwright, E. L., Papyrin, A. N., Rybicki, E. E., Shadley, J. R.* (1995). Characterization of Copper and Steel Coatings Made by the Cold Gas-Dynamic Spray Method Thermal Spray Science and Technology, C. C. Berndt and S. Sampath, Ed., ASM International, 397–403. 8. *Bishop, C. V., Loar, G. W.* (1993). Practical Pollution Abatement Methods for Metal Finishing *Plat. Surf. Finish.*, Vol. 80, No 2, 37–39. 9. *Shapiro, A. H.* (1953). The Dynamics and Thermodynamics of Compressible Fluid Flow. Ronald Press. 10. *Papyrin, A. N.* (2001). 'Cold Spray Technology'. *Advanced Materials & Processes*. 11. *Dykhuizen, R. C., Smith, M. E.* (1989). Investigations into the Plasma Spray Process. *Surf Coat. Technol.*, Vol. 37, No 4, 349–358. 12. *Neiser, R. A., Brockman, J. E., Ohern, T. J., Smith, M. E., Dykhuizen, R. C., Roemer, T. J., Teets, R. E.* (1995). Wire Melting and Droplet Atomization in a High Velocity Oxy-Fuel Jet. *Thermal Spray Science and Technology*, C. C. Berndt and S. Sampath, Ed., ASM International, 99–104. 13. *Henderson, C. B.* (1976). Drag Coefficients of Spheres in Continuum and Rarefied Flows *AIAA J.*, Vol. 14, 707–708.

Поступила (received) 15.12.2015

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Каналес Орасіо** – аспірант, Кафедра технології виробництва авіаційних двигунів, Національний аерокосмічний університет ім. Н. Е. Жуковського «ХАІ», вул. Чкалова, 17, г. Харків, Україна, 61070, тел.: 093-545-90-72; e-mail: [horaciocanales@gmail.com](mailto:horaciocanales@gmail.com).

**Каналес Орасіо** – аспірант, Кафедра технологии производства авиационных двигателей, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», ул. Чкалова, 17, г. Харьков, Украина, 61070, тел.: 093-545-90-72; e-mail: [horaciocanales@gmail.com](mailto:horaciocanales@gmail.com).

**Canales Horacio** – aspirant (PhD Candidate), Department of aircraft engines manufacturing, National Aerospace University of Ukraine N.E Zhukovskogo “KhAI”, Chkalova street, 17, Kharkov, Ukraine, 61070, 61070, tel.: 093-545-90-72; e-mail: [horaciocanales@gmail.com](mailto:horaciocanales@gmail.com).

**Литвинов Артем Анатолійович** – аспірант, Кафедра технології виробництва авіаційних двигунів, Національний аерокосмічний університет ім. Н. Е. Жуковського «ХАІ», вул. Чкалова, 17, г. Харків, Україна, 61070, тел.: 066-474-32-24; e-mail: [artemlitvi@yandex.ru](mailto:artemlitvi@yandex.ru).

**Литвинов Артем Анатолиевич** – аспірант, Кафедра технологии производства авиационных двигателей, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», ул. Чкалова, 17, г. Харьков, Украина, 61070, тел.: 066-474-32-24; e-mail: [artemlitvi@yandex.ru](mailto:artemlitvi@yandex.ru).

**Lytvynov Artem Anatolyevich** – aspirant (PhD Candidate), Department of aircraft engines manufacturing, National Aerospace University of Ukraine N.E Zhukovskogo “KhAI”, Chkalova street, 17, Kharkov, Ukraine, 61070, tel.: 066-474-32-24; e-mail: [artemlitvi@yandex.ru](mailto:artemlitvi@yandex.ru).

**Волков Андрій Олегович** – аспірант, Кафедра технології виробництва авіаційних двигунів, Національний аерокосмічний університет ім. Н. Е. Жуковського «ХАІ», вул. Чкалова, 17, г. Харків, Україна, 61070, тел.: 099-664-10-07; e-mail: [Volkov Andrey O@mail.ru](mailto:Volkov Andrey O@mail.ru).

**Волков Андрей Олегович** – аспірант, Кафедра технологии производства авиационных двигателей, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», ул. Чкалова, 17, г. Харьков, Украина, 61070, тел.: 099-664-10-07; e-mail: [Volkov Andrey O@mail.ru](mailto:Volkov Andrey O@mail.ru).

**Volkov Andrew Olegovich** – aspirant (PhD Candidate), Department of aircraft engines manufacturing, National Aerospace University of Ukraine N.E Zhukovskogo “KhAI”, Chkalova street, 17, Kharkov, Ukraine, 61070, tel.: 099-664-10-07; e-mail: [Volkov Andrey O@mail.ru](mailto:Volkov Andrey O@mail.ru).

**Маркович Сергій Євгенійович** – кандидат технічних наук, доцент, Кафедра технології виробництва авіаційних двигунів, Національний аерокосмічний університет ім. Н. Е. Жуковського «ХАІ», вул. Чкалова, 17, г. Харків, Україна, 61070, тел.: 099-128-44-07; e-mail: [inv-project2006@yandex.ru](mailto:inv-project2006@yandex.ru).

**Маркович Сергей Евгеньевич** – кандидат технических наук, доцент, Кафедра технологии производства авиационных двигателей, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», ул. Чкалова, 17, г. Харьков, Украина, 61070, тел.: 099-128-44-07; e-mail: [inv-project2006@yandex.ru](mailto:inv-project2006@yandex.ru).

**Markovych Sergey Evgenievich** – candidate of technical sciences, Associate Professor, Department of aircraft engines manufacturing, National Aerospace University of Ukraine N.E Zhukovskogo “KhAI”, Chkalova street, 17, Kharkov, Ukraine, 61070, tel.: 099-128-44-07; e-mail: [inv-project2006@yandex.ru](mailto:inv-project2006@yandex.ru).

**Долматов Анатолій Іванович** – доктор технічних наук, професор, Кафедра технології виробництва авіаційних двигунів, Національний аерокосмічний університет ім. Н. Е. Жуковського «ХАІ», вул. Чкалова, 17, г. Харків, Україна, 61070, тел.: 067-939-02-89; e-mail: [dolmatov.ai@yandex.ru](mailto:dolmatov.ai@yandex.ru).

**Долматов Анатолий Иванович** – доктор технических наук, профессор, Кафедра технологии производства авиационных двигателей, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», ул. Чкалова, 17, г. Харьков, Украина, 61070, тел.: 067-939-02-89; e-mail: [dolmatov.ai@yandex.ru](mailto:dolmatov.ai@yandex.ru).

**Dolmatov Anatoly Ivanovich** – doctor of Technical Sciences, Professor, Department of aircraft engines manufacturing, National Aerospace University of Ukraine N.E Zhukovskogo “KhAI”, Chkalova street, 17, Kharkov, Ukraine, 61070, tel.: 067-939-02-89; e-mail: [dolmatov.ai@yandex.ru](mailto:dolmatov.ai@yandex.ru).