

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ ПОКРЫТИЯ ВОДОЛЕДЯНОЙ СТРУЕЙ ПРИ ОЧИСТКЕ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

**М.А. Бурнашов<sup>1</sup>, А.Н. Прежбилов<sup>2</sup>, Ю.В. Василенко<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, г. Орел,

<sup>2</sup>НПАО «Научприбор», г. Орел

В период эксплуатации агрегаты и детали машин подвергаются негативному воздействию окружающей среды, которое, в свою очередь, приводит к образованию налета, в виде остатков старого лакокрасочного покрытия, продуктов горения горюче-смазочных материалов, различных масляных и жировых пленок, а так же следов коррозии.

Различные виды загрязнений снижают эксплуатационные характеристики изделий, ухудшают их внешний вид, усложняют процесс ремонта оборудования.

В статье сформирована классификация загрязнений, наиболее часто встречающихся на поверхностях деталей машин после длительной эксплуатации. Рассмотрены и проанализированы известные методы очистки поверхностей.

Описан процесс очистки поверхностей деталей машин от загрязнений водоледяной струей с заранее подготовленными частицами, а также процесс формирования водоледяной струи. Описаны преимущества данного метода: низкая себестоимость, безотходность, повышение качества обработанной поверхности и экологичность, что значительно отличает его от ранее известных.

Показана схема взаимодействия частицы льда с покрытием, на основе которой разработана теплофизическая модель разрушения загрязнений водоледяной струей. Теплофизическая модель позволяет научно обоснованно назначать режимы обработки и параметры водоледяной струи.

В заключении представлены зависимости силы трения ледяной частицы с преградой (загрязнением), изменения размера частицы льда при очистке и количества тепла, переданного в частицу льда.

*Ключевые слова:* моделирование, разрушение, очистка поверхностей, водоледяная струя.

## Введение

Гидроструйные технологии широко применяются в машиностроении для резания материалов и очистки поверхностей деталей машин от загрязнений [1–20].

### 1. Описание проблемы

В процессе эксплуатации деталей машин на наружных и внутренних поверхностях образуются загрязнения, различающиеся составом, свойствами, прочностью сцепления с поверхностью деталей. Данные загрязнения снижают стойкость деталей к коррозии, увеличивают износ, снижают срок эксплуатации.

При проведении ремонта загрязнения снижают производительность труда, ухудшают точность контроля и дефектации деталей, снижают качество ремонта и ресурс отремонтированных деталей и машин.

Среди множества причин образования загрязняющих покрытий можно выделить наиболее распространенные: эмульсионные и масляные пленки, попадание загрязнений из окружающей среды, термическое разложение масел, окисление поверхности металлов, литейный пригар, остатки краски, накипь и т. д.

Загрязнения на объектах ремонта по химическому составу делятся:

- на органические (масляные и жировые отложения, пленки лакокрасочных покрытий, консервационные смазки);
- неорганические (накипь, дорожная грязь, продукты коррозии);
- смешанные (нагары, лаки, консистентные смазки, производственные загрязнения).

Загрязнения агрегатов, сборочных единиц и деталей включают в себя:

- наружные отложения;
- остатки смазочных материалов;

- углеродистые отложения;
- продукты коррозии;
- накипь;
- остатки старых лакокрасочных покрытий.

Загрязнения от остатков топливно-смазочных материалов (ТСМ) и продуктов их трансформации являются наиболее распространенными. При работе автомобилей смазочные материалы значительно изменяются, что обусловлено процессами «старения» – окисления и полимеризации. Чаще всего это:

- продукты неполного сгорания топлива;
- продукты окисления;
- продукты деструкции углеводов;
- продукты полимеризации;
- продукты конденсации и коагуляции углеводородных и гетероорганических соединений;
- продукты коррозии и биоповреждения металлов в среде ТСМ.

В современных условиях требования к ресурсосбережению и экологической чистоте производственных процессов ужесточаются. В полной мере это относится и к очистке поверхностей.

Среди известных методов очистки наиболее универсальными и перспективными являются струйные способы.

В то же время гидроабразивная очистка с использованием в качестве абразива песка и подобных материалов имеет ряд недостатков.

Среди них следующие:

- наличие абразива затрудняет очистку внутренних и труднодоступных поверхностей;
- наведение шероховатости на чисто обработанных поверхностях;
- необходимость утилизации отработанного загрязненного абразива;
- высокая стоимость абразивного материала, в том числе и его доставки.

Таким образом, для широкого внедрения гидроабразивной технологии очистки деталей машин необходима замена абразивного материала.

Водолеяная очистка является не только экологически чистым методом, но и экономичным.

Частицы льда, обладая свойствами твердых частиц, при разгоне до высоких скоростей позволяют удалять многие загрязнения, не повреждая основания очищаемой поверхности. Использование при очистке водяного льда существенно упрощает регенерацию очищающей среды.

Водолеяная очистка имеет ряд преимуществ по отношению к остальным способам очистки:

- минимальное вредное воздействие на окружающую среду;
- низкая стоимость очищающего материала;
- отсутствие необходимости транспортирования и хранения большого количества абразивного материала;
- возможность замкнутого, безотходного цикла;
- устранение абразивного воздействия на материал;
- абразив не забивается в щели деталей узлов;

- отсутствие пыли в процессе очистки;

- малый износ инструмента.

Формирование водолеяной струи для очистки поверхности деталей машин происходит следующим образом: высоконапорная струя воды диаметром 0,15–0,3 мм смешивается с увлекаемым потоком ледяных частиц по принципу эжекции, в результате чего образовывалась двухфазная структура – водолеяная струя. Для данного процесса оптимальным является использование заранее подготовленных ледяных частиц размерами от 1,5 до 2 мм (рис. 1).

Механизм разрушения материала покрытия под действием водолеяной струи (рис. 2) определяется многофазным характером высокоскоростного потока (вода – частицы льда). При этом струя воды, затратив часть своей энер-

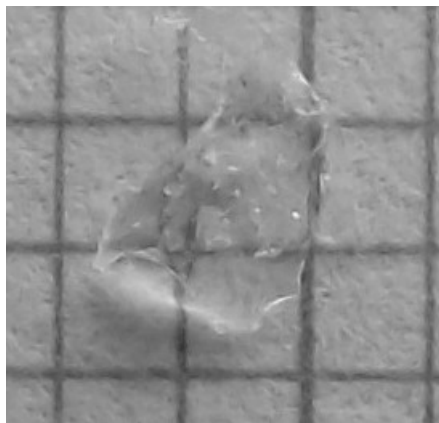


Рис. 1. Ледяная частица

гии на разгон частиц льда, способна создать в разрушаемом материале напряжения соизмеримые с его прочностью. В то же время частицы льда осуществляют ударное воздействие на материал, образуя в нем микротрещины, являющиеся концентраторами напряжения, что способствует повышению эффективности очистки в целом.

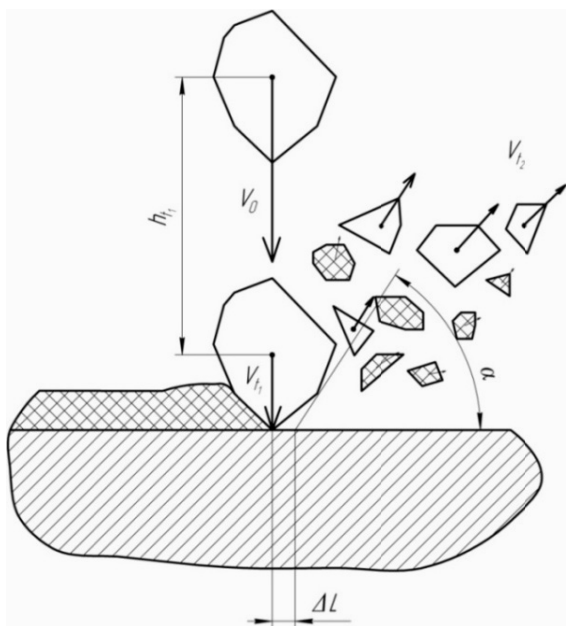


Рис. 2. Схема воздействия на удаляемое покрытие ледяной частицы и её разрушения

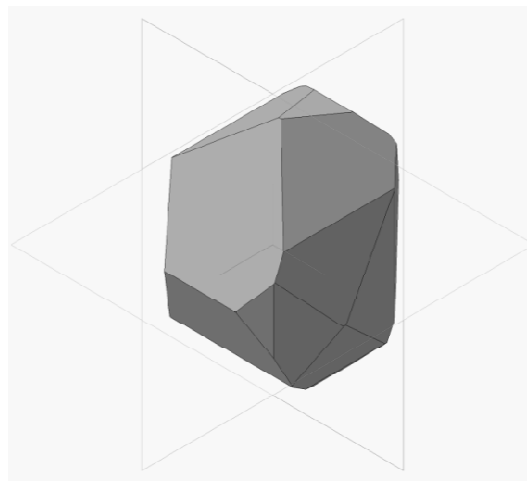


Рис. 3. Вид модели ледяной частицы (изометрия)

Гранулированный лед наиболее экономично получать путем дробления кускового льда, полученного в промышленных льдогенераторах. При дальнейшем механическом дроблении из ледяной крошки сепарируется необходимая фракция. После получения таким способом рабочего гранулированного льда была разработана модель ледяной частицы в программной среде Компас-3D (рис. 3).

## 2. Теплофизическая модель разрушения

В процессе формирования водолеяной струи можно выделить следующие основные стадии:

1. Водяная струя, под высоким давлением вырываясь из струеформирующей насадки, создает в камере смешивания область низкого давления, в которую из подводящего канала увлекаются частицы льда.

2. В камере смешивания происходит увлечение частиц льда водяной струей, их перемешивание с потоком воды, а также интенсивный теплообмен.

3. В коллиматоре происходит разгон смеси воды и ледяных частиц.

Вся генерируемая при ударном взаимодействии энергия в замкнутой системе «частица льда – разрушаемый материал – материал детали» преобразуется в тепловой поток и работу резания. Определение доли энергии, затраченной на нагрев частицы льда, который сопровождается возникновением локальных зон обратного фазового перехода (ОФП) льда и на нагрев материала представляет особый интерес.

Загрязняющие покрытия обладают низкой способностью к теплопередаче, следовательно, определяющие механические и теплофизические свойства материала покрытий будет являться температура контактной поверхности «частица льда – материал».

Схема процесса взаимодействия частицы льда с покрытием представлена на рис. 4.

Уравнение движения частицы льда в удаляемом материале запишется в следующем виде:

$$m(t) \frac{dV}{dt} = -\frac{1}{2} C_x \rho_c(T) S(h) V^2(t) - \sigma_{\text{сопр}}(t) S(h) - F_{mp}(t, \varphi); \quad (1)$$

где  $m(t)$  – текущее значение массы частицы льда с учетом ОФП на контактирующей поверхности;  $V(t)$  – текущее значение скорости проникания;  $C_x$  – коэффициент лобового сопротивления частицы

льда;  $S(h, \varphi)$  – текущее значение проекции площади сечения частицы льда с учетом глубины проникания и наличия ОФП на элементарной площадке в пределах телесного угла  $\Delta\varphi$ :

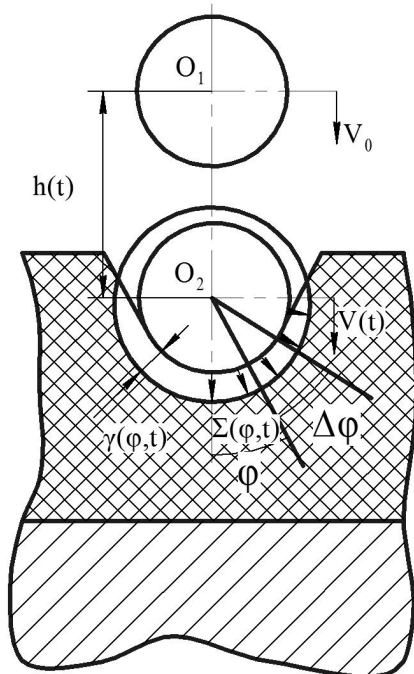
$$S(h, \varphi) = \pi R^2(t, \varphi) \left[ \frac{h(t)}{R(t, \varphi)} H(R - h) + H(h - R) \right], \quad (2)$$

где  $h(t)$ ,  $R(t)$  – функции глубины проникания и текущего радиуса частицы льда с учетом ОФП соответственно;  $H(\dots)$  – функция Хевисайда.

Первое слагаемое правой части выражения (1) характеризует потерю кинетической энергии ледяной частицы при взаимодействии с материалом. Второе слагаемое отражает сопротивление материала разрушающему воздействию, а третье – силу трения, действующую на частицу при проникновении в удаляемый материал.

Для рассматриваемой схемы движения частицы льда в материале при наличии фазовых переходов на контактной поверхности сила трения будет зависеть от наличия жидкой фазы:

$$F_{\text{тр}}(t, \varphi) = f_V(t) \sigma_r(t, \varphi) S(h, \varphi) \cdot H[dA(t, \varphi) - (q + C_V \Delta T_1) dm(t, \varphi)] + 2\mu_1 \frac{V(t, \varphi)}{\gamma(t, \varphi)} S(h, \varphi) \cdot H[(q + C_V \Delta T_1) dm(t, \varphi) + dA(t, \varphi)]; \quad (3)$$



**Рис. 4. Расчетная схема процесса взаимодействия водяной струи и частицы льда с удаляемым покрытием**

$$\sigma_x(t, \varphi) = \frac{1}{2} \rho_c(t) V^2(t, \varphi); \quad (4)$$

$$\sigma_r(t, \varphi) = \frac{v_{\text{л}}}{1 - v_{\text{л}}} \sigma_x(t, \varphi);$$

где  $(q + C_V \Delta T_1) dm(t, \varphi)$  – значение энергии, необходимой для перевода твердой фазы сферического слоя массой  $dm$  в жидкое состояние;  $\mu_1$  – коэффициент динамической вязкости жидкой фазы;  $\gamma$  – размер зазора между поверхностью частицы льда и профилем каверны в преграде. Значение  $\gamma$  в пределах дискретной угловой координаты  $\Delta\varphi$  определяется массой твердой фазы, ограниченной поверхностью в виде шарового слоя, «теряемой» в каждый дискретный момент времени.  $f_i(T)$  – функция скоростного коэффициента трения;  $\sigma_x(t, \varphi)$  – значение осевого напряжения на поверхности контакта частицы льда с преградой, в общем случае, равное давлению скоростного напора;  $\sigma_r(t, \varphi)$  – значение радиального напряжения на поверхности контакта частицы льда с преградой.

Работа сил сопротивления, определяющая интенсивность разогрева контактной зоны, представляется следующей суммой:

$$A(t, \varphi) = A_1(t, \varphi) + A_2(t, \varphi) + A_3(t, \varphi), \quad (5)$$

где  $A_1(t, \varphi)$ ,  $A_2(t, \varphi)$ ,  $A_3(t, \varphi)$  – работа инерционной составляющей силы сопротивления, работа силы трения и работа сил сопротивления пластическому деформированию покрытия соответственно.

Изменение размера частицы льда при очистке в пределах угловой координаты  $\varphi$  определяется по следующей зависимости:

$$d(t, \varphi) = 2 \cdot \sqrt[3]{\frac{3}{4\pi\rho_{\text{л}}} \left( m(t) - \int_0^{\frac{\pi}{2}} m_{\text{л}}(\varphi) d\varphi \right)}, \quad (6)$$

где  $\rho_{\text{л}}$  – плотность частицы льда;  $m_{\text{л}}(\varphi)$  – масса частицы льда, «потерянная»,

$$A(t, \varphi) = Q(t, \varphi), \quad (7)$$

где  $Q(t, \varphi)$  – тепловая энергия системы контактирующих тел.

В соответствии с условием переноса тепла через граничную поверхность двух контактирующих тел при идеальном тепловом контакте [4] и законом сохранения энергии количество тепла, перешедшее в частицу льда, и соответствующее изменение её массы определяются:

$$dQ_1(t, \varphi) = \frac{v_M}{v_L} dA(t, \varphi);$$
$$m(t) = m(t - \tau) - \int_0^{\varphi_k} \frac{Q_1(t, \varphi)}{q + C_V^M \Delta T_1} d\varphi, \quad (8)$$

где  $\Delta T_1$  – диапазон изменения температуры контактного слоя частицы льда, определяющего момент ОФП ( $\Delta T_1 = T_{\text{ОФП}} - T_{01}$ ;  $T_{\text{ОФП}}$  – температура ОФП;  $T_{01}$  – начальная температура частицы льда);  $m_0$  – начальная масса частицы льда.

Учитывая, что рассмотренный единичный акт взаимодействия ледяной частицы с разрушаемым материалом покрытия подобен остальным, с учетом некоторого коэффициента подобия, становится возможным вычислить процент энергии, затраченной на нагрев частицы льда, который сопровождается возникновением локальных зон обратного фазового перехода (ОФП) льда и на нагрев материала.

#### Заключение

Полученная теплофизическая модель позволяет разрабатывать технологические процессы очистки и научно обоснованно назначать режимы обработки:

- давление водяной струи;
- диаметр струеформирующего сопла;
- размеры ледяных частиц;
- температуру хранения ледяных гранул;
- расстояние от сопла до обрабатываемой поверхности;
- скорость подачи соплового аппарата при обработке.

#### Литература / References

1. Beth R., Lu Y., Scott F. Ergonomics of Abrasive Blasting: A Comparison of High Pressure Water and Steel Shot. *Applied Ergonomics*, 2006, vol. 37, iss. 5, pp. 659–667. DOI: 10.1016/j.apergo.2005.05.014
2. Jamali S.S., Mills D.J. Steel Surface Preparation Prior to Painting and Its Impact on Protective Performance of Organic Coating. *Progress in Organic Coatings*, 2014, vol. 77, iss. 12, pp. 2091–2099. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2014.08.001
3. Schmid R. Evolution of UHP Waterjetting Equipment: Surface Preparation Process Found to Yield Higherproductivity Than Gritblasting. *Metal Finishing*, 2005, vol. 103, iss. 11, pp. 41–60. DOI: 10.1016/S0026-0576(05)80821-9
4. Kiyohashi H, Handa K. A study of Production of Ice Particles by the Heat of Vaporization of Cryogenic Liquefied Fuels and Their Applications in Ice Jets. *Proceedings of the International Symposium on New Applications of Waterjet Technology*, Ishinomaki, Japan, 1999, pp. 51–60. DOI: 10.1007/978-94-011-5320-1\_6
5. Haghbin N., Spelt J.K., Papini M. Abrasive Waterjet Micro-Machining of Channels in Metals: Comparison Between Machining in Air and Submerged in Water. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2015, vol. 88, pp. 108–117. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2014.09.012
6. Nouraei H., Wodoslawsky A., Papini M., Spelt J.K. Characteristics of Abrasive Slurry Jet Micro-Machining: A Comparison with Abrasive Air Jet Micro-Machining. *Journal of Materials Processing Technology*, 2013, vol. 213, iss. 10, pp. 1711–1724. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2013.03.024
7. Jafar R.H.M., Hadavi V., Splet J.K., Papini M. Dust Reduction in Abrasive Jet Micro-Machining Using Liquid Films. *Powder Technology*, 2016, vol. 301, pp. 1270–1274. DOI: 10.1016/j.powtec.2016.08.002
8. Máša, V., Kuba P. Efficient Use of Compressed Air for Dry Ice Blasting. *Journal of Cleaner Production*, 2016, vol. 111, part A, pp. 76–84. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.07.053
9. Vatter Och Polymer-Nytt Skarwertyg. *Nord Emball*, 1975, vol. 41, no. 2, pp. 25–26.
10. Byrne G.D., O'Neill L., Twomey B., Dowling D.P. Comparison Between Shot Peening and Abrasive Blasting Processes as Deposition Methods for Hydroxyapatite Coatings Onto a Titanium alloy. *Surface and Coatings Technology*, 2013, vol. 216, pp. 224–231. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2012.11.048

11. Perect A. Abrasive Suspension Water Jet Cutting Optimization Using Orthogonal Array Design. *Procedia Engineering*, 2016, vol. 149, pp. 366–373. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.680
12. Pawar, N.S., Lakhe R.R., Shrivastava R.L. Validation of Experimental Work by Using Cubic Polynomial Models for Sea Sand as an Abrasive Material in Silicon Nozzle in Abrasive Jet Machining Process. *Materials Today: Proceedings*, 2015, vol. 2, iss. 4–5, pp. 1927–1933. DOI: 10.1016/j.matpr.2015.07.156
13. Dong Y., Liu W., Zhang H., Zhang H. On-Line Recycling of Abrasives in Abrasive Water Jet Cleaning. *Procedia CIRP*, 2014, vol. 15, pp. 278–282. DOI: 10.1016/j.procir.2014.06.045
14. Putz M., Dittrich M., Dix M. Process Monitoring of Abrasive Waterjet Formation. *Procedia CIRP*, 2016, vol. 46, pp. 43–46. DOI: 10.1016/j.procir.2016.03.189
15. Zelenak M., Foldyna J., Scucka J., Hloch S., Riha Z. Visualisation and Measurement of High-Speed Pulsating and Continuous Water Jets. *Measurement*, 2015, vol. 72, pp. 1–8. DOI: 10.1016/j.measurement.2015.04.022
16. Molitoris M., Piteř J., Hořovský A., Tóthová M., Židek K. A Review of Research on Water Jet with Slurry Injection. *Procedia Engineering*, 2016, vol. 149, pp. 333–339. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.675
17. Jerman M., Orbanić H., Lebar A., Sabotin I., Dreřar P., Valentinčić J. Measuring the Water Temperature Changes in Ice Abrasive Water Jet Prototype. *Procedia Engineering*, 2016, vol. 149, pp. 163–168. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.651
18. Shukla R., Singh D. Experimentation Investigation of Abrasive Water Jet Machining Parameters Using Taguchi and Evolutionary Optimization Techniques. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2017, vol. 32, pp. 167–183. DOI: 10.1016/j.swevo.2016.07.002
19. Галынский, В.А., Юдин В.М., Сычев С.А. Льдоструйная очистка при ремонте. Труды ГОСНИТИ. 2009. Т. 103, № 1. С. 30–31. [Galynskiy V.A., Yudin V.M., Sychev S.A. [Blast Cleaning During Repair]. *Trudy GOSNITI* [Proceedings of GOSNITI], 2009, Vol. 103, no. 1, pp. 30–31. (in Russ.)] DOI:10.22184/1993-8578.2015.60.6.84.93
20. Меркулов А.Ф., Абрамов И.Г. Результаты исследования льдоструйной эрозионной очистки деталей машин от твердого прочносвязанного загрязнения. Междунар. науч. журн. 2011. № 3. С. 71–76. [Merkulov A.F., Abramov I.G. [Researching Ice-Blast Erosion Cleaning of Machine Parts from Tightly Bound Solid Pollution]. *The International scientific journal*, 2011, no. 3, pp. 71–76. (in Russ.)] DOI: 10.1007/978-3-540-73645-5\_5

**Бурнашов Михаил Анатольевич**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры конструкторско-технологического обеспечения машиностроительных производств, Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, г. Орел, arshin721@yandex.ru.

**Прежбилов Александр Николаевич**, заместитель генерального директора по развитию, НПАО «Научприбор», г. Орел, chru@zaonauchpribor.ru.

**Василенко Юрий Валерьевич**, кандидат технических наук, доцент, директор Технологического института им. Н.Н. Поликарпова, Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, г. Орел, vuuv-post@yandex.ru.

*Поступила в редакцию 18 октября 2016 г.*

## SIMULATING OF THE PROCESS OF DESTRUCTING COVER BY WATER-ICE JET WHEN CLEANING MACHINE COMPONENTS

M.A. Burnashov<sup>1</sup>, arshin721@yandex.ru,  
A.N. Prezhbilov<sup>2</sup>, chpu@zaonauchpribor.ru,  
Yu.V. Vasilenko<sup>1</sup>, vyuv-post@yandex.ru

<sup>1</sup>Orel State University of I.S. Turgenev, Orel, Russian Federation,

<sup>2</sup>JSC "Nauchpribor", Orel, Russian Federation

Contaminations of different composition, features, and adhesion to components surface strength form on external and internal surfaces during machine components operating. These contaminations decrease components resistance to corrosion, increase wear, and decrease service life.

When performing repairing contaminations decrease labor capacity, decrease components control and faults control effectiveness, decrease repairing quality and repaired components and machines service life.

Present article includes classification of the contaminations, most often on machine components surfaces after long-term operation. This article describes and analyzes known methods of surfaces cleaning.

Article includes description of machine components surfaces cleaning from contaminations by means of water-ice jet with preliminary prepared particles, as well, as it describes water-ice jet forming process. Following advantages of this method are described: low self-cost, wastelessness, increasing treated surface quality and environmental friendliness, significantly distinguishing this method from previously known ones.

This document presents scheme of ice particle interaction with cover, being the basis for generating thermo-physical model of contamination destruction by water-ice jet. Thermo-physical model allows scientifically reasoned choosing of treating modes and water-ice jet parameters.

Conclusion includes dependences of ice particle friction on obstacle (contamination), ice particle size changing during cleaning and quantity of heat, transferred into the ice particle.

*Keywords: modeling, destruction, cleaning of surfaces, water ice stream.*

*Received 18 October 2016*

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Бурнашов, М.А. Моделирование процесса разрушения покрытия водоледяной струей при очистке деталей машин / М.А. Бурнашов, А.Н. Прежбилов, Ю.В. Василенко // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2017. – Т. 17, № 2. – С. 67–73. DOI: 10.14529/engin170208

### FOR CITATION

Burnashov M.A., Prezhbilov A.N., Vasilenko Yu.V. Simulating of the Process of Destructing Cover by Water-Ice Jet When Cleaning Machine Components. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2017, vol. 17, no. 2, pp. 67–73. (in Russ.) DOI: 10.14529/engin170208