

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА МИНИМАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ РАЗРУШЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ КОРРОЗИИ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ РЕВЕРСИВНОЙ СТРУИ РАБОЧЕЙ ЖИДКОСТИ

Докт. техн. наук, проф. КАЧАНОВ И. В., канд. физ.-мат. наук ВЕРЕМЕНЮК В. В., асп. ЖУК А. Н.

Белорусский национальный технический университет

E-mail: hidrokaf@bntu.by

MATHEMATICAL MODEL FOR CALCULATION OF MINIMUM PRESSURE PERTAINING TO DESTRUCTION OF SURFACE CORROSION LAYER DUE TO IMPACT OF WORKING LIQUID REVERSIVE STREAM

KACHANOV I. V., VEREMENYUK V. V., ZHUK A. N.

Belarusian National Technical University

Исходя из условия баланса мощностей внешних и внутренних сил решена вариационная квазистатическая задача, позволяющая определять оптимальные значения углов α и β в принятом поле линий скольжения, при которых давление разрушения принимает минимальное значение p_{\min} . Установлено, что минимальное давление p_{\min} , необходимое для разрушения слоя коррозии, отмечается при коэффициенте обжатия струи $\lambda = 0,063$ и составляет 8–17 МПа для исследованного диапазона скоростей $v = 80$ –140 м/с.

Ключевые слова: давление, реверсивная струя, коррозия, рабочая жидкость, поле, скорость, силовое воздействие.

Ил. 2. Библиогр.: 12 назв.

Due to balance of external and internal force capacities a variation quasistatic problem has been solved in the paper. The problem allows to determine optimum values of α and β angles in the accepted field of sliding lines when destruction pressure takes on a minimum value p_{\min} . It has been ascertained that the minimum pressure p_{\min} which is necessary for destruction of a corrosion layer is registered at stream compression coefficient $\lambda = 0,063$ and the pressure is equal to 8–17 MPa for the investigated speed range $v = 80$ –140 m/s.

Keywords: pressure, reversive stream, corrosion, working liquid, field, speed, force impact.

Fig. 2. Ref.: 12 titles.

Одним из направлений повышения производительности и улучшения условий труда при очистке корпусов судов от коррозии является использование метода гидроабразивной очистки (ГАО). Процесс очистки состоит в эрозионном воздействии высокоскоростной водяной струи и твердых абразивных частиц на обрабатываемый материал. Вода при этом выполняет лишь функцию носителя. В основе гидроабразивного метода, широко используемого в последнее время, лежит комбинированный механизм очистки, хрупкого и усталостного разрушения и местного оплавления [1–3]. Обработка осуществляется за счет определенного количества отдельных «съемов» материала, вызываемых ударением в него твердых частиц. Скорость процесса эрозии зависит от кинетической энергии формы частиц, угла атаки потока, механических свойств очищаемого материала.

Сущность метода состоит в том, что в рабочую зону очистки под большим давлением подают водно-песчаную смесь (пульпу). В аппаратах ГАО интенсивное смешивание песка с водой происходит в смесительном сопле. Производительность ГАО до чистого металла может составлять до 45–60 м²/ч.

Однако отрицательным моментом рассмотренной технологии следует считать неполное использование кинетической энергии струи жидкости, взаимодействующей с преградой. Растекающаяся в результате взаимодействия с преградой струя в ряде случаев может вызывать поражение обслуживающего персонала и за счет выноса из рабочей зоны продуктов коррозии и загрязнений оказывает негативное воздействие на окружающую среду.

Для устранения отмеченных недостатков, с одновременным повышением производитель-

ности труда, предлагается при очистке использовать реверсивно-струйное течение жидкости относительно обрабатываемой поверхности. Для получения такого течения сопловый блок помещается в корпус, который позволяет произвести разворот струи на 180° и тем самым увеличить силовое воздействие на обрабатываемую поверхность ориентировочно на 70–80 %. Также данное устройство решает вопросы по сбору жидкости после проведения очистки поверхности, отправляя ее на регенерацию [4].

Однако объем экспериментальных исследований, связанных с таким методом воздействия струи на преграду, является крайне недостаточным. Отсутствуют теоретические зависимости, позволяющие прогнозировать силовое воздействие струи на преграду с учетом кинематических параметров потока жидкости и механических свойств разрушаемых коррозионных отложений. Отсутствуют рекомендации по разработке конструкции соплового устройства, предназначенного для осуществления технологии реверсивно-струйной очистки поверхности.

Учитывая изложенные теоретические и экспериментальные исследования, включая опытно-конструкторские разработки, связанные с созданием технологии реверсивно-струйной очистки металлических (и не только) поверхностей, вне всякого сомнения в настоящее время являются актуальными. Для расчета минимального давления рабочей жидкости на плоскую поверхность воспользуемся методом, который в механике деформируемого твердого тела известен как метод верхней оценки (приближенный энергетический метод).

Сущность метода заключается в том, что объем очага деформации (разрушения) представляется в виде жестких (недеформируемых) блоков, скользящих один относительно другого и по границам с жесткой зоной. 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. Число и размеры треугольных блоков первоначально выбирают произвольно [5–11].

Для расчета использовали кинематически возможное поле скоростей (рис. 1а), состоящее из жестких однородных блоков. Было принято, что корпус прилегает к обрабатываемой поверхности (слою коррозии), и в результате соударения струи с преградой она, разворачиваясь на 180° , уносит блоки вверх (рис. 1а).

Для описания силового воздействия струи на плоскую преграду на основе использования метода верхней оценки сделаем ряд допущений:

- воздействие струи на обрабатываемый участок поверхности по кинематике формоизменения аналогично действию пуансона при его внедрении в жесткопластичное пространство (струя принимается квазижестким телом);
- скорость струи на выходе из конфузора равна скорости ее внедрения в преграду и, как следствие, – скорости перемещения блока, на который воздействует струйный поток рабочей жидкости;
- обрабатываемая поверхность считается плоским слоем коррозионных отложений, который покрывает основу детали и имеет одинаковую толщину, распространяясь на бесконечную длину влево и вправо от оси симметрии струи;
- материал покрытия считается изотропным, однородным, несжимаемым;
- вдоль границ между блоками касательные напряжения, возникающие при скольжении блоков, являются максимальными

$$\tau_n = k, \quad (1)$$

где k – постоянная прочности обрабатываемого материала, рассчитываемая по результатам испытаний на одноосное растяжение (сжатие) по формуле

$$k = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}}, \quad (2)$$

где σ_s – предел текучести обрабатываемого материала (слоя коррозионных отложений), определяемый по критериальной зависимости Губера – Мизеса [9];

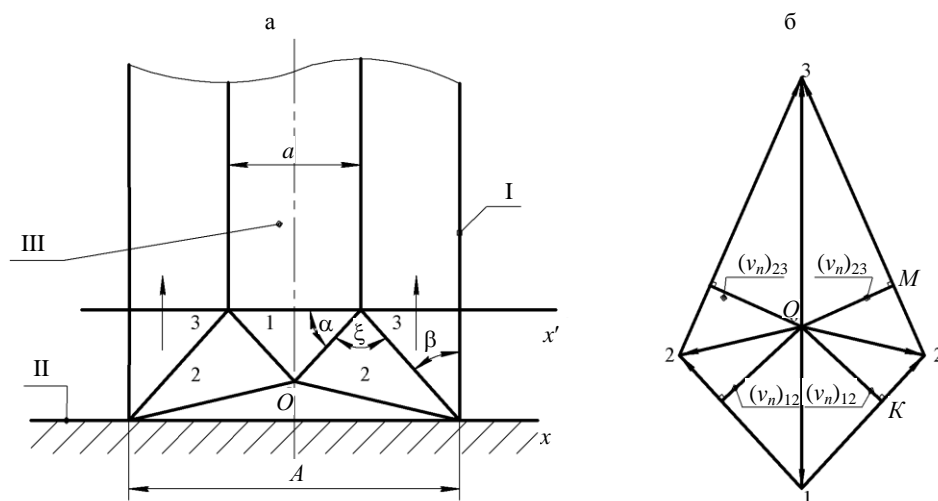


Рис. 1. Кинематически возможное поле линий скольжения, принятое для теоретического анализа процесса реверсивно-струйной очистки: а – поле линий скольжения; б – годограф скоростей; I – корпус; II – обрабатываемая поверхность; III – струя рабочей жидкости

- вид принятого поля линий скольжения не зависит от изменения скорости струи в процессе разрушения слоя коррозионных отложений;
- силы инерции не оказывают влияния на кинематику разрушения слоя коррозионных отложений.

Из последнего допущения следует, что принимаемый для расчета и соответствующий данному полю годограф скоростей (рис. 1б) сохраняет свое первоначальное направление как на начальной, так и на завершающей стадии разрушения слоя коррозионных отложений.

Для построения годографа (рис. 1б) от его центра (точка O) по вертикали вниз откладываются вектор $O1$ скоростей струи (v) и блока 1 (v_{O1}). Для построения условно принимается длина вектора $O1$, равная единице. Далее от конца вектора $O1$ проводится линия, параллельная линии 1–2, а из точки O – линии 2–0. Пересечение этих линий определяет положение точки 2. Продолжая построение подобным образом, далее получим изображенный на рис. 1б годограф. Линии годографа 1–2 и 2–3 обозначают относительные скорости блоков v_{12} , v_{23} вдоль линий разрыва 1–2 и 2–3.

Для расчета динамических напряжений на поверхностях разрыва 1–2 и 2–3 из центра O годографа откладывали отрезки OK и OM , направленные по нормали к поверхностям 1–2 и 2–3 и характеризующие нормальные компоненты скоростей $(v_n)_{12}$ и $(v_n)_{23}$ частиц разру-

шаемой среды, пересекающих поверхности разрыва скорости.

Для определения величины давления, действующего со стороны струи на поверхность коррозионного слоя и вызывающего его разрушение, воспользуемся уравнением баланса мощностей внешних и внутренних сил [8]

$$W_{г.стр} = W_{вн}, \quad (3)$$

где $W_{г.стр}$ – гидравлическая мощность струи, воздействующей на преграду; $W_{вн}$ – мощность внутренних сил.

Величина $W_{г.стр}$ определяется следующим образом:

$$W_{г.стр} = pQ = pSv, \quad (4)$$

где p – гидродинамическое давление, возникающее в точке соударения струи с преградой, Н/м^2 ; Q – расход жидкости в струе, $\text{м}^3/\text{с}$; S – площадь живого сечения струи, м^2 ; v – скорость струи (средняя) в момент соударения с преградой, м/с .

Мощность внутренних сил $W_{вн}$ в (3) представим в виде следующей суммы:

$$W_{вн} = W_{раз} + W_{дин}, \quad (5)$$

где $W_{раз}$ – мощность внутренних сил сопротивления, действующих на поверхностях разрыва скорости; $W_{дин}$ – динамическая мощность.

Для расчета мощности $W_{раз}$ воспользуемся уравнением [8]

$$W_{\text{раз}} = \sum \tau_n b l_{rs} v_{rs}, \quad (6)$$

где b – размер сечения струи; τ_n – касательные напряжения, возникающие вдоль границ блоков при их относительном перемещении. На свободных поверхностях $\tau_n = 0$, а на контактных τ_n определяется по условию Губера – Мизеса [9]

$$\tau_n = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}};$$

l_{rs} – длина границ между блоками r и s (r, s – номера блоков в принятом поле линий скольжения; $r = 0, 1, 2$; $s = 1, 2, 3$); v_{rs} – величина разрыва скорости вдоль границ смежных блоков r, s .

Для хрупких материалов, на основании данных [10], вместо σ_s можно взять значение предела прочности σ_b из испытаний на растяжение (сжатие), так как эти величины отличаются незначительно.

Перемещение частиц деформируемой сферы через поверхность разрыва сопровождается изменением их количества движения. Под действием импульса силы, величина которого определяется указанным изменением количества движения, на поверхности разрыва скорости возникают дополнительные динамические напряжения

$$(q_{\text{дин}})_{rs} = \rho (v_n)_{rs} v_{rs}, \quad (7)$$

где ρ – плотность разрушаемого материала, кг/м³; $(v_n)_{rs}$ – нормальная к поверхности разрыва компонента скорости, определяемая по годографу скоростей из рис. 1б.

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

$$W_{\text{дин}} = \rho (v_n)_{rs} v_{12}^2 b l_{rs}. \quad (8)$$

Для определения давления струи на преграду необходимо с помощью параметров поля α и β , размеров сечения струи a и b выразить длину границ блоков l_{rs} , установить соотношения между кинематическими параметрами точек деформируемой среды v_{rs} ($v_n)_{rs}$ и блока 1.

Искомые значения длин граничных поверхностей l_{rs} для блоков поля (рис. 1а) будут следующие:

$$l_{12} = \frac{a}{2 \cos \alpha}; \quad l_{02} = \frac{a \cos(\alpha - \beta)}{2 \cos \alpha \sin \xi}; \quad l_{23} = \frac{A - a}{2 \sin \beta}. \quad (9)$$

Выражения для расчета кинематических параметров разрушаемой среды, полученные на основе годографа скорости (рис. 1б), имеют вид:

$$v_{02} = \frac{va \sin \beta}{(A - a) \sin \xi}; \quad v_{03} = v \frac{a}{A - a};$$

$$v_{12} = \frac{vA \sin \beta}{(A - a) \cos(\alpha - \beta)}; \quad v_{23} = \frac{vA \cos \alpha}{(A - a) \cos(\alpha - \beta)}; \quad (10)$$

$$(v_n)_{12} = 0, \quad (v_n)_{23} = \frac{vA \sin \beta}{A - a}; \quad (v_n)_{02} = v \sin(\xi + \beta).$$

Дополнительный угол ξ введен для упрощения записей. Он однозначно определяется параметрами поля α и β

$$\sin^2 \xi = \frac{\cos^2(\alpha - \beta)}{1 + \frac{\cos^2 \alpha}{\lambda^2 \sin^2 \beta} - \frac{2 \cos \alpha \sin(\alpha - \beta)}{\lambda \sin \beta}}, \quad (11)$$

где $\lambda = \frac{a}{A - a}$ – коэффициент обжатия струи.

Зависимость (3) с учетом (5)–(8) представим в виде

$$pabv_{01} = \tau_n b (l_{12} v_{12} + l_{02} v_{02} + l_{23} v_{23}) + \rho b ((v_n)_{12} v_{12}^2 l_{12} + (v_n)_{02} v_{02}^2 l_{02} + (v_n)_{23} v_{23}^2 l_{23}). \quad (12)$$

Выражение (12) после преобразования с учетом (9) и (10) представим следующим образом:

$$p_{\text{мин}} = 2\tau_n \left((1 + \lambda) \frac{\sin \beta}{\cos(\alpha - \beta) \cos \alpha} + \lambda \frac{\cos(\alpha - \beta) \sin \beta}{\cos \alpha \sin^2 \xi} + \left(1 + \frac{1}{\lambda} \right) \frac{\cos \alpha}{\sin \beta \cos(\alpha - \beta)} \right) + \rho v_{01}^2 \left(\lambda^2 \frac{\sin^2 \beta \sin(\xi - \beta) \cos(\alpha - \beta)}{\sin^3 \xi \cos \alpha} + (1 + \lambda)^2 \frac{\cos^2 \alpha}{\cos^2(\alpha - \beta)} \right). \quad (13)$$

В уравнении (13) величины p, τ_n, ρ, v_{01} имеют тот же физический смысл, что и в (3), (4), (6).

Запишем выражение (13) следующим образом:

$$p = p_{\text{ст}} + p_{\text{дин}}, \quad (14)$$

где $p_{ст}$ – статическая составляющая давления p , учитывающая действие сил сопротивления и контактного трения на поверхности разрыва скорости:

$$p_{ст} = 2\tau_n \left((1+\lambda) \frac{\sin \beta}{\cos(\alpha-\beta)\cos \alpha} + \lambda \frac{\cos(\alpha-\beta)\sin \beta}{\cos \alpha \sin^2 \xi} + \left(1 + \frac{1}{\lambda}\right) \frac{\cos \alpha}{\sin \beta \cos(\alpha-\beta)} \right); \quad (15)$$

$p_{дин}$ – динамическая составляющая давления p , учитывающая действие динамических напряжений на поверхностях разрыва скорости и зависящая от плотности материала ρ и скорости v_{01}

$$p_{дин} = \rho v_{01}^2 \left(\lambda^2 \frac{\sin^2 \beta \sin(\xi-\beta)\cos(\alpha-\beta)}{\sin^3 \xi \cos \alpha} + (1+\lambda)^2 \frac{\cos^2 \alpha}{\cos^2(\alpha-\beta)} \right). \quad (16)$$

Изменяя углы α и β , а также подставляя коэффициент обжатия струи λ , можно получить различные значения для давления $p_{мин}$. Наиболее правильным и необходимым для разрушения слоя коррозионных отложений, естественно, будет наименьшее значение $p_{мин}$. Для определения минимума выражения (13) определим оптимальные величины углов α и β . Для задачи, решаемой в квазистатической постановке (действие динамических напряжений на поверхностях разрыва не приводит к изменению вида принятого кинематически возможного поля и годографа скоростей), оптимальную величину параметров α и β найдем, исследуя на экстремум только статическую составляющую давления $p_{ст}$. Для этого приравниваем к нулю первую производную от давления $p_{ст}$ по углам α и β :

$$\begin{cases} \frac{\partial p_{ст}}{\partial \alpha} = 0; \\ \frac{\partial p_{ст}}{\partial \beta} = 0. \end{cases} \quad (17)$$

Выражение (15) с учетом (17) представим в виде:

$$\begin{cases} \frac{\partial p_{ст}}{\partial \alpha} = 2\tau_n \left((1+\lambda) \frac{\sin \beta}{\cos(\alpha-\beta)\cos \alpha} + \lambda \frac{\cos(\alpha-\beta)\sin \beta}{\cos \alpha \sin^2 \xi} + \left(1 + \frac{1}{\lambda}\right) \frac{\cos \alpha}{\sin \beta \cos(\alpha-\beta)} \right)' = 0; \\ \frac{\partial p_{ст}}{\partial \beta} = 2\tau_n \left((1+\lambda) \frac{\sin \beta}{\cos(\alpha-\beta)\cos \alpha} + \lambda \frac{\cos(\alpha-\beta)\sin \beta}{\cos \alpha \sin^2 \xi} + \left(1 + \frac{1}{\lambda}\right) \frac{\cos \alpha}{\sin \beta \cos(\alpha-\beta)} \right)' = 0. \end{cases} \quad (18)$$

В результате дифференцирования системы уравнений (18) получим выражения для расчета углов α и β , обеспечивающие минимальное значение $p_{ст}$:

$$\begin{cases} \alpha = \beta + \arccos \frac{\sqrt{9\left(\lambda + \frac{1}{\lambda}\right) + 14}}{3\left(\sqrt{\lambda} + \frac{1}{\sqrt{\lambda}}\right)}; \\ \beta = \arctg \frac{\sqrt{9\left(\lambda + \frac{1}{\lambda}\right) + 14}}{3\lambda + 5}. \end{cases} \quad (19)$$

Особенностью расчетных зависимостей (19) является то, что при их подстановке в уравнение (13) появляется возможность прогнозировать величину минимального давления, вызывающего разрушение слоя коррозии на поверхности корпуса судна, учитывая при этом механические характеристики (ρ , σ_s , σ_b) разрушаемого материала и скорость струи v_{01} , воздействующей на преграду.

На основании теоретических расчетов был построен график, представленный на рис. 2, из которого видно, что в принятом диапазоне скоростей струи v ($v = 80-140$ м/с) минимальное давление $p_{мин}$, необходимое для разрушения слоя коррозии, отмечается при коэффициенте обжатия струи $\lambda = 0,063$ и изменяется для принятых физико-механических характеристик материала ($\sigma_s = 2,5$ МПа, $\rho = 2500$ кг/м³) в диапазоне 8–17 МПа.

Для расчетов по формуле (13) приняты на основании рекомендаций для цементированного слоя коррозии (имеющего состав 69,0 % Fe₂O₃; 5,4 % CaO; 0,17 % MgO) значения предела текучести $\sigma_s = 2,5$ МПа и плотности $\rho = 2500$ кг/м³ [12]. При выводе формулы (13) принимали, что в момент соударения струи с преградой скорость блока 1 равна [11]

$$v_{01} = 0,5v, \quad (20)$$

где v – скорость струи при взаимодействии ее с поверхностью.

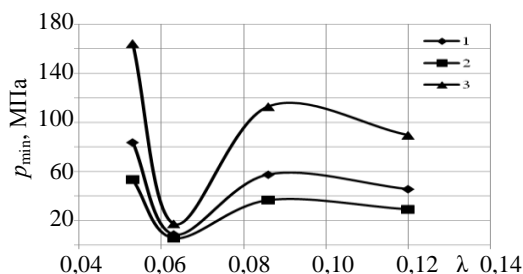


Рис. 2. График зависимости $p(\lambda)$: $\tau_n = 1,44$ МПа, $\sigma_s = 2,5$ МПа; 1 – $v = 100$ м/с; 2 – 80 м/с; 3 – $v = 140$ м/с

ВЫВОДЫ

1. На основе метода верхней оценки разработана математическая модель, позволившая путем решения вариационной задачи получить зависимость (13) для расчета минимального давления разрушения p_{\min} поверхностного слоя коррозии от воздействия реверсивной струи рабочей жидкости. Отличительным моментом выражения (13) является учет как физико-механических свойств разрушаемого материала (ρ , σ_s , σ_b), так и кинематических параметров (v – скорость струи) рабочей жидкости.

2. Исходя из условия баланса мощностей внешних и внутренних сил решена вариационная квазистатическая задача и получена система уравнений (19), позволяющая определять оптимальные значения углов α и β в принятом поле линий скольжения, при которых давление разрушения p принимает минимальное значение p_{\min} .

3. Установлено, что в принятом диапазоне скоростей струи $v = 80$ – 140 м/с минимальное давление p_{\min} , необходимое для разрушения слоя коррозии, отмечается при коэффициенте обжатия струи $\lambda = 0,063$ и изменяется для принятых физико-механических характеристик разрушаемого материала ($\sigma_s = 2,5$ МПа; $\rho = 2500$ кг/м³) в диапазоне 8–17 МПа.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Технология судостроения**: учеб. для вузов / В. Л. Александров [и др.]; под ред. А. Д. Гармашева. – СПб.: Профессия, 2003. – 342 с.
2. **Сумеркин, Ю. В.** Технология судоремонта: учеб. / Ю. В. Сумеркин. – СПб.: СПГУВК, 2001. – 271 с.

3. **Проволоцкий, А. Е.** Струйно-абразивная обработка деталей машин / А. Е. Проволоцкий. – Киев: Техника, 1989. – 177 с.

4. **Устройство** для очистки от коррозии плоских стальных поверхностей: пат. Респуб. Беларусь, МПК В08В 3/00, В63В 59/08 16526 / И. В. Качанов, А. Н. Жук, И. М. Шаталов, В. Н. Шарий, С. О. Мяделец; БНТУ. – заявл. 12.05.2010.

5. **Агасарян, Р. Р.** Струйно-абразивная обработка металлов / Р. Р. Агасарян. – Ереван: АрмНИИТИ, 1990. – 51 с.

6. **Меркулов, В. Н.** Перспективные процессы гидрообработки материалов в машиностроении / В. Н. Меркулов. – Киев: УкрНИИТИ, 1987. – 10 с.

7. **Тихомиров, Г. А.** Гидрорезание судостроительных материалов / Г. А. Тихомиров. – Л.: Судостроение, 1987. – 164 с.

8. **Проволоцкий, А. Е.** Исследование процесса гидроабразивной обработки сложнопрофильных поверхностей: дис. ... канд. техн. наук: 12.06.75 / А. Е. Проволоцкий. – Одесса, 1975. – 286 с.

9. **Работнов, Ю. Н.** Механика деформируемого твердого тела / Ю. Н. Работнов. – М.: Наука, 1988. – 654 с.

10. **Сторожев, М. В.** Теория обработки металлов давлением / М. В. Сторожев. – М.: Машиностроение, 1977. – 420 с.

11. **Томленов, А. Д.** Теория пластического деформирования металлов / А. Д. Томленов. – М.: Металлургия, 1972. – 408 с.

12. **Гаврилко, В. М.** Фильтры буровых скважин / В. М. Гаврилко. – М.: Недра, 1985. – 455 с.

REFERENCES

1. **Alexandrov, V. L., & Garmashev, A. D.** (2003) *Technology of Shipbuilding*. Saint-Petersburg: Professiya.
2. **Sumerkin, Yu. V.** (2001) *Technology of Ship-Repairing*. Saint-Petersburg: SPGUVK.
3. **Provolotsky, A. E.** (1989) *Abrasive Water Jet Machining of Machinery Parts*. Kiev: Tekhnika.
4. **Kachanov, I. V., Zhuk, A. N., Shatalov, I. M., Shariy, V. N., & Miadelets S. O.** (2010) *Device for Corrosion Cleaning of Plane Steel Surfaces. Patent of the Republic of Belarus on Invention No 16526. MPK B08B 3/00, B63B 59/08*. Minsk.
5. **Agasarian, R. R.** (1990) *Abrasive Water Jet Machining of Metals*. Yerevan: ArmNIINTI.
6. **Merkulov, V. N.** (1987) *Prospective Hydro-Processing of Materials in Mechanical Engineering*. Kiev: UkrNIINTI.
7. **Tikhomirov, G. A.** (1987) *Hydraulic Cutting of Shipbuilding Materials*. Leningrad: Sudostroenie.
8. **Provolotsky, A. E.** (1975) *Investigation of Hydroabrasive Treatment of Complicated Profile Surfaces: PhD (Engineering) Dissertation: 12.06.75*. Odessa.
9. **Rabotnov, Yu. N.** (1988) *Mechanics of Deformed Solid Body*. Moscow: Nauka.
10. **Storozhev, M. V.** (1977) *Theory of Metal Pressure Treatment*. Moscow: Mashinostroenie.
11. **Tomlenov, A. D.** (1972) *Theory of Plastic Metal Deformation*. Moscow: Metallurgia.
12. **Gavrilko, V. M.** (1985) *Filters of Bore Wells*. Moscow: Nedra.

Поступила 26.02.2013