

DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-1-5-13

УДК 669.620.197

Результаты исследований по определению давления реверсивной струи на обрабатываемую плоскую поверхность

Инж. А. Н. Жук¹⁾, докт. техн. наук, проф. И. В. Качанов¹⁾,
канд. физ.-мат. наук, доц. В. В. Веремеюк¹⁾, канд. техн. наук А. В. Филипчик¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2018
Belarusian National Technical University, 2018

Реферат. Проведенные исследования показали, что весьма экономично и с малыми затратами мощности можно подготовить листовый материал под лазерную резку, применяя реверсивно-струйную очистку для обработки поверхностей. Эффективность реверсивно-струйной очистки в сравнении с традиционными технологиями струйной очистки объясняется существенным повышением давления (на 25–50 %) при взаимодействии струи с обрабатываемой поверхностью. В статье на основе приближенного энергетического метода (метода верхней оценки) предлагается математическая модель для расчета давления разрушения от воздействия реверсивной струи на обрабатываемую поверхность, состоящую из слоя коррозионных отложений. В рамках разработанной модели была решена вариационная задача, позволившая получить теоретическую зависимость для расчета минимальной величины давления разрушения p_{\min} в точке соударения реверсивной струи с преградой, учитывающая предел текучести деформируемого материала σ_s , плотность разрушаемого материала ρ , скорость струи $v_{\text{стр}}$ и параметр реверсивного течения – коэффициент обжатия струи λ . Сопоставление теоретических данных с экспериментальными (получены на основе применения датчика разности давления ЭДП-30 и пружинного динамометра с пределами измерения 25 и 80 МПа соответственно) показало расхождение в 4–15 %. Установленное незначительное расхождение между теорией и экспериментом показывает, что полученная теоретическая зависимость является вполне корректной и может быть использована в инженерной практике для прогнозирования энергосиловых и кинематических параметров, необходимых для подбора насосного оборудования, предназначенного для реализации процесса реверсивно-струйной очистки.

Ключевые слова: энергетический метод, метод верхней оценки, реверсивная струя, давление разрушения, теория, эксперимент, датчик давления, пружинный динамометр, насосное оборудование

Для цитирования: Результаты исследований по определению давления реверсивной струи на обрабатываемую плоскую поверхность / А. Н. Жук [и др.] // *Наука и техника*. 2018. Т. 17, № 1. С. 5–13. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-1-5-13

Investigation Results Pertaining to Determination of Reverse Flow Pressure on Treated Flat Surface

A. N. Zhuk¹⁾, I. V. Kachanov¹⁾, V. V. Veremenyuk¹⁾, A. V. Filipchik¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The executed investigations have shown that it is possible to prepare sheet-like material for laser cutting economically viable and with small amount of power expenditure while using reverse jet cleaning for surface treatment. As compared to conventional jet cleaning technologies efficiency of the reverse jet cleaning is attributed to significant pressure

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

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

increase (by 25–50 %) when the jet is interacting with the treated surface. The paper proposes a mathematical model on the basis of approximate energy method (upper-bound method) and the model is used for calculation of fracture pressure due to action of the reverse jet on the treated surface which consists of a corrosion deposit layer. A variational problem was solved within a framework of the developed model and the problem solution has made it possible to obtain a theoretical dependence for calculation of minimum fracture pressure value p_{\min} in the point reverse jet impact with a barrier. Theoretical dependence and it has taken into account yielding point of the deformed material σ_s , density of fractured material ρ , jet velocity $v_{\text{стр}}$ and parameter of reverse flowing – jet reduction ratio λ . Comparison theoretical data and experimental ones (experimental data have been obtained while using a differential pressure transducer ЭДП-30 and a spring dynamometer with measuring limits 25 and 80 MPa, respectively) has shown difference by 4–15 %. Determined insignificant difference between a theory and an experiment demonstrates that the obtained theoretical dependence is considered as a quite correct one and it can be used in engineering practice for prediction of power and kinematics parameters which are necessary for selection of the required pump equipment designed for realization of reverse-jet cleaning process.

Keywords: power method, upper-bound method, reverse jet, fracture pressure, theory, experiment, pressure transducer, spring dynamometer, pump equipment

For citation: Zhuk A. N., Kachanov I. V., Veremenyuk V. V., Filipchik A. V. (2018) Investigation Results Pertaining to Determination of Reverse Flow Pressure on Treated Flat Surface. *Science and Technique*. 17 (1), 5–13. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-1-5-13 (in Russian)

Введение

Эффективность реализации целого ряда технологических процессов (лазерная резка, покраска, газопламенное напыление и т. д.) напрямую зависит от качества очистки поверхностей от коррозии. Так, для подготовки стальных листов под лазерную резку (ЛР) необходимо после очистки от коррозии иметь высококачественную поверхность с шероховатостью $Ra = 0,4–1,0$ мкм. При использовании в качестве характеристики упрочнения такого параметра, как микротвердость H_{μ} , нужно, чтобы его величина по отношению к исходному значению $H_{\mu 0}$ ($H_{\mu 0}$ – микротвердость поверхности листового материала применительно к условиям поставки) не выходила за пределы соотношения $H_{\mu} = (1,5–1,6)H_{\mu 0}$. При этом поверхность стальных листов должна иметь низкую отражательную способность.

Исследования, проведенные на кафедре «Кораблестроение и гидравлика», показали, что весьма экономично и с малыми затратами мощности можно подготовить листовый материал под ЛР, применяя реверсивно-струйную очистку (РСО) для обрабатываемых поверхностей. Эффективность РСО в сравнении с традиционными технологиями струйной очистки объясняется существенным повышением давления (на 25–50 %) при взаимодействии струи с обрабатываемой поверхностью [1].

Указанное повышение давления обусловлено дополнительным воздействием реактивной силы на обрабатываемую поверхность при раз-

вороте струи на 180° относительно первоначального направления давления. За счет повышения силового воздействия для РСО характерны снижение мощности и повышение производительности на 30–50 % по сравнению с традиционными технологиями струйной очистки [2, 3].

Несмотря на отмеченные преимущества, технология РСО в настоящее время не дошла до промышленного внедрения и находится на стадии лабораторных исследований. Такое состояние объясняется недостатком экспериментальных данных, а также отсутствием корректной теории, позволяющей на стадии разработки технологии спрогнозировать энергосиловой режим от воздействия реверсивной струи на обрабатываемую поверхность. Учитывая перечисленное, в статье основное внимание уделено разработке теории процесса РСО на основе применения приближенного энергетического метода (метода верхней оценки) для расчета давления при воздействии реверсивной струи на преграду [4].

Основная часть

Как уже было отмечено выше, для подготовки стальных листов под последующую ЛР предлагается использовать технологию РСО. Для реализации этой технологии на кафедре «Кораблестроение и гидравлика» БНТУ разработана конструкция струйного блока (рис. 1) [1]. Конструкция включает конусное сопло 1, установленное в корпусе 2, который через уплотнение 3 плотно прижимается к очищаемой поверхности 4. Изменение расстояния L между

поверхностью и соплом обеспечивается за счет перемещения последнего в радиальных опорах 5.

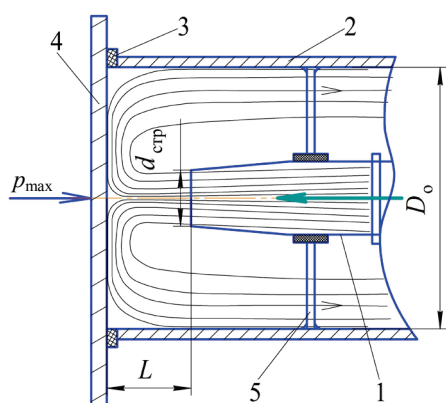


Рис. 1. Схема струйного устройства для реализации процесса реверсивно-струйной очистки

Fig. 1. Scheme of blast device for realization of reverse jet cleaning

При подключении данного струйного блока к насосной установке поток рабочей жидкости после взаимодействия с поверхностью 4 разворачивается на 180° относительно своего первоначального движения. Этот разворот обеспечивает формирование реактивной силы, которая, складываясь с силой от воздействия струи, приводит к увеличению давления p_{\max} струйного воздействия в 1,25–1,5 раза (теоретически – в два раза) по сравнению с традиционной схемой очистки, когда струя после взаимодействия с поверхностью растекается под углом 90° относительно своего первоначального направления течения.

Параметр силы (давления) струйного воздействия на обрабатываемую поверхность является одним из основных при разработке технологии РСО и выборе насосного оборудования, предназначенного для реализации технологии.

Анализ показал, что значительный объем теоретических исследований по расчету силы (давления) струйного воздействия основан на использовании теоремы об изменении количества движения, что не позволяет авторам установить взаимосвязь между усилием (давлением) обработки и механическими свойствами обрабатываемых материалов, включая технологические параметры процесса РСО [4].

Для получения решения, лишенного указанных недостатков, предлагается использовать

теоретический метод, который в механике сплошной среды известен как приближенный энергетический метод (метод верхней оценки).

Сущность метода заключается в том, что объем очага деформации (разрушения) представляется в виде жестких (недеформируемых) блоков, скользящих один относительно другого и по границам жесткой зоны. Тем самым действительное поле линий скольжения, характеризующее напряженное состояние деформируемого объекта, заменяют кинематически возможным, состоящим из системы прямолинейных отрезков, образующих треугольники. Вдоль границ блоков – сторон треугольников – компоненты скоростей перемещений претерпевают разрывы. Внутри каждого блока поле скоростей однородно, т. е. вектор скорости для всех точек данного блока один и тот же. На этом основании строят поле скоростей, которое при правильном построении всегда является кинематически возможным полем (КВП). Число и размеры треугольных блоков первоначально выбирают произвольно [4–7].

Для проведения расчета процесса РСО использовалось кинематически возможное поле (рис. 2а), состоящее из жестких однородных блоков. Аналогичное поле для анализа процесса внедрения плоского пуансона в жесткопластическую среду использовалось в [8].

На рис. 2а вследствие симметрии относительно оси OZ представлена только правая половина кинематически возможного поля. Цифрами показаны: 0 – жесткая неподвижная зона; 1, 2, 3 – блоки поля; 4 – граница свободного пространства; 5 – струя рабочей жидкости. Границы между блоками и зонами обозначаются двумя цифрами (1, 2 – граница между блоками 1 и 2; 3, 4 – граница между блоком 3 и свободной поверхностью 4; 1, 5 – контактная поверхность и т. д.). Длины указанных границ обозначаются соответственно l_{12} , l_{23} , l_{34} и т. д.

Для построения годографа (рис. 2б) от центра 0 по вертикали вниз откладывается вектор 05 скорости струи v_0 , длину которого примем за единицу. Затем из конца вектора 05 проводится линия, параллельная линии 15, а из точки 0 – линии 01. Пересечение этих линий определяет положение точки 1, характеризующей величину вектора скорости блока 1. Продолжая построение подобным образом, по-

лучается представленный на рис. 2b годограф скоростей.

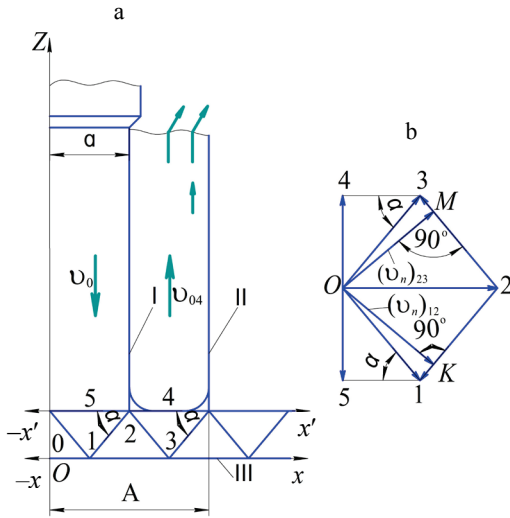


Рис. 2. Кинематически возможное поле линий скольжения (а) и годограф скоростей (b), принятые для анализа процесса реверсивно-струйной очистки: I – струя рабочей жидкости; II – корпус струйного блока; III – обрабатываемая поверхность

Fig. 2. Kinematically possible sliding line field (a) and velocity hodograph (b), accepted for analysis of reverse jet cleaning: I – jet of power fluid; II – body of jet unit; III – treated surface

Линии годографа 12, 23 обозначают относительные скорости блоков v_{12} , v_{23} вдоль линий разрыва 12, 23 (рис. 2b).

Для расчета динамических напряжений на поверхностях разрыва 12, 23 из центра O откладываются отрезки OK и OM , направленные по нормали к поверхностям 12 и 23 и характеризующие нормальные компоненты скоростей $(v_n)_{12}$ и $(v_n)_{23}$ частиц разрушаемой среды (слоя коррозии), пересекающих поверхности разрыва скорости.

Для установления давления от воздействия реверсивной струи на плоскую преграду примем следующие допущения:

- обрабатываемая поверхность считается плоским слоем коррозионных отложений, который покрывает листовую поверхность и имеет одинаковую толщину, распространяясь на неограниченную длину вправо и влево от оси симметрии струи;
- материал обрабатываемой поверхности считается однородным и несжимаемым;
- вид принятого КВП не зависит от изменения скорости струи в процессе разрушения слоя коррозионных отложений;

– действие сил инерции не оказывает влияния на характер разрушения слоя коррозионных отложений.

Для определения величины струйного давления на поверхность коррозионного слоя воспользуемся условием баланса внешних и внутренних сил [5, 6]

$$W_{г.стр} = W_{вн}, \quad (1)$$

где $W_{г.стр}$ – гидравлическая мощность струи, воздействующей на преграду; $W_{вн}$ – мощность внутренних сил, действующих на поверхностях разрыва и контактного трения.

Величину мощности $W_{г.стр}$ определим из выражения

$$W_{г.стр} = pQ = pS_5v_5, \quad (2)$$

где p – гидродинамическое давление, возникающее на поверхности взаимодействия струи с преградой, H/m^2 ; Q – расход жидкости в струе, m^3/c ; S_5 – площадь живого сечения струи, m^2 , для плоской струи $S_5 = 2ab$ (a и b – ширина и толщина струи соответственно); v_5 – скорость струи (средняя) в момент соударения с преградой.

Мощность внутренних сил $W_{вн}$ в (1) представим в виде

$$W_{вн} = W_{раз} + W_{тр} + W_{дин}, \quad (3)$$

где $W_{раз}$ – мощность внутренних сил сопротивления, действующих на поверхностях разрыва скорости; $W_{тр}$ – мощность от действия сил трения на контактных поверхностях; $W_{дин}$ – мощность внутренних сил, обусловленная действием динамических напряжений на поверхностях разрыва скорости.

Для расчета $W_{раз}$ используем уравнение

$$W_{раз} = \sum \tau_n b l_{rs} v_{rs}, \quad (4)$$

где τ_n – касательные напряжения, действующие вдоль границ блоков при их относительном перемещении, на свободных поверхностях $\tau_n = 0$, а на поверхностях разрыва

$$\tau_n = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}}; \quad (5)$$

σ_s – предел текучести деформируемого материала, для хрупких материалов $\sigma_s = \sigma_b$ (σ_b – предел прочности материала, установленный по результатам испытаний на сжатие (растяжение)); l_{rs} – длина границ между блоками r и s

в принятом КВП; v_{rs} – величина разрыва скорости вдоль границ смежных блоков.

Для расчета мощности, затраченной на преодоление сил контактного трения, используется зависимость

$$W_{тр} = \sum \tau_k l_{rs} b v_{rs}, \quad (6)$$

где τ_k – касательные напряжения, действующие на поверхности трения между блоками КВП и жесткими неподвижными зонами обрабатываемой детали, определяются по [8]

$$\tau_k = 2\mu \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}}, \quad (7)$$

μ – коэффициент трения, изменяющийся от 0 (идеально гладкие поверхности) до 0,5 (поверхности, где $\tau_k = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}}$).

При динамическом воздействии струи на разрушение преграды под действием импульса силы на поверхности разрыва скорости возникают дополнительные динамические напряжения

$$(q_{дин})_{rs} = \rho (v_n)_{rs} v_{rs}, \quad (8)$$

где ρ – плотность разрушаемого материала, кг/м^3 ; $(v_n)_{rs}$ – нормальная к поверхности разрыва скорости компонента скорости, определяемая по годографу скорости из рис. 2б.

Мощность $W_{дин}$, затраченная на преодоление напряжений $(q_{дин})_{rs}$, определяется по уравнению

$$W_{дин} = \rho (v_n)_{rs} v_{rs}^2 b l_{rs}. \quad (9)$$

Выразим с помощью параметра поля α , размеров сечения струи a , b до начала реверсивного течения и размера A (A характеризует степень уширения струи после растекания в направлении оси X в момент начала реверсивного движения вверх внутри корпуса II струйного устройства (рис. 2а)) длину границ блоков l_{rs} . Одновременно с помощью годографа скоростей установим соотношения между кинематическими параметрами точек деформируемой среды v_{rs} и $(v_n)_{rs}$ и блока 1. С учетом изложенного уравнение (1) после преобразований приводится к виду

$$p = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} \left(\frac{3}{\sin 2\alpha} + \frac{1}{\sin \alpha} + \frac{2\mu}{\text{tg} \alpha} \right) + \rho v_{01}^2 (\lambda + 1), \quad (10)$$

где v_{01} – скорость блока 1; λ – коэффициент обжатия реверсивной струи

$$\lambda = \frac{a}{A - a}.$$

Изменяя угол α в (10), можно получить различные значения струйного реверсивного давления p , действующего на обрабатываемую поверхность.

Однако наиболее правильной будет минимальная величина давления p_{\min} . Для определения оптимального угла α_{opt} уравнение (10), используя известные тригонометрические формулы, приведем к виду

$$p(L) = A \left[\frac{1,5}{L} + (1,5 + 2\mu)L + \sqrt{1 + L^2} \right] \rightarrow \min, \quad (11)$$

где $A = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}}$;

$$L = \text{ctg} \alpha, \quad L \in (0; +\infty). \quad (12)$$

При решении (11) отмечается, что функционал давления $p(L) \rightarrow +\infty$ при $L \rightarrow +\infty$ и $L \rightarrow +0$. Следовательно, функционал $p(L)$ достигает минимума в некоторой точке $L_{\min} \in (0; +\infty)$. Для нахождения этой точки приравняем нулю первую производную уравнения (11), т. е. $p'(L) = 0$.

Тогда после дифференцирования по L уравнения (11) получим

$$-\frac{1,5}{L^2} + 1,5 + 2\mu + \frac{L}{\sqrt{1 + L^2}} = 0. \quad (13)$$

Графический анализ показал, что (13) имеет один корень. Следовательно, (13) имеет единственное решение L_{\min} . Соответствующий оптимальный угол α_{opt} в результате преобразования (12)

$$\alpha_{\text{opt}} = \text{arctg} \frac{1}{L_{\min}}. \quad (14)$$

Поскольку (13) не допускает точного решения, обработав его численным методом (методом половинного деления), получим формулу взаимосвязи между L_{\min} и μ

$$L_{\min} = 0,569 + \frac{0,05}{\mu + 0,5} + 0,216 \cdot 0,37^{\mu+0,5}. \quad (15)$$

Максимальная абсолютная погрешность формулы (15) меньше 0,0005 %, а максимальная относительная погрешность – меньше 0,06 %. Таким образом, задавая нужное значение коэффициента трения μ (например, $\mu = 0,1$), из (15) получим, что $L_{\min} = 0,8$. Подставляя данное зна-

чение L_{\min} в (14), получим, что оптимальный угол $\alpha_{\text{opt}} = \arctg \frac{1}{0,8} = 51,22^\circ$.

В результате решения (10) с учетом $\alpha_{\text{opt}} = 51,22^\circ$ получим выражение для расчета минимального давления разрушения

$$p_{\min} = 2,6\sigma_s + \rho v_{01}^2 (1 + \lambda). \quad (16)$$

Для практического использования (16) следует уточнить вопрос, касающийся скорости v_{01}^2 блока 1 в принятом для расчета давления p_{\min} КВП. Из годографа скоростей (рис. 2b) видно, что скорость блока v_{01} больше, чем скорость струи v_{05} . Однако такое соотношение между указанными скоростями ($v_{01} > v_{05}$) приводит к тому, что гидравлическая мощность реверсивной струи, расходуемая на разрушение слоя коррозии, будет равна нулю. Решение этой задачи в [9] показывает, что максимальная гидравлическая мощность реверсивной струи, затраченная на разрушение коррозионного слоя, будет реализована в случае, когда $v_{01} < v_{05}$, а более конкретно, когда между скоростями v_{01} и v_{05} имеет место следующее соотношение:

$$v_{01} = 0,5v_{05} = 0,5v_{\text{стр}}, \quad (17)$$

где $v_{\text{стр}}$ – скорость струи при взаимодействии ее с преградой.

На основании рекомендаций [9] с учетом (17) формула (16) примет вид

$$p_{\min} = 2,6\sigma_s + 0,25\rho(1 + \lambda)v_{\text{стр}}^2. \quad (18)$$

Отличительной особенностью уравнения (18) по сравнению с аналогичными формулами для определения струйного давления следует считать то, что оно предназначено для расчета давления именно реверсивной струи на преграду с помощью коэффициента обжатия струи λ , характеризующего дополнительное силовое воздействие струи на преграду уже после разворота ее на 180° в процессе реверсивного течения. Дополнительно научное и практическое значения формулы (18) заключаются в том, что она в результате оптимизации параметра поля α позволяет определять минимальное давление разрушения p_{\min} в зависимости от скорости струи $v_{\text{стр}}$ и физико-механических свойств (σ_s, ρ) разрушаемого материала.

Для оценки результатов, полученных по теоретической зависимости (18), на предмет их использования в инженерной практике были разра-

ботаны методики экспериментального определения давления $p_{\text{эк}}$, действующего на площадке соударения реверсивной струи с обрабатываемой поверхностью. При этом для измерения давлений $p_{\text{эк}}$, не превышающих 25 МПа, использовался электронный датчик ЭДП-30 (рис. 3). В комплекте с ЭДП-30 в качестве регистрирующей аппаратуры применяли комбинированный цифровой омметр Щ4313 с погрешностью измерений до 2 %.

Принцип работы датчика основан на использовании тензорезистивного эффекта изменения удельного электросопротивления проводника в результате его деформации. Входным сигналом для датчика является давление измеряемой рабочей жидкости, которое изгибает трубный элемент 6, в результате чего происходит движение пластины, закрепленная на конце трубного элемента, посредством которой происходит перемещение подпружиненного штока реостата. При изменении давления и перемещении штока реостата меняется величина сопротивления, создаваемого реостатом, тем самым увеличивается или уменьшается сигнал на выходе из датчика.

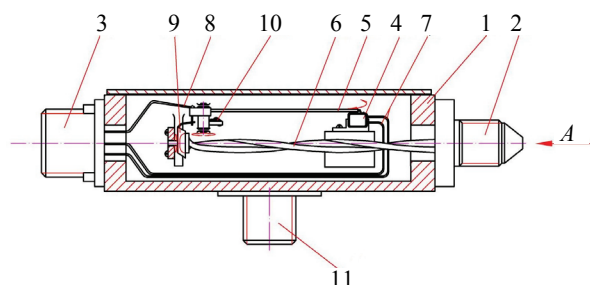


Рис. 3. Схема электронного датчика разности (перепада) давления ЭДП-30: А – направление подачи жидкости; 1 – корпус датчика; 2 – соединительный штуцер; 3 – электроразъем; 4 – реостат; 5 – шток реостата; 6 – трубка жидкостного давления; 7, 8 – электропровод; 9 – поворотная пластина; 10 – пружина; 11 – крепление (заземление)

Fig. 3. Scheme of ЭДП-30 electronic pressure difference (drop in pressure) transducer: А – direction of fluid supply; 1 – transducer body; 2 – connection fitting; 3 – electric connector; 4 – variable resistor; 5 – variable resistor stem; 6 – tube of fluid pressure; 7, 8 – electric wire; 9 – swivel plate; 10 – spring; 11 – attachment (earthing)

В результате тарировки была получена линейная зависимость $R = f(p)$ «сопротивление R в цепи цифрового омметра Щ4313 – давление струи на преграду p », представленная на рис. 4 и подтверждающая работу чувствительных элементов датчика в зоне упругих деформаций [4].

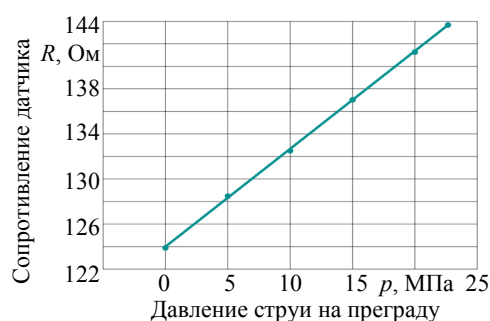


Рис. 4. Зависимость изменения сопротивления в цепи датчика ЭДП-30 от давления струи на преграду

Fig. 4. Dependence of resistance changes in ЭДП-30 transducer circuit on barrier pressure by jet

Для измерения силы F струйного воздействия на плоскую поверхность также была разработана конструкция динамометра, принципиальная схема которой приведена на рис. 5. В состав принципиальной схемы динамометра входит шток 1, на верхнем торце которого смонтирована площадка-опора 2. Нижний торец штока соединен с манжетой 3, опирающейся на упругий элемент – пружину 4. Шток с площадкой-опорой, манжетой и пружиной установлены в корпусе 5.

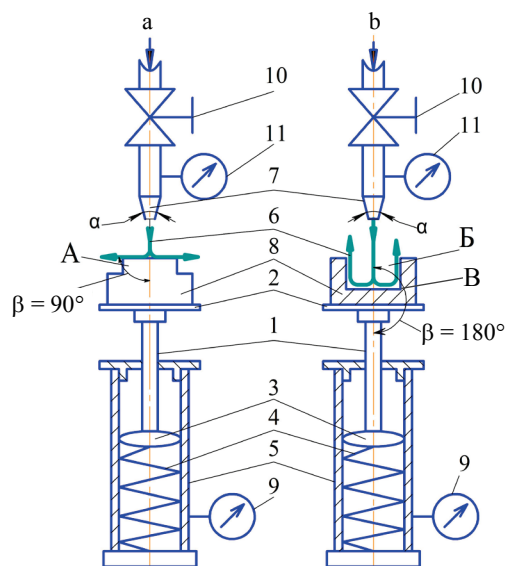


Рис. 5. Схема динамометра для измерения силы F от воздействия струи на преграду: а – радиальное течение струи ($\beta = 90^\circ$) после взаимодействия ее с плоской поверхностью; б – реверсивное течение струи ($\beta = 180^\circ$) после взаимодействия ее с плоской поверхностью

Fig. 5. Scheme of dynamometer for measuring force F due to jet action on barrier: а – radial jet flow ($\beta = 90^\circ$) after its interaction with flat surface; б – reverse jet flow ($\beta = 180^\circ$) after its interaction with flat surface

Силовое воздействие струи 6 рабочей жидкости, вытекающей из сопла 7 и действующей на заготовку-препятствие (ЗП) 8 [10], передается через шток на пружину и регистрируется в диапазоне от 0 до 50 Н по шкале динамометра 9 (рис. 5). Принимая погрешность измерений, равную половине цены деления шкалы динамометра, была установлена абсолютная погрешность ΔF определяемой силы F , равная $\pm 0,1$ Н и не превышающая 0,2% от максимальной величины измеренной нагрузки.

Для изменения давления и скорости струи рабочей жидкости в измерительной схеме смонтирован регулировочный вентиль 10. Регистрация давления в потоке жидкости на входе в сопло осуществлялась с помощью образцового манометра 11 марки МП-160 (ГОСТ 15150–69, диапазон измерений 0–100 МПа, класс точности 2.5). Формирование струи происходило в коническом сопле диаметром $d_c = 1$ мм, с углом конусности $\alpha = 45^\circ$.

Применение ЗП с цилиндрическим выступом А (рис. 5а) обеспечивало радиальное течение струи ($\beta = 90^\circ$) после взаимодействия ее с плоской поверхностью. Применение ЗП с глухой цилиндрической полостью Б (рис. 5б) позволило осуществить формирование реверсивной струи ($\beta = 180^\circ$), взаимодействующей с плоской поверхностью В, выполненной в донной части полости Б. В результате тарировки динамометра было установлено повышение силового взаимодействия на преграду в 1,25–1,5 раза при использовании реверсивной струи (рис. 5б) по сравнению со струей, сформированной по схеме радиального растекания после взаимодействия с преградой (рис. 5а).

Для сравнения результатов теоретических расчетов и экспериментальных исследований во всем диапазоне рассматриваемых давлений (10–80 МПа) на динамометре была протарирована схема реверсивного течения (рис. 5б), которая позволила построить графики зависимости $p_{эк} = f(v_{стр})$ «давление струи на преграду – скорость струи».

Силу воздействия струи F на преграду для исследованных схем нагружения определили по второму закону Ньютона

$$F = mg, \quad (19)$$

где m – переменная масса, установленная по шкале динамометра при воздействии реверсивной струи на заготовку-препятствие, кг; g – ускорение силы тяжести, m/c^2 .

Давление от воздействия реверсивной струи на заготовку-препятствие

$$p_{\text{эк}} = \frac{4F}{\pi d_{\text{стр}}^2}, \quad (20)$$

где F – сила воздействия реверсивной струи на преграду, Н; $d_{\text{стр}}$ – диаметр струи, равный диаметру сопла d_c в его выходном сечении, м.

Величину скорости струи $v_{\text{стр}}$ для построения графика $p_{\text{эк}} = f(v_{\text{стр}})$ определяли по зависимости

$$v_{\text{стр}} = \frac{4Q}{\pi d_c^2}, \quad (21)$$

где Q – расход рабочей жидкости, определяемый объемным методом, м³/с; d_c – диаметр сопла, м.

Некоторые результаты сходимости теоретических и экспериментальных данных, связанных с определением давления от воздействия реверсивной струи на обрабатываемую поверхность, представлены на рис. 6.

При рассмотрении кривых 1 и 2 видно, что максимальное расхождение между теоретическими (кривая 1) и экспериментальными данными (кривая 2) составляет около 30 % при скорости $v_{\text{стр}} = 240$ м/с. В диапазоне рабочих скоростей реверсивной струи $v_{\text{стр}} = (140–200)$ м/с и давлений 14–43 МПа расхождение между теорией и экспериментом находится в пределах 4–15 %. Полученные данные свидетельствуют о том, что расчетная зависимость (18) является достаточно корректной, хорошо учитывает физическую сущность реверсивного течения рабочей жидкости при разрушении слоя коррозии и вполне может быть использована в инженерной практике для прогнозирования рабочих давлений на обрабатываемой поверхности при воздействии на нее реверсивной струи рабочей жидкости. Следует отметить, что для построения экспериментальной кривой 2 (рис. 6) применялись две методики определения струйного давления (с помощью датчика ЭДП-30 и динамометра) в зоне I, где величина $p_{\text{эк}}$ не превышала 25 МПа. В зоне II с верхним диапазоном давления порядка 75–80 МПа применялась методика регистрации давления $p_{\text{эк}}$ только с помощью пружинного динамометра. При этом следует отметить, что в зоне I сравнительно низких давлений $p_{\text{эк}}$ установлено, что расхождение результатов по измерению струйного давления $p_{\text{эк}}$ по двум использованным методикам не превышает 0,2–0,5 %.

Эксперименты проводились с рабочими жидкостями, которые характеризуются запатентованными составами [11, 12] с $\rho_{\text{ж}} = 1,045 \cdot 10^3$ кг/м³.

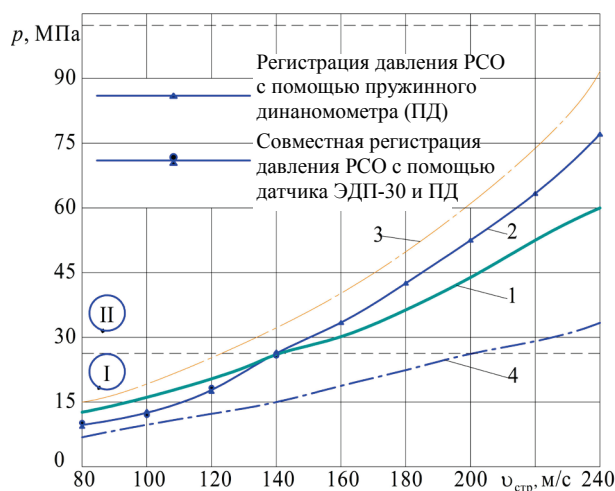


Рис. 6. Зависимости экспериментального и теоретических давлений разрушения слоя коррозии от скорости реверсивной струи при диаметре выходного сечения сопла $d_c = 1$ мм: I – зона регистрации низких давлений $p_{\text{эк}}$ с помощью датчика ЭДП-30 и пружинного динамометра; II – зона регистрации $p_{\text{эк}}$ с помощью пружинного динамометра; 1 – теоретическая кривая расчета давления $p_{\text{мин}}$ по (18) при $\rho = 3,5 \cdot 10^3$ кг/м³, $\mu = 0,1$ и $\sigma_s = 2,5$ МПа; 2 – экспериментальная кривая с рабочей жидкостью по [11, 12] при $\rho_{\text{ж}} = 1,045 \cdot 10^3$ кг/м³; 3 – теоретическая кривая по (18) при $\rho = 5 \cdot 10^3$ кг/м³, $\mu = 0,1$ и $\sigma_s = 2,5$ МПа; 4 – теоретическая кривая по (13) при $\rho = 1,5 \cdot 10^3$ кг/м³, $\mu = 0,1$ и $\sigma_s = 2,5$ МПа [13]

Fig. 6. Dependences of experimental and theoretical pressures of corrosion layer destruction on reverse jet velocity with nozzle outlet section diameter $d_c = 1$ mm: I – zone of low pressure $p_{\text{эк}}$ registration while using ЭДП-30 transducer and spring dynamometer; II – zone of registration $p_{\text{эк}}$ while using spring dynamometer; 1 – theoretical curve for pressure calculation $p_{\text{мин}}$ according to (18) at $\rho = 3.5 \cdot 10^3$ kg/m³, $\mu = 0.1$ and $\sigma_s = 2.5$ MPa; 2 – experimental curve with power fluid according to [11, 12] at $\rho_{\text{ж}} = 1.045 \cdot 10^3$ kg/m³; 3 – theoretical curve according to (18) at $\rho = 5 \cdot 10^3$ kg/m³, $\mu = 0.1$ and $\sigma_s = 2.5$ MPa; 4 – theoretical curve according to (13) at $\rho = 1.5 \cdot 10^3$ kg/m³, $\mu = 0.1$ and $\sigma_s = 2.5$ MPa [13]

ВЫВОДЫ

1. На основе приближенного энергетического метода (метода верхней оценки) разработана математическая модель расчета давления разрушения от воздействия реверсивной струи на обрабатываемую поверхность, состоящую из слоя коррозионных отложений.

2. В результате решения вариационной задачи получена теоретическая зависимость (18) для расчета минимальной величины давления разрушения $p_{\text{мин}}$ в точке соударения реверсивной струи с преградой, учитывающая механические свойства разрушаемого материала – предел текучести σ_s и его плотность ρ , скорость струи $v_{\text{стр}}$ и параметр реверсивного течения – коэффициент обжатия струи λ .

3. Сопоставление экспериментальных данных, полученных с помощью двух методик (базируются на основе применения датчика разности давлений ЭДП-30 и пружинного динамометра с пределами измерений 25 и 80 МПа соответственно), с теоретическими (получены на основе расчета по формуле (18)) в диапазоне рабочих скоростей реверсивного струйного воздействия $v_{стр} = (140-200)$ м/с и давлений на преграду 14–43 МПа показало расхождение порядка 4–15 %. Полученное незначительное расхождение между теорией и экспериментом показывает, что оптимизированная теоретическая зависимость (18) является вполне корректной и может быть использована в инженерной практике как для прогнозирования энергосиловых и кинематических параметров процесса реверсивно-струйной очистки, так и для подбора соответствующего насосного оборудования, предназначенного для реализации этого процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Устройство для очистки от коррозии плоской стальной поверхности: пат. Респ. Беларусь на изобретение от 30.10.2015 № 19453, МПК В 63В 59/08 / И. В. Качанов, А. Н. Жук, И. М. Шаталов, В. Н. Шарий.
2. Устройство для очистки от коррозии плоских стальных поверхностей: пат. Респ. Беларусь на изобретение от 12.05.2010 № 16526, МПК В 08В 3/00 / И. В. Качанов, А. Н. Жук, И. М. Шаталов, В. Н. Шарий.
3. Жук, А. Н. Технология реверсивно-струйной очистки стальных листов от коррозии перед лазерной резкой / А. Н. Жук, И. В. Качанов, А. В. Филипчик // Наука и техника. 2017. Т. 16, № 3. С. 232–241. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-3-232-241.
4. Технология струйной гидроабразивной очистки и защиты от коррозии стальных изделий с применением бентонитовой глины / И. В. Качанов [и др.]. Минск: БНТУ, 2016. 167 с.
5. Работнов, Ю. Н. Механика деформируемого твердого тела / Ю. Н. Работнов. М.: Наука, 1988. 654 с.
6. Томленов, А. Д. Теория пластического деформирования металлов / А. Д. Томленов. М.: Металлургия, 1972. 408 с.
7. Качанов, И. В. Скоростное горячее выдавливание стержневых изделий / И. В. Качанов. Минск: Технопринт, 2002. 327 с.
8. Сторожев, М. В. Теория обработки металлов давлением / М. В. Сторожев. М.: Машиностроение, 1977. 420 с.
9. Френкель, Н. З. Гидравлика / Н. З. Френкель. М.: Машиностроение, 1956. 455 с.
10. Качанов, И. В. Экспериментальные исследования по определению силы давления реверсивной струи на плоские поверхности заготовок-препятствий различной формы / И. В. Качанов, А. Н. Жук // Наука и техника. 2015. № 3. С. 30–36.
11. Состав рабочей жидкости для гидродинамической очистки металлических поверхностей от коррозии перед лазерной резкой: пат. 21455 Респ. Беларусь: МПК В 08В 3/02 / И. В. Качанов, А. Н. Жук, В. Н. Яглов, А. В. Филипчик; дата публ.: от 03.11.2014.
12. Способ очистки металлических поверхностей: заявка а20140350 Респ. Беларусь: В 08В 3/02 / И. В. Качанов, А. Н. Жук, А. В. Филипчик; дата публ.: 28.02.2016.
13. Гаврилко, В. М. Фильтры буровых скважин / В. М. Гаврилко. М.: Недра, 1985. 455 с.

Поступила 29.09.2017

Подписана в печать 04.12.2017

Опубликована онлайн 29.01.2018

REFERENCES

1. Kachanov I. V., Zhuk A. N., Shatalov I. M., Shariy V. N. (2015) *Device for Corrosion Removal From Flat Steel Surface*. Patent Republic of Belarus No 19453 (in Russian).
2. Kachanov I. V., Zhuk A. N., Shatalov I. M., Shariy V. N. (2010) *Device for Corrosion Removal From Flat Steel Surface*. Patent Republic of Belarus No 16526 (in Russian).
3. Zhuk A. N., Kachanov I. V., Filipchik A. V. (2017) Technology of Reverse-Blast Corrosion Cleaning of Steel Sheets Prior to Laser Cutting. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 16 (3), 232–241 (in Russian). DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-3-232-241.
4. Kachanov I. V., Filipchik A. V., Babich V. E., Zhuk A. N., Ushev S. I. (2016) *Technology of Hydroabrasive Blasting for Corrosion Removal and Protection Against Corrosion of Steel Products While Using Bentonite Clay*. Minsk, Belarusian National Technical University. 167 (in Russian).
5. Rabotnov Yu. N. (1988) *Mechanics of Deformable Solid Body*. Moscow, Nauka Publ. 654 (in Russian).
6. Tomlenov A. D. (1972) *Theory for Plastic Deformation of Metals*. Moscow, Metallurgiya Publ. 408 (in Russian).
7. Kachanov I. V. (2002) *Speed hot Extrusion of Rod-Shaped Products*. Minsk, Tekhnoprint Publ. 327 (in Russian).
8. Storozhev M. V. (1977) *Theory of Pressure Metal Treatment*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 420 (in Russian).
9. Frenkel N. Z. (1956) *Hydraulics*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 455 (in Russian).
10. Kachanov I. V., Zhuk A. N. (2015) Experimental Investigations on Determination of Pressure Force of Power Fluid-Jet Stream on Plane Surfaces of Specimens Having Various Shape. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, (3), 30–36 (in Russian).
11. Kachanov I. V., Zhuk A. N., Yaglov V. N., Filipchik A. V. (2014) *Composition of Working Liquid for Hydrodynamic Corrosion Removal From Metallic Surfaces Prior to Laser Cutting*. Patent Republic of Belarus No 21455 (in Russian).
12. Kachanov I. V., Zhuk A. N., Filipchik A. V. (2016) *Method for Cleaning Metallic Surfaces*: Patent Republic of Belarus No a20140350 (in Russian).
13. Gavrilko V. M. (1985) *Filters of Drilled Holes*. Moscow, Nedra Publ. 455 (in Russian).

Received: 29.09.2017

Accepted: 04.12.2017

Published online: 29.01.2018