

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-3-216-222>

УДК 669.620.197

## Расчет оптимального угла конусности конфузора, используемого для реверсивно-струйной очистки металлических поверхностей от коррозии

Докт. техн. наук, проф. И. В. Качанов<sup>1)</sup>, инженеры А. Н. Жук<sup>1)</sup>, И. М. Шаталов<sup>1)</sup>, канд. физ.-мат. наук, доц. В. В. Веремеиук<sup>1)</sup>, канд. техн. наук А. В. Филипчик<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республик Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2019  
Belarusian National Technical University, 2019

**Реферат.** Для современного промышленного производства Республики Беларусь характерны отсутствие собственной сырьевой базы и существенная зависимость от импортных энергоносителей и материальных ресурсов, поставляемых по мировым ценам. При работе в данных условиях эффективность производства может быть достигнута за счет всемерной экономии и создания современных энерго- и ресурсосберегающих технологий. Однако реализация ряда таких технологий, например лазерной резки и сварки, плакирования, газопламенного напыления, покраски и т. д., напрямую зависит от качества очистки металлических поверхностей от коррозии. Теоретические и экспериментальные исследования, проведенные на кафедре «Кораблестроение и гидравлика» БНТУ, показали, что весьма экономично можно удалять с металлических поверхностей продукты коррозии, используя новую технологию реверсивно-струйной очистки. В ее основу положен физический принцип, заключающийся в том, что струя рабочей жидкости (пульпа на основе речного песка либо бентонитовой глины) при соударении с очищаемой поверхностью разворачивается на 180°, что приводит к усилению струйного воздействия на очищаемую поверхность в 1,5–2 раза за счет возникновения реактивной составляющей. Для обеспечения отмеченного разворота струи была разработана оригинальная конструкция корпуса, отличающаяся патентной новизной. Одним из основных элементов в этой конструкции является струеформирующее устройство, имеющее форму конфузора. Приведенные в статье теоретические исследования потерь напора рабочей жидкости в канале конфузора, основанные на исследовании функционала на экстремум, позволили получить зависимость для расчета оптимального угла конусности при турбулентном режиме движения в диапазоне чисел Рейнольдса  $4000 < Re < 3 \cdot 10^6$  с учетом влияния плотности рабочей жидкости, ее динамической или кинематической вязкости, средней скорости движения рабочей жидкости, радиусов конфузоров.

**Ключевые слова:** гидроабразивная очистка, конфузор, угол конусности, реверсивно-струйная очистка, металлическая поверхность, коррозия

**Для цитирования:** Расчет оптимального угла конусности конфузора, используемого для реверсивно-струйной очистки металлических поверхностей от коррозии / И. В. Качанов [и др.] // *Наука и техника*. 2019. Т. 18, № 3. С. 216–222. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-3-216-222>

## Calculation of Optimum Cone Angle in Confuser Used for Reversive-Jet Cleaning of Metal Surfaces against Corrosion

I. V. Kachanov<sup>1)</sup>, A. N. Zhuk<sup>1)</sup>, I. M. Shatalov<sup>1)</sup>, V. V. Veremenyuk<sup>1)</sup>, A. V. Filipchik<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** The modern industrial production of the Republic of Belarus is characterized by the absence of its own raw material base and significant dependence on imported energy carriers and material resources supplied at world prices. When working in such conditions, production efficiency can be achieved through all-round economy and creation of modern energy-

### Адрес для переписки

Жук Андрей Николаевич  
Белорусский национальный технический университет  
просп. Независимости, 65,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 292-76-77  
[hidrokaf@bntu.by](mailto:hidrokaf@bntu.by)

### Address for correspondence

Zhuk Andrey N.  
Belarusian National Technical University  
65 Nezavisimosty Ave.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 292-76-77  
[hidrokaf@bntu.by](mailto:hidrokaf@bntu.by)

and resource-saving technologies. However implementation of such technologies, for example, laser cutting and welding, cladding, flame spraying, painting, etc. directly depends on quality of cleaning metal surfaces from corrosion. Theoretical and experimental studies conducted at the Department of Shipbuilding and Hydraulics of the Belarusian National Technical University have shown that it is very economical to remove corrosion products from metal surfaces using new technology of reverse jet cleaning. The reverse jet cleaning technology is based on a physical principle which presupposes that a jet of working fluid (pulp based on river sand or bentonite clay) rotates  $180^\circ$  when it hits the surface to be cleaned and it leads to an increase in jet impact on the surface to be cleaned by 1.5–2 times due to occurrence of a reactive component. In order to ensure a marked jet reversal an original case design has been developed which is characterized by a patent novelty. One of the main elements in this design is a confuser-shaped stream-forming device. Theoretical investigations on pressure losses of working fluid in a confuser channel which are based on the study of functional at the extremum have made it possible to obtain a dependence for calculation of an optimal cone angle at a turbulent mode of motion within the range of Reynolds numbers  $4000 < Re < 3 \cdot 10^6$  while taking into account an influence of working fluid density, its dynamic or kinematic viscosity, average velocity movement of working fluid, confuser radii.

**Keywords:** hydro-abrasive cleaning, confuser, cone angle, reverse-jet cleaning, metal surface, corrosion

**For citation:** Kachanov I. V., Zhuk A. N., Shatalov I. M., Veremenyuk V. V., Filipchik A. V. (2019) Calculation of Optimum Cone Angle in Confuser Used for Reversible-Jet Cleaning of Metal Surfaces against Corrosion. *Science and Technique*. 18 (3), 216–222. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-3-216-222> (in Russian)

## Введение

В промышленности и гидроэнергетике Республики Беларусь используется огромное количество (сотни тысяч тонн) металлических изделий (например, листовой и профильной стали), которые подвергаются коррозии.

В настоящее время наиболее эффективным и универсальным способом очистки этих поверхностей является гидроабразивная очистка (ГАО) с реверсивной струйной очисткой (PCO). Основной рабочий элемент установки ГАО с PCO – конфузор [1–4], позволяющий сформировать струю рабочей жидкости с заданными энергетическими характеристиками.

Анализ патентно-информационных источников [1–11] показывает, что задача по определению оптимального угла конусности конфузоров до настоящего времени не получила корректного решения. Процесс формирования струи в конфузорах определяется соотношением площадей входного и выходного отверстий и конфигурацией каналов.

Струеформирующее устройство PCO должно формировать высокоскоростную компактную струю рабочей жидкости, что связано с оптимальным профилем конфузора. Оптимальный профиль конфузора, в свою очередь, тесно связан с углом конусности  $\alpha$ .

Ранее проведенные исследования по определению оптимального угла конусности конфузоров позволяют сделать следующие выводы [5]:

- коэффициент скорости  $\varphi$  с увеличением угла конусности конфузора  $\alpha$  от  $0$  до  $45^\circ$  возрастает от  $0,82$  до  $0,98$ ;

- коэффициент расхода  $\mu$  при увеличении угла конусности от  $0$  до  $13^\circ$  резко возрастает, а при дальнейшем изменении  $\alpha$  коэффициент  $\mu$  медленно убывает;

- коэффициент скорости  $\varphi$  достигает максимального значения при угле конусности  $45^\circ$ , а максимальный коэффициент расхода  $\mu$  отмечается при угле конусности, равном  $13^\circ$ .

Анализ ранее полученных выводов показывает, что они достаточно противоречивы и требуют детального уточнения, а также не имеют однозначного математического обоснования.

## Основная часть

С целью математического обоснования оптимального угла конусности  $\alpha$  конфузора струеформирующего устройства была решена вариационная задача по минимизации потерь напора в потоке жидкости, проходящей через конфузор. При расчете конфузора полная потеря напора на трение определялась как сумма двух видов потерь напора (исходя из классических представлений о потерях напора): потерь напора на трение по длине  $h_{тр}$  и местных потерь напора на плавное сужение  $h_{п.с}$  [12–15], т. е.

$$h = h_{тр} + h_{п.с}. \quad (1)$$

Потеря напора на трение по длине рассчитывалась с использованием формулы Дарси – Вейсбаха, записанной в дифференциальном виде. Для расчета принимался цилиндрический конфузор с прямолинейной образующей и с углом  $\alpha$  при вершине. Обозначим радиус вход-

ного отверстия конфузора через  $r_1$ , а выходного  $r_2$  (рис. 1).

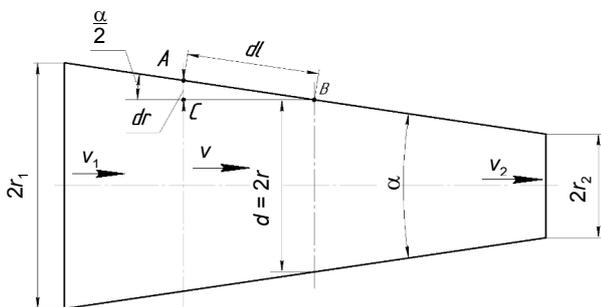


Рис. 1. Расчетная схема конфузора, принятая для определения оптимального угла конусности  $\alpha_{\text{опт}}$

Fig. 1. Computational scheme of confuser accepted for determination of optimum cone angle  $\alpha_{\text{опт}}$

Так как радиус сечения  $r$  конфузора и средняя скорость движения жидкости  $v$  вдоль конфузора являются величинами переменными, то для элементарного отрезка конфузора  $dl$  можно записать следующую формулу для определения потерь напора на трение по длине:

$$dh_{\text{тр}} = \lambda \frac{dl}{2r} \frac{v^2}{2g}, \quad (2)$$

где  $\lambda$  – гидравлический коэффициент трения;  $v$  – средняя скорость в произвольно взятом сечении  $r$ ;  $dl$  – элементарная длина участка образующей конфузора, величина которой определяется из прямоугольного треугольника  $ABC$  (рис. 1) по формуле

$$dl = \frac{dr}{\sin \frac{\alpha}{2}}, \quad (3)$$

$dr$  – приращение радиуса конфузора на бесконечно малом расстоянии  $dl$  между его живыми сечениями.

Используя уравнение неразрывности и сплошности потока жидкости при установившемся движении, можно записать выражение для определения значения средней скорости на элементарном участке  $dl$

$$v = v_2 \left( \frac{r_2}{r} \right)^2, \quad (4)$$

где  $v_2$  – скорость на выходе из конфузора (рис. 1);  $r, r_2$  – радиус в произвольном и выходном сечениях.

Подставив (3) и (4) в формулу (2) и выполнив интегрирование по длине образующей

вдоль всего конфузора, считая при этом величину коэффициента  $\lambda$  постоянной, получим:

$$h_{\text{тр}} = \frac{\lambda}{8 \sin \frac{\alpha}{2}} (1 - n^4) \frac{v_2^2}{2g}, \quad (5)$$

где  $n = \frac{r_2}{r_1}$  – степень сужения конфузора;  $\alpha$  – угол конусности конфузора,  $\alpha \in (0; 180^\circ)$ .

Однако, как показывает инженерная практика эксплуатации трубопроводных систем, гидравлический коэффициент трения  $\lambda$  в широком диапазоне чисел  $Re$  является величиной переменной. В этом случае  $\lambda$  при турбулентном режиме движения в диапазоне  $400 < Re < 3 \cdot 10^6$  для цилиндрических труб рекомендуется определять по формуле П. К. Конакова [12, 13]

$$\lambda = \frac{1}{(1,81 \cdot \lg Re - 1,52)^2}, \quad (6)$$

где  $Re$  – число Рейнольдса, определяемое из формулы

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu} = \frac{2 \rho v r}{\mu} = \frac{2 \rho v_2 r_2^2}{\mu r}, \quad (7)$$

$v = v_2 \left( \frac{r_2}{r} \right)^2$  – средняя скорость движения жид-

кости на участке  $dl$  конфузора;  $\rho$  – плотность жидкости;  $\mu$  – динамический коэффициент вязкости жидкости;  $d = 2r$  – диаметр поперечного сечения конфузора на элементарном участке  $dl$ .

Использование (6) и (7) в (2) в данном случае затруднительно (появляется интеграл, который невозможно вычислить в явном виде). В связи с этим методом наименьших квадратов была получена формула для определения коэффициента  $\lambda$ , практически идентичная формуле П. Г. Конакова, в следующем виде:

$$\lambda = 0,016184 \cdot \left( 0,2326 + \frac{0,0556}{\sqrt{x}} + 0,4185x^{-0,2135} \right), \quad (8)$$

где  $x = \frac{Re}{10^6}$ , при этом  $4000 < Re < 3 \cdot 10^6$ .

В указанном промежутке изменения чисел  $Re$  значения  $\lambda$ , найденные по (6) и (8), отличаются друг от друга менее чем на  $3 \cdot 10^{-4}$  (по абсолютной величине), или на 1 % (относительная погрешность). Поэтому в дальнейшем

решении вместо (6) будем использовать формулу (8).

Подставляя (3), (4), (7) и (8) в уравнение (2), получим

$$dh_{\text{тр}} = \left( \frac{0,2326}{r^5} + \frac{55,6}{\sqrt{A}r^{4,5}} + \frac{7,9927}{A^{0,2135}r^{4,7865}} \right) \frac{Bdr}{\sin \frac{\alpha}{2}}, \quad (9)$$

где  $A = \frac{2\rho v_2 r_2^2}{\mu}$ ;  $B = \frac{0,00405 v_2^2 r_2^4}{g}$ .

Интегрируя (9) на отрезке  $[r_1; r_2]$ , находим выражение для потери напора на трение по длине

$$h_{\text{тр}} = \left[ 0,0582(1-n^4) + \frac{15,886(1-n^{3,5})\sqrt{r_2}}{\sqrt{A}} + \frac{2,111(1-n^{3,7865})r_2^{0,2135}}{A^{0,2135}} \right] \cdot \frac{B_1}{\sin \frac{\alpha}{2}}, \quad (10)$$

где  $B_1 = \frac{0,00405 v_2^2}{g}$ ;  $n = \frac{r_2}{r_1} < 1$  – степень сужения конфузора.

В целях сокращения дальнейших выкладок введем в рассмотрение коэффициент

$$C_{\text{тр}} = \left[ B_1 0,0582(1-n^4) + \frac{15,886(1-n^{3,5})\sqrt{r_2}}{\sqrt{A}} + \frac{2,111(1-n^{3,7865})r_2^{0,2135}}{A^{0,2135}} \right] \quad (11)$$

и получим выражение для потерь напора по длине в следующем виде:

$$h_{\text{тр}} = \frac{C_{\text{тр}}}{\sin \frac{\alpha}{2}}. \quad (12)$$

При расчете местных потерь напора на плавное сужение используем классическую формулу Вейсбаха [12]

$$h_{\text{п.с}} = \zeta_{\text{п.с}} \frac{v_2^2}{2g}, \quad (13)$$

где  $\zeta_{\text{п.с}}$  – коэффициент гидравлического сопротивления на плавное сужение, который в соответствии с рекомендациями [12, 13] можно определить по формуле

$$\zeta_{\text{п.с}} = k_{\text{п.с}} \left( \frac{1}{\varepsilon} - 1 \right)^2, \quad (14)$$

$k_{\text{п.с}}$  – коэффициент смягчения;  $\varepsilon$  – то же сжатия струи, по данным [13]

$$\varepsilon = 0,57 + \frac{0,043}{1,1-n^2}. \quad (15)$$

По графической зависимости  $k_{\text{п.с}} = f(\alpha)$ , полученной А. Д. Альтшулем и А. И. Калицуном [13], используя метод наименьших квадратов, получим следующее выражение для коэффициента смягчения:

$$k_{\text{п.с}} = 0,6 \left( \sin \frac{\alpha}{2} \right)^{3,45} + \frac{0,0138}{\sin \frac{\alpha}{2}} + 0,13. \quad (16)$$

Выражение (1) для определения полной потери напора на трение в конфузоре с учетом (12), (13), (14) и (16) запишется в следующем виде:

$$h(\alpha) = \frac{C_{\text{тр}}}{\sin \frac{\alpha}{2}} + \left( 0,6 \left( \sin \frac{\alpha}{2} \right)^{3,45} + \frac{0,0138}{\sin \frac{\alpha}{2}} + 0,13 \right) C_n, \quad (17)$$

где  $C_n = \left( \frac{1}{\varepsilon} - 1 \right)^2 \frac{v_2^2}{2g}$ .

Для определения оптимального угла конусности  $\alpha_{\text{опт}}$ , при котором полные потери напора на трение будут минимальными, исследуем на экстремум (17). Для этого решаем  $\frac{dh}{d\alpha} = 0$ .

Это уравнение при выполнении условия

$$C_{\text{тр}} < 2,0562 C_n \quad (18)$$

имеет в интервале  $(0; 180^\circ)$  единственное решение  $\alpha_{\text{опт}}$  (если (18) не выполнено, то решения нет)

$$\begin{aligned} \alpha_{\text{опт}} &= 2 \arcsin \left( \frac{C_{\text{тр}} + 0,0138 C_n}{2,07 C_n} \right)^{\frac{4}{19}} = \\ &= 2 \arcsin \left( \frac{C_{\text{тр}}}{2,07 C_n} + 0,0067 \right)^{\frac{4}{19}}. \end{aligned} \quad (19)$$

Так как функция потерь  $h(\alpha) \rightarrow +\infty$  при  $\alpha \rightarrow 0$  и ее производная  $h'(\alpha) > 0$  при  $\alpha \rightarrow \pi$ , ее единственная критическая точка  $\alpha_{\text{опт}}$  на интервале  $(0; 180^\circ)$  является точкой минимума этой функции.

Учитывая равенства (11) и (15), можно предложить при использовании (19) применить равенство

$$\frac{C_{тр}}{2,07C_n} = N_0 \left( N_1 + N_2 \sqrt{z} + N_3 z^{0,2135} \right), \quad (20)$$

где  $z = \frac{\mu}{2\rho v_2 r_2}$ ;  $N_0 = 0,022 \frac{(1 - 0,85n^2)^2}{(1 - n^2)^2}$ ;

$$N_1 = 0,0582(1 - n^4); \quad N_2 = 15,886(1 - n^{3,5});$$

$$N_3 = 2,111(1 - n^{3,7865}).$$

Анализ расчетов по формуле (19) показывает, что для конструктивно обоснованных значений параметров, входящих в (19), условие разрешимости (18) выполняется, а минимальные потери напора и, как следствие, максимальное воздействие струи рабочей жидкости будут отмечаться при значении угла конусности  $\alpha_{опт} = 39-43^\circ$  (рис. 2).

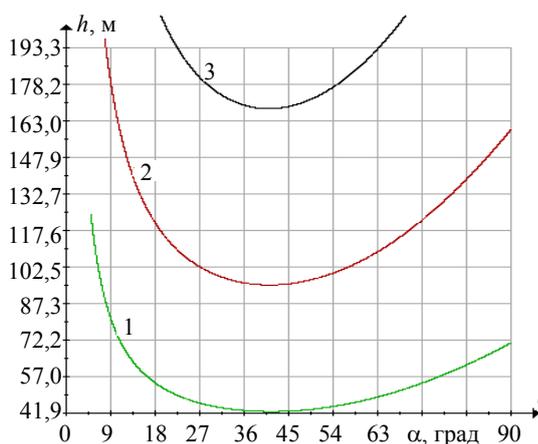


Рис. 2. Зависимость полных потерь напора  $h$  от угла конусности  $\alpha$  при изменении выходной скорости  $v_2$ :

1 –  $v_2 = 100$  м/с; 2 – 150; 3 – 200 м/с;  
 $n = 0,1429$ ;  $r_2 = 1$  мм;  $\nu = 3,5 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с

Fig. 2. Dependence of total pressure losses  $h$  on cone angle  $\alpha$  when changing output speed  $v_2$ :

1 –  $v_2 = 100$  m/s; 2 – 150; 3 – 200 m/s;  
 $n = 0.1429$ ;  $r_2 = 1$  mm;  $\nu = 3.5 \cdot 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s

Проведенные теоретические исследования оптимального угла конусности струеформирующего конфузора позволили получить математическую зависимость (19) для определения оптимального по энергозатратам угла конусности конфузора  $\alpha_{опт}$  с учетом широкого диапазона чисел Re (от 4000 до  $3 \cdot 10^6$ ) для турбулентного режима движения рабочей жидкости.

Отличительной особенностью формулы (19) следует считать возможность учета влияния на

величину угла  $\alpha_{опт}$  таких важных гидродинамических и конструктивных параметров, как динамическая вязкость  $\mu$  и плотность рабочей жидкости  $\rho$ , средняя скорость струи на выходе из конфузора  $v_2$  и выходной радиус конфузора  $r_2$  (рис. 3–6). Анализ полученных математических и графических зависимостей показывает следующее:

1. При изменении степени сужения конфузора  $n$  (рис. 3) в пределах 0–0,9 оптимальный угол конфузора  $\alpha_{опт}$  изменяется незначительно и находится в пределах  $40,5-41,5^\circ$ , т. е. оптимальным углом в этом случае можно считать  $\alpha_{опт} = 41^\circ$ .

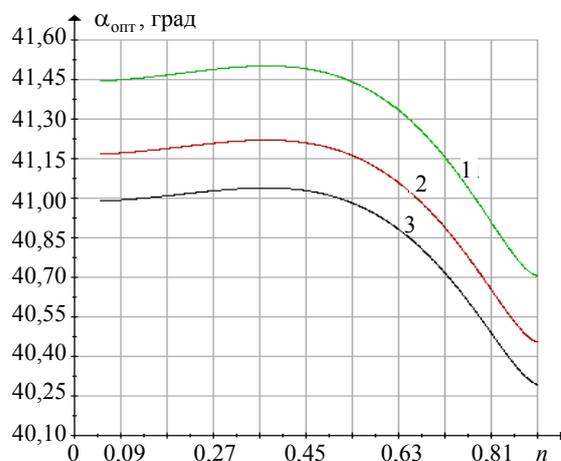


Рис. 3. Зависимость оптимального угла  $\alpha_{опт}$  от степени сужения конфузора  $n = r_2/r_1$ : 1 –  $v_2 = 100$  м/с; 2 – 150; 3 – 200 м/с;  $\nu = 3,5 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с;  $r_2 = 1$  мм

Fig. 3. Dependence of optimum angle  $\alpha_{опт}$  on degree of confuser narrowing  $n = r_2/r_1$ : 1 –  $v_2 = 100$  m/s; 2 – 150; 3 – 200 m/s;  $\nu = 3.5 \cdot 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s;  $r_2 = 1$  mm

2. Изменение (повышение) динамической вязкости  $\mu$  и плотности  $\rho$ , которые можно выразить универсальным коэффициентом кинематической вязкости  $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ , приводит к увеличению значения оптимального угла конусности  $\alpha_{опт}$  (рис. 4), который также изменяется в небольшом диапазоне значений от 40 до  $42^\circ$ , т. е. в среднем оптимальным углом конусности конфузора можно считать  $\alpha_{опт} \approx 41^\circ$ .

3. Изменение (увеличение) выходной скорости из конфузора  $v_2$  (рис. 5) приводит к уменьшению значения оптимального угла конусности конфузора  $\alpha_{опт}$  в пределах от  $45$  до  $41^\circ$ . Здесь следует обратить внимание на то, что для качественной очистки металлических поверх-

ностей от коррозии требуется изменение скорости движения рабочей жидкости из конфузора в пределах 100–200 м/с, что, в свою очередь, соответствует оптимальному углу конусности конфузора  $\alpha_{\text{опт}} = 41\text{--}42^\circ$  (т. е. среднее значение  $\alpha_{\text{опт}} = 41,5^\circ$ ).

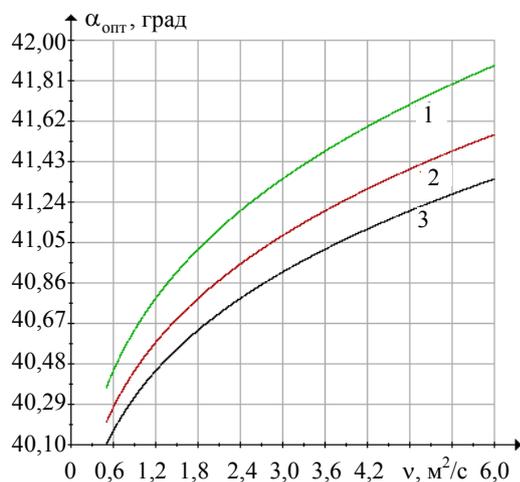


Рис. 4. Зависимость оптимального угла  $\alpha_{\text{опт}}$  от изменения кинематического коэффициента вязкости  $\nu = \mu/\rho$ : 1 –  $\nu_2 = 100$  м/с; 2 – 150; 3 – 200 м/с;  $n = 0,1429$ ;  $r_2 = 1$  мм

Fig. 4. Dependence of optimum angle  $\alpha_{\text{опт}}$  (in degrees) on change in kinematic viscosity coefficient  $\nu = \mu/\rho$ : 1 –  $\nu_2 = 100$  м/с; 2 – 150; 3 – 200 м/с;  $n = 0,1429$ ;  $r_2 = 1$  мм

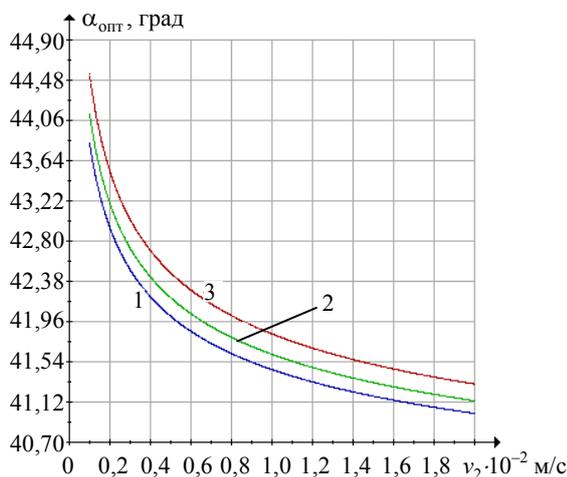


Рис. 5. Зависимость оптимального угла  $\alpha_{\text{опт}}$  от скорости  $v_2$  на выходе из конфузора: 1 –  $\nu = 3,5 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с; 2 –  $4,33 \cdot 10^{-6}$ ; 3 –  $5,65 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с;  $r_2 = 1$  мм;  $n = 0,1429$

Fig. 5. Dependence of optimum angle  $\alpha_{\text{опт}}$  on velocity  $v_2$  at exit from confuser: 1 –  $\nu = 3,5 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с; 2 –  $4,33 \cdot 10^{-6}$ ; 3 –  $5,65 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с;  $r_2 = 1$  мм;  $n = 0,1429$

4. Размеры выходного отверстия конфузора, которые выражают через диаметр или радиус  $r_2$ , в реальной практике очистки металлических поверхностей обычно изменяются в пределах  $r_2 = 0,5\text{--}2,0$  мм, что соответствует оптимальному углу конусности конфузора (согласно рис. 6)  $\alpha_{\text{опт}} = 41\text{--}42^\circ$  (т. е.  $\bar{\alpha}_{\text{опт}} \approx 41,5^\circ$ ).

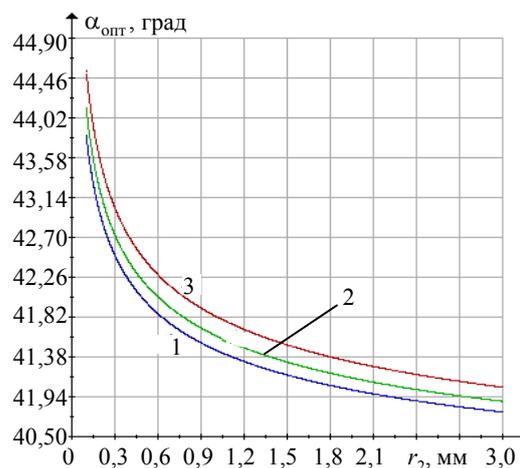


Рис. 6. Зависимость оптимального угла  $\alpha_{\text{опт}}$  от выходного радиуса отверстия конфузора  $r_2$ : 1 –  $\nu = 3,5 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с; 2 –  $4,33 \cdot 10^{-6}$ ; 3 –  $5,65 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с;  $\nu_2 = 100$  м/с;  $n = 0,1429$

Fig. 6. Dependence of optimum angle  $\alpha_{\text{опт}}$  on output radius of confuser opening  $r_2$ : 1 –  $\nu = 3,5 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с; 2 –  $4,33 \cdot 10^{-6}$ ; 3 –  $5,65 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с;  $\nu_2 = 100$  м/с;  $n = 0,1429$

Приведенный выше анализ изменения значений оптимального угла конусности конфузора  $\alpha_{\text{опт}}$  установки РСО в зависимости от физических свойств рабочей жидкости ( $\mu$ ,  $\nu$ ,  $\rho$ ,  $\nu_2$ ) и геометрических размеров конфузора ( $n$ ,  $r_2$ ) показывает, что этот оптимальный угол конусности находится в пределах  $40\text{--}42^\circ$  и хорошо согласуется с оптимальным углом конусности конфузора ( $\alpha_{\text{опт}} = 39\text{--}43^\circ$ ), выбранным из условия минимальных гидравлических потерь  $h_{\text{мин}}$  при работе установки РСО. Отсюда следует вывод, что оптимальным диапазоном углов конусности конфузора установки РСО является  $\alpha_{\text{опт}} = 39\text{--}43^\circ$ .

## ВЫВОДЫ

1. Получена математическая зависимость для определения оптимального (по потерям напора) угла конусности конфузора  $\alpha_{\text{опт}}$  с учетом динамической вязкости, кинематического коэффициента вязкости и плотности рабочей среды ( $\mu$ ,  $\nu$ ,  $\rho$ ), средней скорости струи на выходе из конфузора  $v_2$  и степени сужения конфузора  $n$ .

2. На основании полученной зависимости построены кривые изменения оптимального угла конусности конфузора  $\alpha_{\text{опт}} = f(n)$ ,  $\alpha_{\text{опт}} = f(n)$ ,

$$\alpha_{\text{опт}} = f\left(v = \frac{\mu}{\rho}\right), \alpha_{\text{опт}} = f(r_2) \text{ и } \alpha_{\text{опт}} = f(v_2),$$

которые согласуются с результатами ряда исследований [5–7] и позволяют сделать вывод, что оптимальным углом конусности конфузора является угол  $\alpha_{\text{опт}} = 39\text{--}43^\circ$  (т. е.  $\bar{\alpha}_{\text{опт}} = 41^\circ$ ).

3. Зависимость (19) может рекомендоваться для использования в расчетах оптимизации гидродинамических параметров течения жидкости в конически сходящихся полостях, включая конфузоры.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Способы очистки металлических поверхностей: пат. № 21512, Респ. Беларусь, МПК В 08В 3/04 / И. В. Качанов, А. Н. Жук, А. В. Филиппчик, А. С. Исаенко; дата публ. 30.12.2017.
2. Состав рабочей жидкости для гидродинамической очистки металлических поверхностей от коррозии перед лазерной резкой: пат. № 21455, Респ. Беларусь, МПК В08В 3/02; 13 08В 3/04 / И. В. Качанов, А. Н. Жук, А. Н. Яглов, А. В. Филиппчик; дата публ. 30.10.2017.
3. Устройство для очистки от коррозии плоской стальной поверхности: пат. № 16526, Респ. Беларусь, МПК В 08В 3/00; В 63В 59/08 / И. В. Качанов, А. Н. Жук, В. Н. Шарий, Р. О. Мяделец; дата публ. 30.10.2012.
4. Устройство для очистки от коррозии плоской стальной поверхности: пат. № 19543, Респ. Беларусь, МПК В 63В 59/08 / И. В. Качанов, А. Н. Жук, И. М. Шаталов, В. Н. Шарий; дата публ. 30.10.2015.
5. Технология струйной гидроабразивной очистки и защиты от коррозии стальных изделий с применением бентонитовой глины / И. В. Качанов [и др.]. Минск: БНТУ, 2006. 168 с.
6. Расчет оптимального угла конусности конфузора / И. В. Качанов [и др.] // Агропанорама. 2005. № 5. С. 7–10.
7. Агасарян, Р. Р. Струйно-абразивная обработка металлов / Р. Р. Агасарян, Р. Т. Дохинян. Ереван: АтрНИИНТИ, 1990. 51 с.
8. Меркулов, В. Н. Перспективные процессы гидрообработки материалов в машиностроении (зарубежный опыт) / В. Н. Меркулов. Киев: УкрНИИНТИ, 1987. 10 с.
9. Гидрорезание судостроительных материалов / Р. А. Тихомиров [и др.]. Л.: Судостроение, 1987. 164 с.
10. Бадах, В. Н. Особенности гидродинамики проточной части гидравлических струйных усилителей и их влияние на выходные характеристики / В. Н. Бадах. Киев, 1984. 18 с.
11. Бочаров, В. П. Расчет и проектирование устройств гидравлической струйной техники / В. П. Бочаров. Киев: Техник, 1987. 12 с.
12. Альтшуль, А. Д. Гидравлика и аэродинамика (Основы механики жидкости) / А. Д. Альтшуль, П. Г. Киселев. М.: Стройиздат, 1975. 323 с.
13. Альтшуль, А. Д. Гидравлические сопротивления / А. Д. Альтшуль. М.: Недра, 1982. 224 с.

14. Гидравлика, гидравлические машины и гидравлические приводы / Т. М. Башта [и др.]. М.: Машиностроение, 1970. 504 с.
15. Куколевский, И. И. Задачник по гидравлике / И. И. Куколевский, Л. Г. Подвидз. М.: Госэнергоиздат, 1960. 440 с.

Поступила 25.10.2018

Подписана в печать 10.01.2019

Опубликована онлайн 30.05.2019

#### REFERENCES

1. Kachanov I. V., Zhuk A. N., Filipchik A. V., Isaenko A. S. (2017) *Methods for Cleaning of Metal Surfaces*. Patent Republic of Belarus No 21512 (in Russian).
2. Kachanov I. V., Zhuk A. N., Yaglov A. N., Filipchik A. V. (2017) *Composition of Pressure Fluid for Hydrodynamic Cleaning of Metal Surfaces Against Corrosion Prior to Laser Cutting*. Patent Republic of Belarus No 21455 (in Russian).
3. Kachanov I. V., Zhuk A. N., Sharyi V. N., Miadelets R. O. (2012) *Device for Cleaning of plane Steel Surface Against Corrosion*. Patent Republic of Belarus No 16526 (in Russian).
4. Kachanov I. V., Zhuk A. N., Shatalov I. M., Sharyi V. N. (2015) *Device for Cleaning of Plane Steel Surface Against Corrosion*. Patent Republic of Belarus No 19543 (in Russian).
5. Kachanov I. V., Filipchik A. V., Babich V. E., Zhuk A. N., Ushev S. I. (2006) *Technology of Hydro Abrasive Blasting and Protection of Steel Items Against Corrosion while Using Bentonite Clay*. Minsk, Belarusian National Technical University. 168 (in Russian).
6. Kachanov I. V., Veremenyuk V. V., Moisa A. S., Filipchik A. V. (2005) Calculation of Optimum Angle for Con-fuser Obliqueness. *Agropanorama*, (5), 7–10 (in Russian).
7. Agasaryan R. R., Dokhinyan R. T. (1990) *Abrasive-Jet Machining of Metals*. Yerevan, Armenian Scientific-Research Institute for Technical Information. 51 (in Russian).
8. Merkulov V. N. (1987) *Prospective Processes of Material Hydro-Processing in Mechanical Engineering (International Experience)*. Kiev, Ukrainian Scientific-Research Institute for Technical Information. 10 (in Russian).
9. Tikhomirov R. A., Babanin V. F., Petukhov E. N. [et al.] (1987) *Hydraulic Cutting of Shipbuilding Materials*. Leningrad, Sudostroenie Publ. 164 (in Russian).
10. Badakh V. N. (1984) *Peculiar Features of Hydrodynamics for Flow Section of Hydraulic Fluid-Jet Amplifier and their Influence on Output Characteristics*. Kiev. 18 (in Russian).
11. Bocharov V. P. (1987) Calculation and Design of Devices Representing Hydraulic Jet Equipment. Kiev, Tekhnik Publ. 12 (in Russian).
12. Altshul A. D., Kiselev P. G. (1975) *Hydraulics and Aerodynamics (Fundamentals of Fluid Mechanics)*. Moscow, Stroyizdat Publ. 323 (in Russian).
13. Altshul A. D. (1982) *Hydraulic Resistance*. Moscow, Nedra Publ. 224 (in Russian).
14. Bashta T. M., Rudnev S. S., Nekrasov B. B., Baibakov O. V., Kirillovskii Yu. L. (1970) *Hydraulics, Hydraulic Machinery and Hydraulic Drives*. Moscow, Mashinostroyeniye Publ. 504 (in Russian).
15. Kukolevskii I. I., Podvidz L. G. (1960) *Problem Book for Hydraulics*. Moscow, Gosenergoizdat Publ. 440 (in Russian).

Received: 25.10.2018

Accepted: 10.01.2019

Published online: 30.05.2019