

В. С. Ковалевич, И. В. Качанов, И. М. Шаталов, В. В. Веремениук, А. В. Филипчик

Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

ОПТИМИЗАЦИЯ УГЛА КОНУСНОСТИ КОНФУЗОРА СТРУЙНОГО АППАРАТА, ИСПОЛЬЗУЕМОГО ДЛЯ РЕВЕРСИВНО-СТРУЙНОЙ ОЧИСТКИ ГРЕБНЫХ ВИНТОВ ОТ КОРРОЗИИ

Аннотация. Приведена новая технология реверсивно-струйной очистки (РСО), разработанная авторами, с помощью которой можно весьма эффективно удалять продукты коррозии с различных поверхностей, в том числе и с металлической поверхности гребного винта. В основу данной технологии 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. Одним из основных элементов в этой конструкции является струеформирующее устройство, имеющее форму конфузора. Приведенные теоретические исследования потерь напора рабочей жидкости в канале конфузора основаны на исследовании функции потерь напора на экстремум. Это позволило получить зависимость для расчета оптимального угла конусности в широком диапазоне чисел Рейнольдса, характеризующих турбулентный режим движения с учетом влияния плотности рабочей жидкости, ее динамической вязкости, средней скорости движения рабочей жидкости, радиуса конфузора. Также определена зависимость от коэффициента эквивалентной шероховатости, то есть от постепенного износа канала конфузора. Полученное авторами выражение для расчета оптимального угла конусности конфузора может быть рекомендовано при проектировании аппаратов струйной очистки и других установок струйной техники.

Ключевые слова: гидробразивная очистка, конфузор, угол конусности, реверсивно-струйная очистка, металлическая поверхность, коррозия, эквивалентная шероховатость

Для цитирования: Оптимизация угла конусности конфузора струйного аппарата, используемого для реверсивно-струйной очистки гребных винтов от коррозии / В. С. Ковалевич [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2021. – Т. 66, № 2. – С. 194–201. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-2-194-201>

Vitaly S. Kovalevich, Igor V. Kachanov, Igor M. Shatalov, Valentin V. Veremenyuk, Alexey V. Filipchik

Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

OPTIMIZATION OF THE TAPER ANGLE OF THE JETTER CONFUSER USED FOR REVERSIBLE BLAST CLEANING OF PROPELLERS FROM CORROSION

Abstract. It is shown that it is very effective to remove corrosion products from various surfaces, including the metal surface of the propeller, using the new technology of reverse-jet cleaning (RJC) developed by the authors. The RJS technology is based on the physical principle that the jet of the working fluid (pulp based on river sand or bentonite clay), upon impact with the surface to be cleaned, turns 180° , which leads to an increase in the jet effect on the surface to be cleaned by 1.5–2 times due to the occurrence of the reactive component. To ensure the marked turn of the jet, an original design of the body was developed, which is distinguished by a patent novelty. One of the main elements in this design is a jet-forming device in the form of a confuser. The presented theoretical studies of the pressure loss of the working fluid in the confuser channel, based on the study of the pressure loss function to the extremum, which made it possible to obtain a dependence for calculating the optimal taper angle in a wide range of Reynolds numbers characterizing the turbulent mode of motion taking into account the influence of the working fluid density and its dynamic viscosity, the average speed of movement of the working fluid, the radius of the confuser, as well as the coefficient of equivalent roughness, i.e. from gradual wear of the confuser channel. The resulting dependence can be recommended for calculation in the design of jet cleaning devices and other installations of jet technology.

Keywords: hydro abrasive cleaning, confuser, taper angle, reverse-jet cleaning, metal surface, corrosion, equivalent roughness

For citation: Kovalevich V. S., Kachanov I. V., Shatalov I. M., Veremenyuk V. V., Filipchik A. V. Optimization of the taper angle of the jetter confuser used for reversible blast cleaning of propellers from corrosion. *Vesti Natsyonal'noi akademii nauk Belarusi. Seriya fizika-technichnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2021, vol. 66, no. 1, pp. 194–201 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-2-194-201>

Введение. Наиболее универсальным и эффективным методом очистки металлических поверхностей, в том числе и поверхностей гребных винтов от коррозии, является способ гидроабразивной очистки с реверсивно-струйным режимом обработки. Основным рабочим элементом установки реверсивно-струйной очистки (РСО) является конфузор (патент Республики Беларусь 19543 «Устройство для очистки от коррозии плоской стальной поверхности», автор – И. В. Качанов).

Аналитический обзор литературных источников [1–8] показывает, что корректного решения задачи по определению оптимального угла конусности конфузора до настоящего момента найдено не было. Конфигурация канала конфузора, а также соотношение площадей входного и выходного отверстий напрямую определяют процесс формирования потока рабочей жидкости. Для создания высокоскоростного потока рабочей жидкости струеформирующий аппарат РСО должен обладать оптимальным профилем конфузора, который тесно связан с углом конусности α .

Проведенные ранее исследования по определению оптимального угла конусности конфузоров [1] позволяют сделать следующие выводы:

коэффициент скорости φ с увеличением угла конусности конфузора α от 0 до 45° возрастает от 0,82 до 0,98;

коэффициент расхода μ при увеличении угла конусности от 0–13° резко возрастает, а при дальнейшем изменении α коэффициент μ медленно убывает;

коэффициент скорости φ достигает максимального значения при угле конусности 45°, а максимальный коэффициент расхода μ отмечается при угле конусности, равном 13°.

Анализ ранее полученных выводов, показывает, что они получены эмпирическим путем и достаточно противоречивы. Поэтому целью данной работы явилось детальное уточнение, а также теоретическое (математическое) обоснование выбора оптимального угла конусности конфузора струйного аппарата.

Методика определения оптимального угла конусности. С целью теоретического (математического) обоснования оптимального угла конусности α конфузора струеформирующего устройства была решена вариационная задача по минимизации потерь напора в потоке жидкости, который проходит через канал конфузора. При расчете конфузора полная потеря напора на трение определялась как сумма двух видов потерь напора (исходя из классических представлений о потерях напора): потери напора на трение по длине $h_{тр}$ и местные потери напора на плавное сужение $h_{п.с}$ [9, 10]:

$$h = h_{тр} + h_{п.с}. \tag{1}$$

Потеря напора на трение по длине рассчитывалась с использованием формулы Дарси–Вейсбаха, записанной в дифференциальном виде. Для расчета принимался конфузор круглого сечения с прямолинейной образующей и с углом α при вершине. Обозначим радиус входного отверстия конфузора через r_1 , а выходного – r_2 (рис. 1).

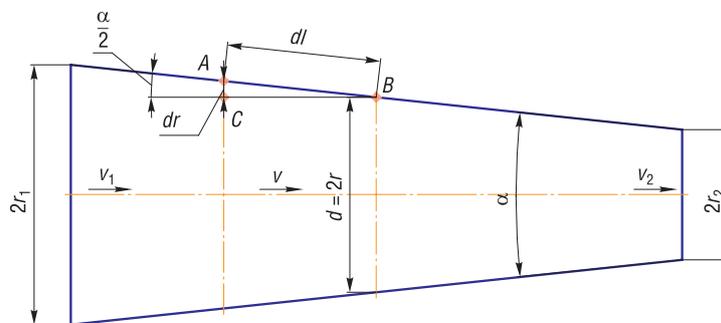


Рис. 1. Расчетная схема конфузора, принятая для определения оптимального угла конусности $\alpha_{опт}$

Fig. 1. Design scheme of the confuser, adopted to determine the optimal angle tapers α_{opt}

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

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

где λ – 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

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

где dr – приращение радиуса конфузора на бесконечно малом расстоянии dl между его живыми сечениями; α – угол конусности конфузора, $\alpha \in (0; 180^\circ)$.

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).

Подставив выражения (3) и (4) в (2), получаем:

$$dh_{\text{тр}} = \lambda \frac{v_2^2}{4g \sin \frac{\alpha}{2}} \cdot \frac{r_2^4 dr}{r^5}. \quad (5)$$

Как показывает инженерная практика эксплуатации трубопроводных систем, гидравлический коэффициент трения λ в широком диапазоне чисел Рейнольдса Re является величиной переменной.

Определение оптимального угла конусности с учетом влияния износа внутренней поверхности конфузора. Ранее предложенные решения [1–3] по определению оптимального угла α конусности конфузоров, использующихся в устройствах струйной очистки, не учитывают постепенный износ внутренних стенок канала конфузоров. Для учета влияния износа внутренней поверхности конфузора на оптимальный угол конусности нами предлагается для определения коэффициента λ использовать формулу А. Д. Альтшуля [9, 10]

$$\lambda = 0,11 \cdot \left(\frac{K_{\text{Э}}}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}, \quad (6)$$

где $K_{\text{Э}}$ – эквивалентная равнозернистая шероховатость, определяемая по справочной литературе в зависимости от марки материала, например [9, 10]; Re – число Рейнольдса, определяемое из формулы

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

где $v = v_2 \left(\frac{r_2}{r} \right)^2$ – средняя скорость движения жидкости на участке dl конфузора; ρ – плотность жидкости; μ – динамический коэффициент вязкости жидкости; $d = 2r$ – диаметр поперечного сечения конфузора на элементарном участке dl .

Подставляя (6) и (7) в уравнение (5), получаем

$$dh_{\text{тр}} = 0,0275 \frac{v_2^2}{g \sin \frac{\alpha}{2}} \left(\frac{K_{\text{Э}}}{2r} + \frac{34\mu \cdot r}{\rho v_2 \cdot r_2^2} \right)^{0,25} \frac{r_2^4 dr}{r^5}. \quad (8)$$

Для того чтобы найти значение потерь на трение по длине $h_{\text{тр}}$, необходимо проинтегрировать выражение (8) по отрезку $[r_2; r_1]$. В явном виде данный интеграл вычислить невозможно. Поэтому сделаем определенные преобразования.

Рассмотрим функцию $f(x) = \left(1 + \frac{68}{x}\right)^{0,25}$, $x = \text{Re} \cdot \frac{K_{\text{Э}}}{d} = \frac{\rho v_2 \cdot r_2^2 K_{\text{Э}}}{\mu \cdot r^2}$ на промежутке $7,55 \leq x < \infty$.

На данном промежутке, используя метод наименьших квадратов, эту функцию аппроксимируем выражением $g(x) = 0,995 - \frac{44,3}{x} + 44,52 \cdot x^{-0,94}$. Для $7,55 \leq x < \infty$ максимальная абсолютная погрешность составляет 0,006, а максимальная относительная погрешность – всего 0,5 %. Тогда, используя (8), будем иметь

$$dh_{\text{тр}} = 0,0275 \frac{v_2^2 \cdot r_2^4}{g \sin \frac{\alpha}{2}} \sqrt[4]{\frac{K_{\text{Э}}}{2r}} \left(1 + \frac{68}{x}\right)^{0,25} \frac{dr}{r^5} = 0,0275 \frac{v_2^2 r_2^4 K_{\text{Э}}^{0,25}}{\sqrt[4]{2} g \sin \frac{\alpha}{2}} \left(0,995 - \frac{44,3}{x} + 44,52 \cdot x^{-0,94}\right) \cdot \frac{dr}{r^{5,25}}.$$

Представим это выражение в виде, удобном для интегрирования:

$$dh_{\text{тр}} = 0,0231 \frac{v_2^2 r_2^4 K_{\text{Э}}^{0,25}}{g \sin \frac{\alpha}{2}} \left(\frac{0,995}{r^{5,25}} - \frac{44,3\mu}{K_{\text{Э}} \rho v_2 \cdot r_2^2} \cdot \frac{1}{r^{3,25}} + 44,52 \left(\frac{\mu}{K_{\text{Э}} \rho v_2 \cdot r_2^2} \right)^{0,94} \cdot \frac{1}{r^{3,37}} \right) \cdot dr. \quad (9)$$

В целях сокращения дальнейших выкладок введем в рассмотрение следующие обозначения:

$n = \frac{r_2}{r_1} < 1$ – степень сужения конфузора, $A = \frac{\mu}{K_{\text{Э}} \rho v^2}$ и

$$C_{\text{тр}} = 0,0231 \frac{v_2^2}{g} \left(\frac{K_{\text{Э}}}{r_2} \right)^{0,25} \left(0,2341 \cdot (1 - n^{4,25}) - 19,68A \cdot (1 - n^{2,25}) + 18,78A^{0,94} \cdot (1 - n^{2,37}) \right). \quad (10)$$

Тогда после интегрирования (9) по отрезку $[r_2; r_1]$ находим выражение для потерь напора по длине:

$$h_{\text{тр}} = \frac{C_{\text{тр}}}{\sin \frac{\alpha}{2}}. \quad (11)$$

При расчете местных потерь напора на плавное сужение используем формулу Вейсбаха [9]

$$h_{\text{п.с}} = \zeta_{\text{п.с}} \frac{v_2^2}{2g}, \quad (12)$$

где $\zeta_{\text{п.с}}$ – коэффициент гидравлического сопротивления на плавное сужение, который в соответствии с рекомендациями [9, 10] можно определить следующим образом:

$$\zeta_{\text{п.с}} = k_{\text{п.с}} \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1 \right)^2, \quad (13)$$

где $k_{\text{п.с}}$ – коэффициент смягчения; ε – коэффициент сжатия струи, равный по данным [5, 6]

$$\varepsilon = 0,57 + \frac{0,043}{1,1 - n^2}. \quad (14)$$

По графической зависимости $k_{п.с} = f(\alpha)$, установленной А. Д. Альтшулем и А. И. Калицуном [9, 10], получено следующее выражение для определения коэффициента смягчения:

$$k_{п.с} = 0,6 \cdot \left(\sin \frac{\alpha}{2} \right)^{3,45} + \frac{0,0138}{\sin \frac{\alpha}{2}} + 0,13. \quad (15)$$

Выражение (1) для определения полной потери напора на трение в конфузоре с учетом формул (11)–(15) запишется в следующем виде:

$$h(\alpha) = \frac{C_{тр}}{\sin \frac{\alpha}{2}} + \left(0,6 \cdot \left(\sin \frac{\alpha}{2} \right)^{3,45} + \frac{0,0138}{\sin \frac{\alpha}{2}} + 0,13 \right) \cdot C_n, \quad (16)$$

где

$$C_n = \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1 \right)^2 \cdot \frac{v_2^2}{2g} = 0,2059 \frac{(1-n^2)^2}{(1-0,851 \cdot n^2)^2} \cdot \frac{v_2^2}{g}. \quad (17)$$

Для определения оптимального угла конусности $\alpha_{опт}$, при котором полные потери напора на трение будут минимальными, исследуем на экстремум выражение (16), которое имеет такой же вид, как и выражение (17) в [3]. Следовательно, возможно использовать полученные в [3] результаты для нахождения точки минимума функции потерь:

$$\alpha_{опт} = 2 \arcsin \left(\frac{C_{тр} + 0,0138 C_n}{2,07 C_n} \right)^{\frac{1}{4,45}} = 2 \arcsin \left(\frac{C_{тр}}{2,07 C_n} + 0,0067 \right)^{\frac{1}{4,45}}. \quad (18)$$

Учитывая равенства (10) и (17), можно предложить при нахождении угла $\alpha_{опт}$ по формуле (18) использовать выражение

$$\frac{C_{тр}}{2,07 C_n} = N_0 \cdot (N_1 - N_2 \cdot A + N_3 \cdot A^{0,94}), \quad (19)$$

где $A = \frac{\mu}{K_{\text{Э}} \rho v_2}$; $N_0 = 0,0542 \frac{(1-0,851 n^2)^2}{(1-n^2)^2} \left(\frac{K_{\text{Э}}}{r_2} \right)^{0,25}$; $N_1 = 0,2341 \cdot (1-n^{4,25})$; $N_2 = 19,68 \cdot (1-n^{2,25})$; $N_3 = 18,78 \cdot (1-n^{2,37})$.

Анализ расчетов по формуле (18) показывает, что для конструктивно обоснованных значений параметров, входящих в данное выражение, условие разрешимости из [3] выполняется, а при различных значениях выходной скорости v_2 минимальные потери напора и, как следствие, максимальное воздействие струи рабочей жидкости будут отмечаться при значении угла конусности $\alpha = 40-45^\circ$ (рис. 2).

Анализ проведенного теоретического (математического) исследования. Проведенные теоретические исследования оптимального угла конусности струеформирующего конфузора позволили получить математическую зависимость (18) для определения оптимального по энергозатратам угла конусности конфузора $\alpha_{опт}$ с учетом широкого диапазона чисел Re и коэффициента эквивалентной шероховатости $K_{\text{Э}}$.

Отличительной особенностью формулы (18) следует считать возможность учета влияния на величину угла $\alpha_{опт}$ таких важных гидродинамических и конструктивных параметров, как динамическая вязкость μ и плотность рабочей жидкости ρ ; средняя скорость струи на выходе из конфузора v_2 , входной r_1 и выходной r_2 радиусы конфузора и величины эквивалентной шероховатости $K_{\text{Э}}$. 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 $40-42^\circ$, то есть оптимальным углом в этом случае можно считать $\alpha_{опт} = 41^\circ$.

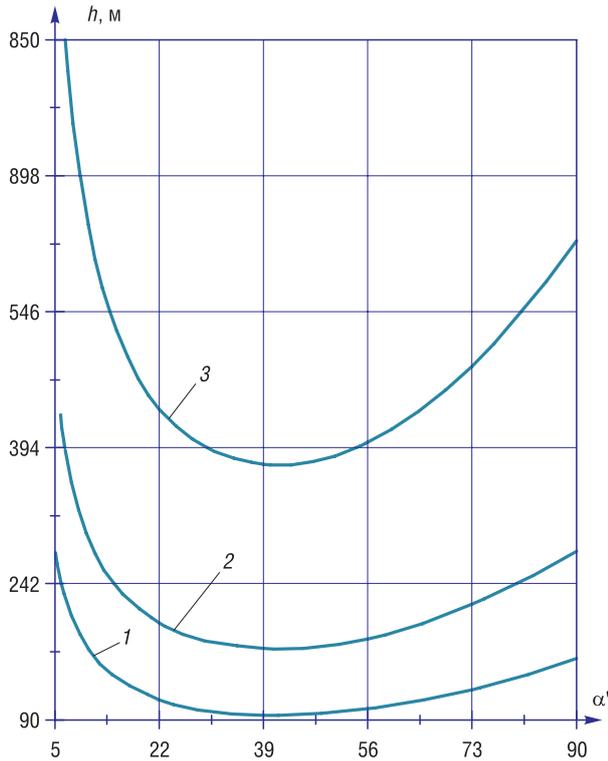


Рис. 2. Зависимость полных потерь напора h (м) от угла конусности α (град) при следующих параметрах: $n = 0,3125$, $r_2 = 0,625$ мм, $\nu = 3,5 \cdot 10^{-6}$ м²/с, $K_3 = 10^{-3}$ мм, и изменении выходной скорости: 1 – $v_2 = 150$ м/с, 2 – $v_2 = 200$ м/с, 3 – $v_2 = 300$ м/с

Fig. 2. Dependence of the total head loss h (m) on the taper angle α (deg) with the following parameters: $n = 0.3125$, $r_2 = 0.625$ mm, $\nu = 3.5 \cdot 10^{-6}$ m²/s, $K_3 = 10^{-3}$ mm, and the output speed: 1 – $v_2 = 150$ m/s, 2 – $v_2 = 200$ m/s, 3 – $v_2 = 300$ m/s

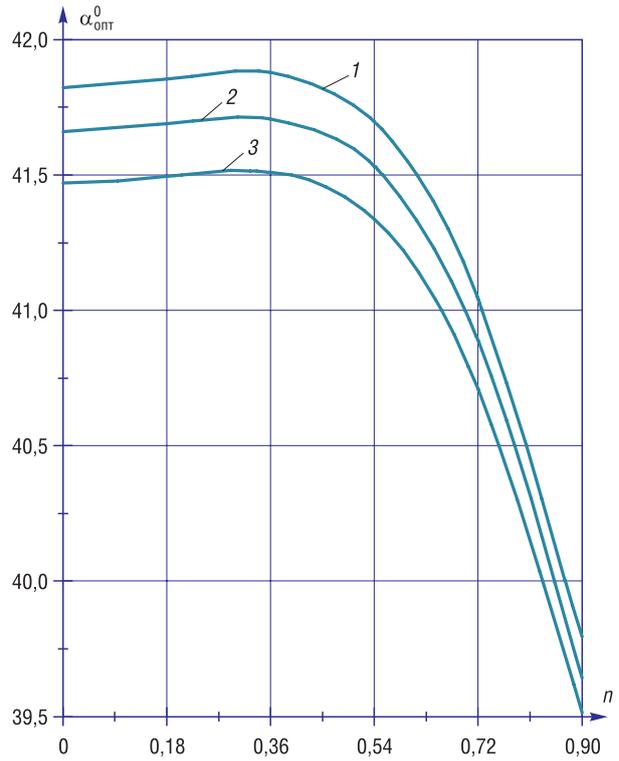


Рис. 3. Зависимость оптимального угла $\alpha_{\text{опт}}$ (град) от степени сужения конфузора $n = r_2/r_1$ при следующих параметрах: $r_2 = 0,625$ мм, $\nu = 3,5 \cdot 10^{-6}$ м²/с, $K_3 = 10^{-3}$ мм, и изменении выходной скорости: 1 – $v_2 = 150$ м/с, 2 – $v_2 = 200$ м/с, 3 – $v_2 = 300$ м/с

Fig. 3. Dependence of the optimal angle α_{opt} (deg) on the degree of confuser narrowing $n = r_2/r_1$ with the following parameters: $r_2 = 0.625$ mm, $\nu = 3.5 \cdot 10^{-6}$ m²/s, $K_3 = 10^{-3}$ mm, and the output speed: 1 – $v_2 = 150$ m/s, 2 – $v_2 = 200$ m/s, 3 – $v_2 = 300$ m/s

2. Изменение (повышение) коэффициента эквивалентной шероховатости K_3 приводит к увеличению значения оптимального угла конусности $\alpha_{\text{опт}}$ (рис. 4), который изменяется в диапазоне значений от 41 до 42°, то есть в среднем оптимальным углом конусности конфузора можно считать $\alpha_{\text{опт}} \approx 41,5^\circ$.

3. Изменение (повышение) динамической вязкости μ и плотности ρ рабочей жидкости, которые можно выразить универсальным коэффициентом кинематической вязкости $\nu = \frac{\mu}{\rho}$, приводит к увеличению значения оптимального угла конусности $\alpha_{\text{опт}}$ (рис. 5), который также изменяется в небольшом диапазоне значений от 41 до 42°, то есть в среднем оптимальным углом конусности конфузора можно считать $\alpha_{\text{опт}} \approx 41,5^\circ$.

4. Размеры выходного сечения конфузора, которые выражают через диаметр или радиус r_2 , применяемые на практике при очистке металлических поверхностей в пределах 0,5–2,0 мм, что соответствует оптимальному углу конусности конфузора (согласно рис. 6) $\alpha_{\text{опт}} = 41\text{--}42^\circ$, то есть в среднем $\alpha_{\text{опт}} \approx 41,5^\circ$.

Рассмотренный анализ изменения значений оптимального угла конусности конфузора $\alpha_{\text{опт}}$ установки РСО в зависимости от геометрических параметров конфузора (n , r_2), физических параметров рабочей жидкости (ρ , ν , ν_2 , μ), а также от эквивалентной шероховатости K_3 показывает, что этот оптимальный угол конусности находится в пределах 41–42° и хорошо согласуется с оптимальным углом конусности конфузора ($\alpha_{\text{опт}} = 40\text{--}45^\circ$), выбранным из условия минимальных гидравлических потерь h_{min} при работе установки РСО. Отсюда можно сделать вывод, что оптимальным диапазоном углов конусности конфузора, который можно рекомендовать для использования в промышленных установках струйной очистки, является $\alpha_{\text{опт}} = 41\text{--}42^\circ$ ($\bar{\alpha} = 41,5^\circ$).

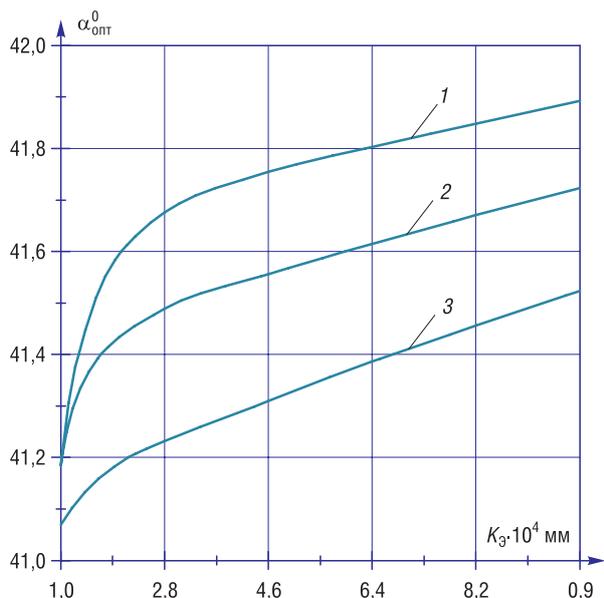


Рис. 4. Зависимость оптимального угла $\alpha_{\text{опт}}$ (град) от эквивалентной шероховатости K_3 (мм) при следующих параметрах: $r_2 = 0,625$ мм, $n = 0,3125$, $\nu = 3,5 \cdot 10^{-6}$ м²/с, и изменении выходной скорости: 1 – $v_2 = 150$ м/с, 2 – $v_2 = 200$ м/с, 3 – $v_2 = 300$ м/с

Fig. 4. Dependence of the optimal angle α_{opt} (deg) on the equivalent roughness K_3 (mm) with the following parameters: $r_2 = 0.625$ mm, $n = 0.3125$, $\nu = 3.5 \cdot 10^{-6}$ m²/s, and the output speed: 1 – $v_2 = 150$ m/s, 2 – $v_2 = 200$ m/s, 3 – $v_2 = 300$ m/s

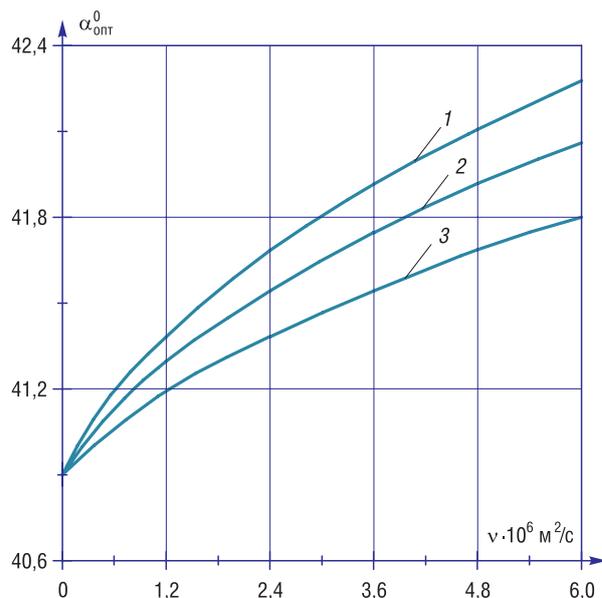


Рис. 5. Зависимость оптимального угла $\alpha_{\text{опт}}$ (град) от кинематического коэффициента вязкости $\nu = \mu/\rho$ при следующих параметрах: $r_2 = 0,625$ мм, $n = 0,3125$, $K_3 = 10^{-3}$ мм, и изменении выходной скорости: 1 – $v_2 = 150$ м/с, 2 – $v_2 = 200$ м/с, 3 – $v_2 = 300$ м/с

Fig. 5. Dependence of the optimal angle α_{opt} (deg) on the kinematic coefficient of viscosity $\nu = \mu/\rho$ with the following parameters: $r_2 = 0.625$ mm, $n = 0.3125$, $K_3 = 10^{-3}$ mm, and the output speed: 1 – $v_2 = 150$ m/s, 2 – $v_2 = 200$ m/s, 3 – $v_2 = 300$ m/s

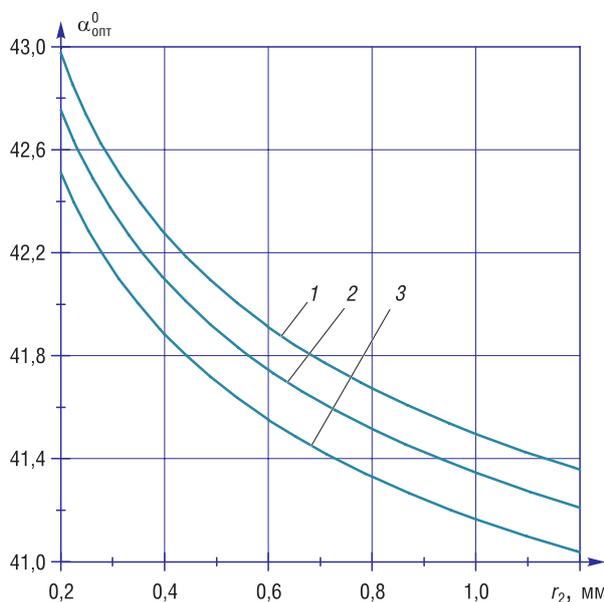


Рис. 6. Зависимость оптимального угла $\alpha_{\text{опт}}$ (град) от выходного радиуса отверстия конфузора r_2 (мм) при следующих параметрах: $\nu = 3,5 \cdot 10^{-6}$ м²/с, $n = 0,3125$, $K_3 = 10^{-3}$ мм и изменении выходной скорости: 1 – $v_2 = 150$ м/с, 2 – $v_2 = 200$ м/с, 3 – $v_2 = 300$ м/с

Fig. 6. Dependence of the optimal angle α_{opt} (deg) on the outlet radius of the confuser opening r_2 (mm) with the following parameters: $K_3 = 10^{-3}$ mm, $n = 0.3125$, $\nu = 3.5 \cdot 10^{-6}$ m²/s, and the output speed: 1 – $v_2 = 150$ m/s, 2 – $v_2 = 200$ m/s, 3 – $v_2 = 300$ m/s

Заключение. Получена математическая зависимость (18) для определения оптимального (по потерям напора h) угла конусности конфузора $\alpha_{\text{опт}}$ с учетом степени сжатия n и коэффициента гидравлического трения. На основании полученной зависимости построены кривые изменения оптимального угла конусности конфузора $\alpha_{\text{опт}} = f(h)$, $\alpha_{\text{опт}} = f(n)$, $\alpha_{\text{опт}} = f(\nu)$, $\alpha_{\text{опт}} = f(K_3)$, $\alpha = f(r_2)$, которые согласуются с результатами ряда исследований [3, 5, 7].

Полученное выражение может применяться для расчета при проектировании конфузоров и струйных аппаратов, предназначенных для использования в промышленных установках струйной очистки, гидромониторах, установках пожаротушения и других установках струйной техники.

Список использованных источников

1. Технология струйной гидроабразивной очистки и защиты от коррозии стальных изделий с применением бентонитовой глины / И. В. Качанов [и др.]. – Минск: БНТУ, 2016. – 168 с.
2. Расчет оптимального угла конусности конфузора / И. В. Качанов [и др.] // Агропанорама. – 2016. – №5. – С. 7–10.
3. Расчет оптимального угла конусности конфузора, используемого для реверсивно-струйной очистки металлических поверхностей от коррозии / И. В. Качанов [и др.] // Наука и техника. – 2019. – №3. – С. 216–222.
4. Агасарян, Р. Р. Струйно-абразивная обработка металлов / Р. Р. Агасарян, Р. Т. Дохинян. – Ереван: АтрНИИТИ, 1990. – 51 с.
5. Меркулов, В. Н. Перспективные процессы гидрообработки материалов в машиностроении (зарубежный опыт) / В. Н. Меркулов. – Киев: УкрНИИТИ, 1987. – 10 с.
6. Гидрорезание судостроительных материалов / Г. А. Тихомиров [и др.]. – Л.: Судостроение, 1987. – 164 с.
7. Бадах, В. Н. Особенности гидродинамики проточной части гидравлических струйных усилителей и их влияние на выходные характеристики: автореф. дис. ... канд. техн. наук / В. Н. Бадах. – Киев, 1984. – 18 с.
8. Бочаров, В. П. Расчет и проектирование устройств гидравлической струйной техники / В. П. Бочаров. – Киев: Техник, 1987. – 127 с.
9. Альтшуль, А. Д. Гидравлика и аэродинамика (Основы механики жидкости) / А. Д. Альтшуль, П. Г. Киселев. – М.: Стройиздат, 1975. – 323 с.
10. Альтшуль, А. Д. Гидравлические сопротивления / А. Д. Альтшуль. – М.: Недра, 1982. – 224 с.

References

1. Kachanov I. V., Filipchik A. V., Babich V. E., Zhuk A. N., Ushev S. I. *Technology of Jet Hydroabrasive Cleaning and Corrosion Protection of Steel Products Using Bentonite Clay*. Minsk, BNTU, 2016. 168 p. (in Russian).
2. Kachanov I. V., Veremenyuk V. V., Moysa A. S., Filipchik A. V. Calculation of the optimal taper angle of the confuser. *Agropanorama*, 2016, no. 5, pp. 7–10 (in Russian).
3. Kachanov I. V., Zhuk A. N., Shatalov I. M., Veremenyuk V. V., Filipchik A. V. Calculation of the Optimum Cone Angle of a Confuser Used for Reversive-Jet Cleaning of Metal Surfaces against Corrosion. *Nauka i tekhnika = Science & Technique*, 2019, vol. 18 no. 3, pp. 216–222. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-3-216-222>
4. Agasaryan R. R., Dohinyan R. T. *Blast-Abrasive Treatment of Metals*. Yerevan, AtrNIINTI Publ., 1990. 51 p. (in Russian).
5. Merkulov V. N. *Perspective Processes of Hydro-Processing of Materials in Mechanical Engineering (Foreign Experience)*. Kiev, UkrNIINTI Publ., 1987. 10 p. (in Russian).
6. Tikhomirov G. A. *Hydrocutting of Shipbuilding Materials*. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1987. 164 p. (in Russian).
7. Badakh V. N. *Features of the Hydrodynamics of the Flow Path of Hydraulic Jet Amplifiers and Their Influence on the Output Characteristics*. Kiev, 1984. 18 p. (in Russian).
8. Bocharov V. P. *Calculation and Design of Hydraulic Jet Equipment Devices*. Kiev, Tekhnika Publ., 1987. 127 p. (in Russian).
9. Altshul' A. D., Kiselev P. G. *Hydraulics and Aerodynamics (Fundamentals of Fluid Mechanics)*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1975. 323 p. (in Russian).
10. Altshul' A. D. *Hydraulic Resistance*. Moscow, Nedra Publ., 1982. 224 p. (in Russian).

Информация об авторах

Ковалевич Виталий Сергеевич – аспирант, Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: vitalikovalевич@gmail.com

Качанов Игорь Владимирович – доктор технических наук, профессор, Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: ihar.kachanau@bntu.by

Шаталов Игорь Михайлович – старший преподаватель, Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: ishatalau@bntu.by

Веремеюк Валентин Валентинович – кандидат физико-математических наук, доцент, Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: well_ver@mail.ru

Филипчик Алексей Вячеславович – кандидат технических наук, доцент, Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: aflipchik@bntu.by

Information about the authors

Vitaly S. Kovalevich – Postgraduate Student, Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: vitalikovalевич@gmail.com

Igor V. Kachanov – D. Sc. (Engineering), Professor, Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ihar.kachanau@bntu.by

Igor M. Shatalov – Senior Lecturer, Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ishatalau@bntu.by

Valentin V. Veremenyuk – Ph. D. (Physics and Mathematics), Assistant Professor, Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: well_ver@mail.ru

Alexey V. Filipchik – Ph. D. (Engineering), Assistant Professor, Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: aflipchik@bntu.by