

УДК 532.522.2

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ СТРУЙНОГО ДАВЛЕНИЯ РАБОЧЕЙ ЖИДКОСТИ НА ОБРАБАТЫВАЕМУЮ ПЛОСКУЮ ПОВЕРХНОСТЬ

Докт. техн. наук, проф. КАЧАНОВ И. В., ФИЛИПЧИК А. В.

Белорусский национальный технический университет

Актуальной задачей для современного машиностроения является разработка технологий очистки металлических поверхностей от коррозии высокоэффективными методами, превосходящими по производительности зачистные операции, проведенные абразивными инструментами (круг, лента) либо при помощи термической обработки. Одним из возможных

направлений для решения указанной задачи является использование метода гидроабразивной обработки (ГАО), основанного на струйном воздействии рабочей жидкости на обрабатываемую поверхность. Основными преимуществами способа гидроабразивной обработки являются практическое исключение двух главных факторов, сопутствующих процессу очист-

ки (геометрического и теплового), простота схемы и технологии обработки, формирование поверхности с заданной топографией, образование на поверхности обработки микроуглублений, служащих при необходимости для размещения смазки, предохраняющей изделие от преждевременного и интенсивного износа.

Возрастающие требования к качеству обработанной поверхности, снижению энергоемкости процесса вызывают необходимость совершенствования существующих технологических процессов и создания новых методов обработки [1, 2]. Наиболее эффективным способом для очистки металлических поверхностей от коррозии является гидроабразивная обработка, широко применяемая при очистке металлических поверхностей от коррозии.

Высокая производительность способа ГАО при удалении коррозионных отложений обеспечивается спецификой процесса, реализуемого с меньшим объемом удаляемого металла по сравнению с очисткой абразивным кругом, лентой [3–5]. Один из основных моментов при разработке технологии ГАО и подборе оборудования – определение силового воздействия струи на обрабатываемую поверхность.

Некоторые авторы [3, 5] для решения задачи по определению давления воздействия струи на преграду предлагают использовать теорему об изменении количества движения. Однако в расчетных зависимостях, основанных на таком подходе, не устанавливается взаимосвязь между действующей силой и механическими свойствами материала.

В [5] предлагается использовать расчетные зависимости, полученные в результате аппроксимации экспериментальных данных для описания силового воздействия струи на преграду. Однако возможности таких зависимостей ограничены условиями проведения экспериментов, для которых они получены.

В [6] различия физико-механических свойств металлических окислов и основного металла предлагается выразить в виде реологической модели, составленной из элементов Гука и Кельвина, обладающих упругостью и вязкостью. Однако сделанные в данной работе допущения, о том, что окисел представляется лишь как упругая составляющая, будут не корректными, так как противоречат реальной фи-

зической сущности процесса, цель которого – разрушение окисла на поверхности металла.

Обобщая изложенное, можно утверждать, что в рассмотренных работах не представлена корректная схема нагружения, поясняющая напряженно-деформированное состояние материала, разрушаемого струей жидкости и как следствие нет связи между механическими свойствами обрабатываемого материала, кинематическими и энергосиловыми параметрами струи жидкости, воздействующей на плоскую преграду.

Для получения решения, лишенного указанных недостатков, предлагается воспользоваться методом, который в механике деформируемого твердого тела известен как метод верхней оценки (приближенный энергетический метод) [7, 8].

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 [7–9].

Для проведения расчета используем кинематически возможное поле скоростей (рис. 1а), состоящее из жестких однородных блоков. Аналогичное поле для анализа процесса внедрения плоского пуансона в жесткопластическую среду использовалось в [7].

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: $\tau_n = \kappa$, где κ – постоянная прочности обрабатываемого материала, рассчитываемая по результатам испытаний на одноосное растяжение (сжатие) по формуле $\kappa = \sigma_s / \sqrt{3}$ [7]; σ_s – предел текучести обрабатываемого материала (слоя коррозионных отложений), определяемый по критериальной зависимости Губера-Мизеса [7];

- 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.

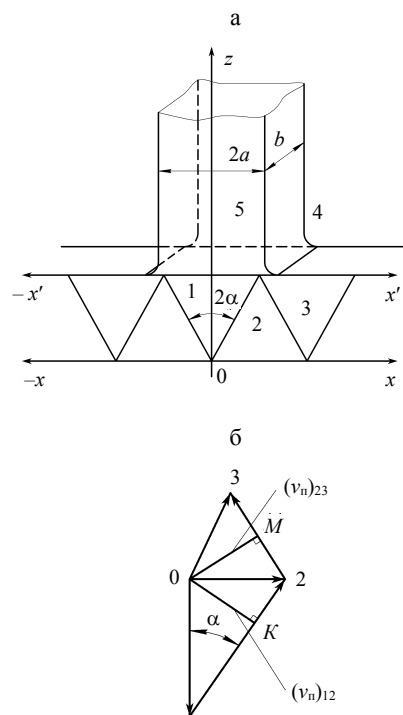
Из последнего допущения следует, что принимаемый для расчета и соответствующий данному полю годограф скоростей (рис. 1б) сохраняет свое первоначальное направление как на начальной, так и на завершающей стадии разрушения слоя коррозионных отложений.

Вследствие симметрии поля относительно оси Z на рис. 1а изображена его правая половина, что достаточно для дальнейших построений и расчетов. Цифрами обозначены: 0 – жесткая неподвижная зона (основной металл, на поверхности которого между осями x и x' находится слой коррозионных отложений); 1, 2, 3 – блоки; 4 – свободная поверхность; 5 – струя. Границы между зонами и блоками обозначаются двумя цифрами, например, 12 – граница между блоками 1 и 2; 34 – граница между блоком 3 и свободной поверхностью 4. Длину со-

ответствующих границ (линий) обозначим l_{12} , l_{23} , l_{02} и т. п. На рис. 1б приведена диаграмма относительных скоростей, называемая годографом скоростей.

Для построения годографа (рис. 1б) от центра годографа (точка O) по вертикали вниз откладывается вектор 05 (01) скоростей струи (v_{05}) и блока 1 (v_{01}). Для построения условно принимается длина вектора 05 (01), равная единице. Равенство векторов 05 и 01 обуславливается допущением о том, что в момент соударения струи с преградой скорость блока 1 (v_{01}) мгновенно становится равной скорости струи v_{05} . Далее от конца вектора 05 (01) проводится линия, параллельная линии 12, а из точки O – линии 20. Пересечение этих линий определяет положение точки 2. Продолжая построение подобным образом, далее получим изображенный на рис. 1б годограф. Линии годографа 12, 23 обозначают относительные скорости блоков v_{12} , v_{23} вдоль линий разрыва 12, 23 (рис. 1б).

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



1(5)

Рис. 1. Кинематически возможное поле линий скольжения, принятое для теоретического анализа процесса ГАО:
а – поле линий скольжения; б – годограф скоростей

Для определения величины давления, действующего со стороны струи на поверхность коррозионного слоя и вызывающего его разрушение, воспользуемся уравнением баланса мощностей внешних и внутренних сил [10]

$$W_{\text{г.стр}} = W_{\text{вн}}, \quad (1)$$

где $W_{\text{г.стр}}$ – гидравлическая мощность струи, действующей на преграду.

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

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

где p – гидродинамическое давление, возникающее в точке соударения струи с преградой, Н/м²; Q – расход жидкости в струе, м³/с; S_5 – площадь живого сечения струи, для плоской струи $S_5 = 2ab$ ($2a$ и b (рис. 1а) ширина и толщина струи соответственно); v_5 – скорость струи (средняя) в момент соударения с преградой.

Мощность внутренних сил $W_{\text{вн}}$ в (1) представим в виде следующей суммы:

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

где $W_{\text{раз}}$ – мощность внутренних сил сопротивления, действующих на поверхностях разрыва скорости. Для расчета мощности $W_{\text{раз}}$ воспользуемся уравнением [9]

$$W_{\text{раз}} = \Sigma \tau_n b l_{rs} V_{rs}, \quad (4)$$

где τ_n – касательные напряжений, возникающие вдоль границ блоков при их относительном перемещении. На свободных поверхностях $\tau_n = 0$, а на контактных – τ_n определяется по условию Губера-Мизеса [7]

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

где σ_s – предел текучести деформируемого материала, определяемый по результатам испытаний на одноосное растяжение (сжатие). Для хрупких материалов вместо σ_s можно взять значение предела прочности σ_b из испытаний на растяжение (сжатие), так как для хрупких

материалов значения σ_s и σ_b отличаются незначительно [7]; 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 .

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

$$(q_{\text{дин}})_{rs} = \rho(v_n)_{rs}v_{rs}, \quad (6)$$

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

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

$$W_{\text{дин}} = \rho(v_n)_{rs}v_{12}^2 b l_{rs}. \quad (7)$$

Для определения давления струи на преграду необходимо с помощью параметров поля α , размеров сечения струи (a, b) выразить длину границ блоков l_{rs} , установить соотношения между кинематическими параметрами точек деформируемой среды v_{rs} ($v_n)_{rs}$ и блока 1 (v_{01}).

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

$$l_{03} = l_{12} = l_{23} = a/\sin\alpha; \quad l_{02} = 2a. \quad (8)$$

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

$$\left. \begin{aligned} v_{12} &= v_{01}/\cos\alpha; \quad v_{02} = v_{01}\tan\alpha; \\ v_{23} &= v_{02}/2\sin\alpha; \quad v_{03} = v_{01}/2\cos\alpha; \\ (v_n)_{12} &= (v_n)_{23} = v_{01}\sin\alpha; \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} v_{12} &= v_{01}/\cos\alpha; \quad v_{02} = v_{01}\tan\alpha; \\ v_{23} &= v_{02}/2\sin\alpha; \quad v_{03} = v_{01}/2\cos\alpha; \\ (v_n)_{12} &= (v_n)_{23} = v_{01}\sin\alpha. \end{aligned} \quad (9)$$

Зависимость (1) с учетом (2)–(7) представим в виде

$$p_{av01} = (l_{12}v_{12} + l_{23}v_{23} + l_{02}v_{02} + l_{03}v_{03})\tau_n + \rho[(v_n)_{12}v_{12}^2 l_{12} + (v_n)_{23}v_{23}^2 l_{23}]. \quad (10)$$

Выражение (10) после преобразований с учетом (8) и (9) представим следующим образом:

$$p = 2\tau_n \left(\frac{1}{\sin \alpha \cos \alpha} + \operatorname{tg} \alpha \right) + \rho v_{01}^2 \frac{5}{4 \cos^2 \alpha}. \quad (11)$$

В уравнении (11) величины p , τ_n , ρ , v_{01} имеют тот же физический смысл, что и в (2), (4), (5).

Запишем выражение (11)

$$p = p_{ст} + p_{дин}, \quad (12)$$

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

$$p_{ст} = 2\tau_n \left(\frac{1}{\sin \alpha \cos \alpha} + \operatorname{tg} \alpha \right); \quad (13)$$

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

$$p_{дин} = \rho v_{01}^2 \frac{5}{4 \cos^2 \alpha}. \quad (14)$$

Изменяя угол α , можно получить различные значения для давления p . Наиболее правильным, естественно, будет наименьшее значение. Для отыскания минимума (11) определим оптимальную величину угла α . 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 параметра поля α найдем, исследуя на экстремум только статическую составляющую давления $p_{ст}$. Для этого приравняем нулю первую производную от давления $p_{ст}$ по углу α

$$\frac{dp_{ст}}{d\alpha} = 0. \quad (15)$$

Выражение (15) с учетом (13) представим в виде

$$\frac{dp_{ст}}{d\alpha} = 2\tau_n \left(\frac{1}{\sin \alpha \cos \alpha} + \operatorname{tg} \alpha \right)' = 0. \quad (16)$$

В результате решения (16) находим

$$\operatorname{tg} \alpha = 0,707 \Rightarrow \alpha_{opt} = 35^\circ. \quad (17)$$

Таким образом, минимум функции (11), т. е. величины давления p будет при оптимальном угле поля $\alpha_{opt} = 35^\circ$. Подставляя данное значение угла в выражение (11) и принимая случай предельного трения ($\tau_n = \sigma_s/2$), получим

$$p_{min} = 2,83\sigma_s + 1,86\rho v_{12}^2, \quad (18)$$

где p_{min} – минимальное давление, которое необходимо создать на поверхности для разрушения слоя коррозии.

Для дальнейших расчетов по (18) на основании рекомендаций [11] для сцементированного слоя коррозии, имеющего состав 69 % Fe_2O_3 , 5,4 % CaO , 0,17 % MgO , примем значения предела текучести σ_s и плотности ρ , равными соответственно:

$$\sigma_s = \sigma_b = 2,5 \text{ МПа};$$

$$\rho = 2500 \text{ кг/м}^3.$$

Отличительной особенностью (18) является то, что оно позволяет прогнозировать величину минимального давления p_{min} , вызывающего разрушение коррозии на поверхности металла, учитывая при этом механические характеристики (σ_s , σ_b) разрушаемого материала и скорость струи рабочей жидкости, действующей на преграду.

Для практического использования формулы (18) необходимо уточнить вопрос, касающийся определения скорости v_{01} . При выводе (18) принималось, что в момент соударения струи с преградой последняя, точнее блок 1, сразу же принимает скорость потока, равную v_{05} . Однако такое допущение ($v_{01} = v_{05}$) приводит к тому, что гидравлическая мощность струи, расходуемая на разрушение слоя коррозии, равна нулю. Решение этой задачи [12] показывает, что максимальная гидравлическая мощность струи,

затраченная на разрушение преграды, реализуется лишь в случае

$$v_{01} = 0,5v_{05} = 0,5v_{стр}, \quad (19)$$

где $v_{стр}$ – скорость струи при взаимодействии ее с поверхностью.

Из (19) видно, что в результате взаимодействия струи с преградой используется только часть гидравлической энергии, которой обладает струя, вытекающая из сопла, что совпадает с выводами [12].

С учетом (19) формула (18) примет следующий вид:

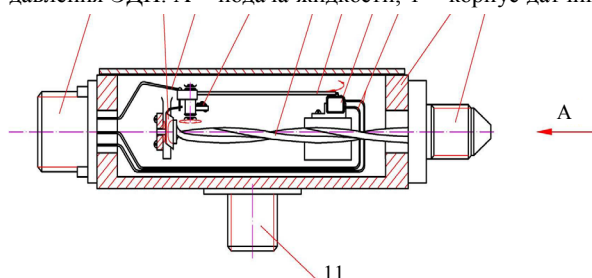
$$p_{min} = 2,83\sigma_s + 0,465\rho v_{стр}^2. \quad (20)$$

Формула (20) позволяет определять минимально необходимое давление разрушения в зависимости от скорости струи.

Для проверки результатов, полученных по теоретической зависимости (20), была разработана методика экспериментального определения величины давления, действующего на площадке соударения струи с обрабатываемой поверхностью.

При этом для экспериментального измерения давления при воздействии струи на преграду использовался электронный датчик давления ЭДП-30 (рис. 2), предназначенный для измерений перепада (разности) давлений.

Рис. 2. Схема электронного датчика разности (перепада) давления ЭДП: А – подача 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)

Датчик давления ЭДП-30 имеет погрешность измерений не более 1 %, при этом максимальный предел измерения составляет 45 МПа. Сигнал с датчика выводился на регистрирующую аппаратуру в виде комбинированного

цифрового прибора Щ4313 с максимальной погрешностью измерений 3,5 %.

Принцип работы датчика основан на использовании тензорезистивного эффекта, вызванного изменением удельного электросопротивления проводника при его деформации. Входным сигналом для датчика является давление измеряемой среды, которое изгибает трубный элемент 6. В конце этого элемента закреплена вращающаяся пластина 9, посредством которой происходит перемещение подпружиненного штока реостата 5. При изменении давления жидкости и перемещения штока реостата меняется величина сопротивления, создаваемого реостатом 4, тем самым увеличивается или уменьшается сигнал на выходе из датчика.

Для наиболее эффективного применения гидроабразивной обработки в качестве инструмента очистки поверхностей от продуктов коррозии необходимо знать оптимальные значения основных параметров, определяющих процесс очистки, т. е. значения давления в точке соударения струи с очищаемой поверхностью, скорость струи. На рис. 3 представлены теоретические значения давления p_t , определенные по (20), экспериментальные давления разрушения p_p и диапазон изменения скоростей струи $v_{стр}$.

Экспериментальная скорость струи определялась с учетом давления на входе в конфузор по (21)

$$v_{стр} = \frac{Q}{S}, \quad (21)$$

где Q – расход рабочей жидкости; S – площадь поперечного сечения конфузора.

Также на рис. 3 показаны три экспериментально установленные зоны очистки для используемой рабочей жидкости.

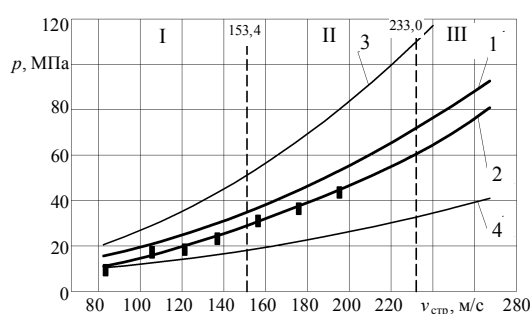


Рис. 3. Зависимость теоретического и экспериментального давления разрушения p от скорости струи $v_{стр}$ при диаметре выходного сечения конфузора $d_k = 1$ мм: I – зона отсутствия процесса очистки; II – зона гарантированного процесса очистки; III – зона начала резки; 1 – теоретическая кривая по (20) при $\rho = 2,5 \cdot 10^3$ кг/м³; $\sigma_s = \sigma_b = 2,5$ МПа;

2 – экспериментальная кривая с рабочей жидкостью по [1, 2] при $\rho = 1,04 \cdot 10^3$ кг/м³; 3 – теоретическая кривая по (20) при $\rho = 4 \cdot 10^3$ кг/м³; $\sigma_s = \sigma_b = 2,5$ МПа; 4 – теоретическая кривая по (20) при $\rho = 1 \cdot 10^3$ кг/м³; $\sigma_s = \sigma_b = 2,5$ МПа

Зона I – отсутствие процесса очистки из-за недостаточного силового воздействия струи; зона II – зона гарантированного процесса очистки до момента начала процесса резки обрабатываемого материала; в III зоне рабочая струя воздействует на металлическую основу с силой, при которой происходит процесс микроотрыва частиц металла (стружки) от его основной массы, т. е. кинетическая энергия струи превращается в механическую работу резания непосредственно в зоне обработки металлической поверхности (начала резки) [13].

Эксперименты проводились с рабочими жидкостями, состав которых характеризуется патентной новизной [1, 2]. Плотность этих жидкостей $\rho = 1,04 \cdot 10^3$ кг/м³.

На графике видно, что экспериментальные величины давления струи жидкости на обрабатываемую поверхность материала расположены ниже теоретических величин. Сравнение экспериментальных значений давления воздействия на поверхность материала, полученных при разной скорости истечения струи, с теоретическими величинами показывает, что с повышением скорости истечения струи разница между этими величинами уменьшается. Так, при изменении скорости струи $v_{стр}$ от 153,4 до 233,0 м/с $p_s = (0,8-0,9)p_t$, при этом погрешность находится в пределах 15–19 %.

ВЫВОДЫ

1. На основе метода верхней оценки и принятых допущений разработана математическая модель для расчета силового воздействия струи на преграду, состоящую из слоя коррозионных отложений.

2. На основе решения вариационной задачи, связанной с нахождением минимального давления разрушения, получена теоретическая зависимость для расчета давления в точке соударения струи с преградой, учитывающая механические свойства разрушаемого материала, а также кинематические параметры струи.

3. Сопоставление экспериментальных данных, полученных с помощью датчика ЭДП-30, с теоретическими в диапазоне скоростей струйного воздействия 150–300 м/с показало расхождение 15–19 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Способ** создания кавитирующей струи жидкости: пат. РФ № 13312 МПК В 08В3/04 / И. В. Качанов, В. Н. Яглов, В. К. Недбальский, А. В. Филипчик (РБ). – № а 20081284, заявл. 14.10.2008; опубл. 26.03.2010 г.
2. **Способ** создания кавитирующей струи жидкости: пат. РФ № 14239 МПК В 08В3/04 / И. В. Качанов, В. К. Недбальский, И. М. Шаталов, А. В. Филипчик (РБ). – № а 20090681, заявл. 12.05.2009; опубл. 30.12.2010.
3. **Агасарян, Р. Р.** Струйно-абразивная обработка металлов / Р. Р. Агасарян. – Ереван: АрмНИИНТИ, 1990. – 51 с.
4. **Меркулов, В. Н.** Перспективные процессы гидрообработки материалов в машиностроении / В. Н. Меркулов. – Киев: УкрНИИНТИ, 1987. – 10 с.
5. **Тихомиров, Г. А.** Гидрорезание судостроительных материалов / Г. А. Тихомиров. – Л.: Судостроение, 1987. – 164 с.
6. **Проволоцкий, А. Е.** Исследование процесса гидроабразивной обработки сложнопрофильных поверхностей: дис. ... канд. техн. наук: 12.06.75 / А. Е. Проволоцкий. – Одесса, 1975. – 286 с.
7. **Работнов, Ю. Н.** Механика деформируемого твердого тела / Ю. Н. Работнов. – М.: Наука, 1988. – 654 с.
8. **Сторожев, М. В.** Теория обработки металлов давлением / М. В. Сторожев. – М.: Машиностроение, 1977. – 420 с.
9. **Томленов, А. Д.** Теория пластического деформирования металлов / А. Д. Томленов. – М.: Металлургия, 1972. – 408 с.
10. **Качанов, И. В.** Математическая модель расчета давления рабочей жидкости на преграду, имеющую вид слоя коррозионных отложений / И. В. Качанов, А. С. Мойса, А. В. Филипчик // Агропанорама. – 2007. – № 1. – С. 5–9.
11. **Гаврилко, В. М.** Фильтры буровых скважин / В. М. Гаврилко. – М.: Недра, 1985. – 432 с.
12. **Френкель, Н. З.** Гидравлика: учеб. для вузов / Н. З. Френкель. – М.: Машиностроение, 1956. – 455 с.
13. **Тихомиров, Г. А.** Гидрорезание судостроительных материалов / Г. А. Тихомиров. – Л.: Судостроение, 1987. – 164 с.

Поступила 21.11.2011