

## Параметрический анализ режимов струйной промывки деталей с глухими отверстиями разной конфигурации

© А.Н. Королев, В.И. Колпаков, А.С. Филимонов, П.П. Гомаров

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*Проведены исследования, относящиеся к приоритетному направлению — рациональному природопользованию. Работа является продолжением изучения важной проблемы межоперационной промывки деталей в механическом, гальваническом, заготовительном и других производствах. Представлены результаты численных расчетов процесса струйной промывки деталей с глухими резьбовыми отверстиями, заполненными жидким загрязнением. Выработано обоснование ограничения по диаметру резьбовых отверстий, допускающих эффективное удаление загрязнений. Выполнено сравнение струйной промывки деталей с глухими отверстиями и глухими резьбовыми отверстиями. Проведенные исследования конкретизируют экспозицию деталей при струйной промывке.*

**Ключевые слова:** гальванохимическая обработка, метод промывки, струйная промывка, коноидальная насадка.

**Введение.** В некоторых областях промышленности на долю операций очистки изделий методом промывки и подготовки поверхности приходится 10 % трудоемкости изготовления изделия. Интенсивность водопотребления в ходе процесса очистки может достигать  $4 \text{ м}^3$  на  $1 \text{ м}^2$ , при этом образуется до  $1 \text{ м}^3$  жидких отходов на  $1 \text{ м}^2$  (что характерно для гальванического производства). В масштабах страны это приводит к образованию большого количества сточных вод (до 10 млн  $\text{м}^3$  в год) с малой концентрацией ионов и солей тяжелых металлов (от 0,01 до 0,1 г/л). Поскольку работа централизованных очистных сооружений малоэффективна, безвозвратно теряются тысячи тонн цветных металлов [1].

Учитывая, что только в России десятки тысяч предприятий используют промывку деталей, проблему следует считать актуальной [2].

В настоящее время рекомендации по назначению режимов промывки ограничиваются либо минимальной продолжительностью промывки при струйном воздействии, либо количеством замен (в час) отмывающего раствора в ванне. Такой подход не позволяет рационально расходовать водные ресурсы и ценные химические элементы отмывающих растворов и отмываемого слоя [3].

Струйная промывка обладает рядом преимуществ перед другими методами очистки изделий, в основном это эффективность и экономичность [4]. Создание методики выбора режимов струйно-динамической промывки деталей с глухими резьбовыми отверстиями, заполненными

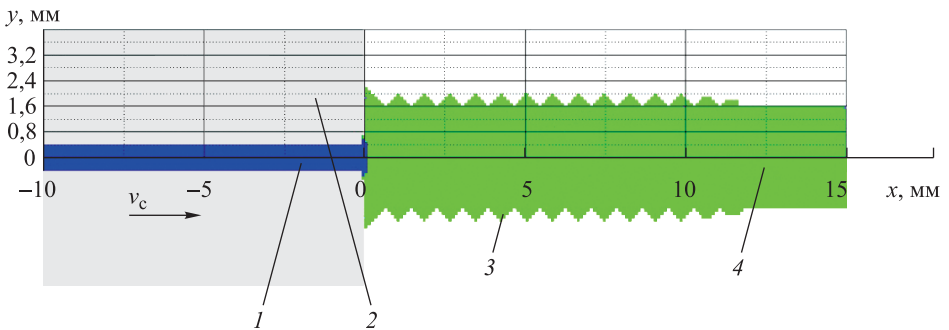
жидким загрязнением, представляется весьма сложной задачей, не решенной до настоящего времени.

В работе предлагаются рекомендации по выбору *допустимых диаметров резьбовых отверстий*, при которых обеспечивается эффективное удаление загрязнений, и *скорости истечения водяной струи* при струйно-динамической промывке деталей высшей группы сложности на основе полученных в результате численных экспериментов зависимостей скорости проникания от диаметра глухих резьбовых отверстий на поверхности деталей и степени остаточных загрязнений в отверстиях от времени.

**Постановка задачи.** В целях получения информации, необходимой для выработки методики назначения режимов и условий струйно-динамической промывки, проведены исследования, выполненные с помощью численных расчетов [5, 6] в программном комплексе ANSYS Autodyn в системе координат Эйлера [7].

Расчетная осесимметричная область включала следующие объекты (рис. 1):

- струю воды диаметром  $d_c$ , непрерывно истекающую со скоростью  $v_c$ ;
- жидкое загрязнение, заполняющее глухое отверстие, — столб воды длиной  $l_0$  и диаметром  $d_0$ , заполнявший глухое отверстие с резьбой (физические свойства струи воды и жидкого загрязнения предполагаются идентичными);
- область над лицевой поверхностью детали, не заполненную средой и предназначенную для исследования выброса жидкости из глухого отверстия.

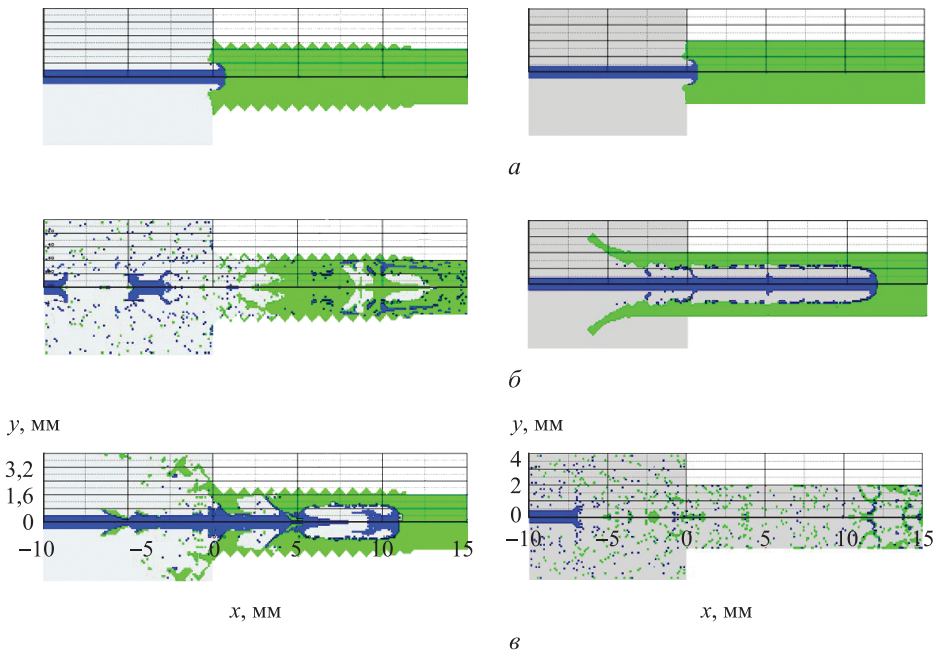


**Рис. 1.** Расчетная область задачи:

1 — струя воды; 2 — рабочая зона; 3 — метрическая резьба; 4 — жидкое загрязнение

Объектам присвоены свойства материалов и стартовые скорости, назначены выходные параметры. Прочность воды на разрыв принималась равной 28 МПа в соответствии с данными для дистиллированной воды. Расчеты проведены в диапазоне  $v_c = 3 \dots 7$  м/с для резьбы М3, М4, М5.

**Исследование гидроочистки отверстий различной конфигурации.** Для изучения физических особенностей и обоснования выбора режимов струйно-динамической промывки деталей с глухими резьбовыми отверстиями проведен сравнительный анализ очистки отверстий с резьбой и без резьбы (рис. 2). В качестве примера рассмотрим отверстие диаметром 4 мм (D4) и резьбовое отверстие М4 при истечении водяной струи из многофорсуночных головок со скоростью  $v_c$ , равной 3; 5; 7 м/с.



**Рис. 2.** Объем остаточного загрязнения при гидроочистке отверстия с резьбой (слева) и без резьбы (справа) со скоростью  $v_c = 3$  м/с истечения водяной струи в различные моменты времени:  
 $t = 0,5$  (а); 10 (б); 30 мс (в)

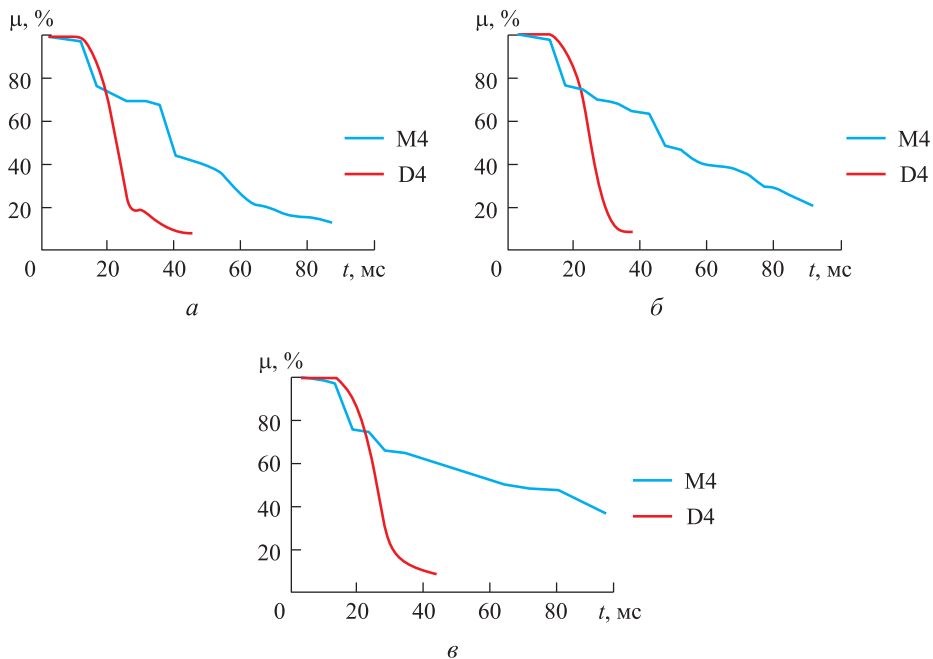
В результате численных исследований осесимметричного процесса проникания жидкой струи, которая непрерывно истекает в глухие отверстия, заполненные жидким загрязнением, установлены основные закономерности (рис. 3).

Наилучшие условия промывки глухих отверстий *без резьбы* обеспечивает квазистационарный режим проникания струи в загрязнение, реализующийся при  $d_o > d_c$  ( $d_o$  — диаметр отверстия;  $d_c$  —

диаметр струи) и скорости истечения водяной струи из многофорсуночных головок  $v_c > 5...7$  м/с. Для этого режима характерна линейная зависимость

$$\mu(t) = V_{\text{ост}}/V_0 \cdot 100 \%,$$

где  $\mu$  — относительный объем остаточных загрязнений;  $V_{\text{ост}}$  — объем остаточного загрязнения в произвольный момент времени  $t$ ;  $V_0$  — объем остаточного загрязнения при  $t = 0$ .



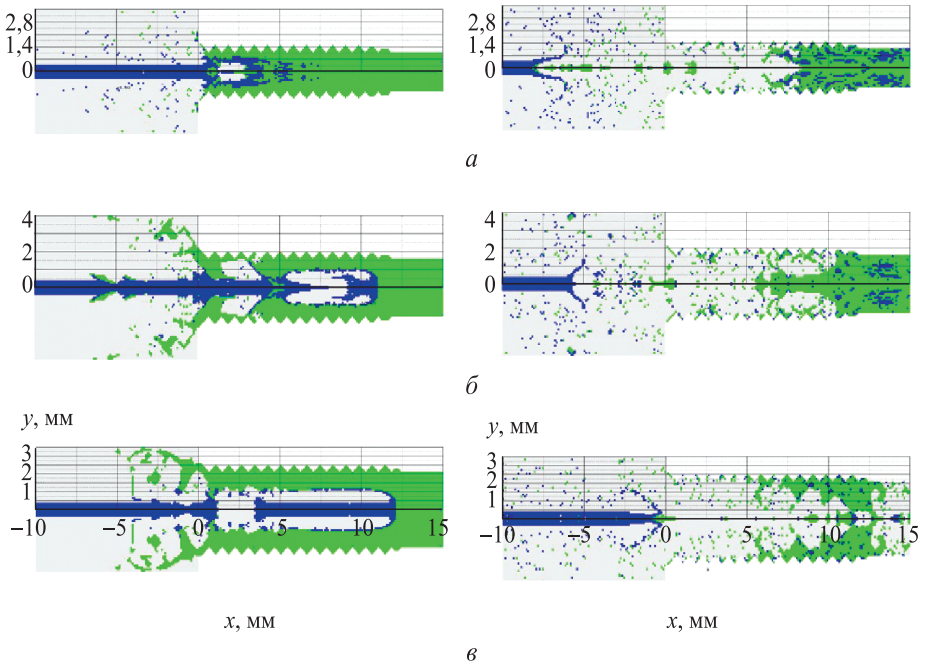
**Рис. 3.** Объем остаточного загрязнения в различные моменты времени при скорости  $v_c$  истечения водяной струи 3 (а), 5 (б), 7 м/с (в)

С повышением скорости истечения возрастает скорость очистки. В квазистационарном режиме удаляется около 90 % загрязнения за время  $\approx 25$  мс. После того как струя достигает дна отверстия, происходит нарушение линейности функции  $\mu(t)$ , которое вызвано боковыми ударами вымываемого загрязнения по движущейся внутрь отверстия струе. При этом скорость удаления загрязнения падает. По истечении  $\approx 40$  мс отверстие можно считать очищенным.

За счет сложной конфигурации отверстия с *резьбой* квазистационарный режим проникания струи в загрязнение реализуется на начальном, непродолжительном отрезке времени — около 5 мс. Далее гидроочистка сопровождается непрерывными боковыми ударами вымываемого загрязнения по движущейся внутрь отверстия струе, завихрениями потоков и медленным промыванием труднодоступных резьбовых канавок. Следствием этих процессов является значитель-

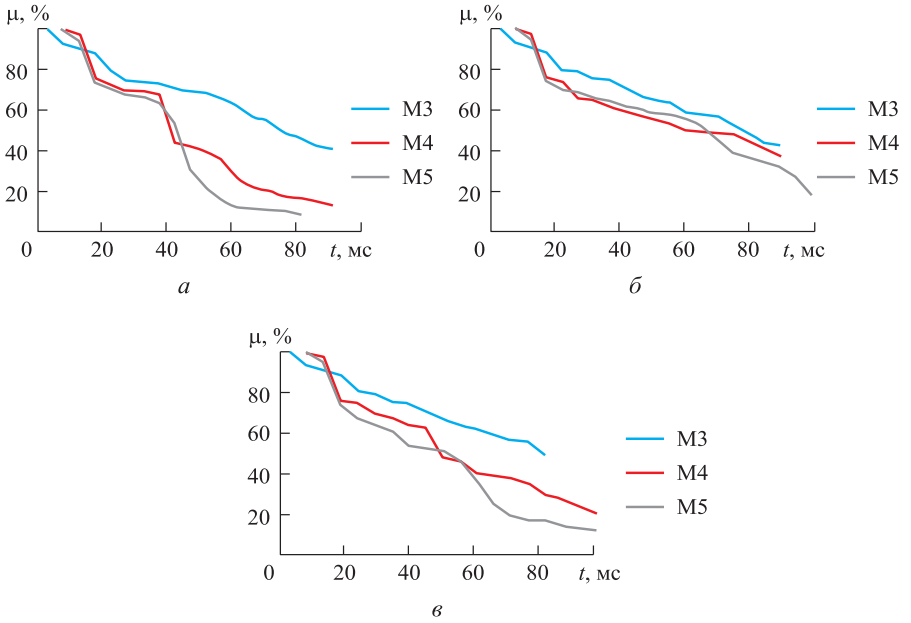
ное возрастание времени очистки (до 90 мс и более), ее производительность снижается в 2–3 раза.

**Влияние диаметра резьбового отверстия на режим гидроочистки.** На рис. 4 приведены характеристики режимов гидроочистки отверстий М3, М4, М5 при истечении водяной струи со скоростью  $v_c = 5$  м/с.



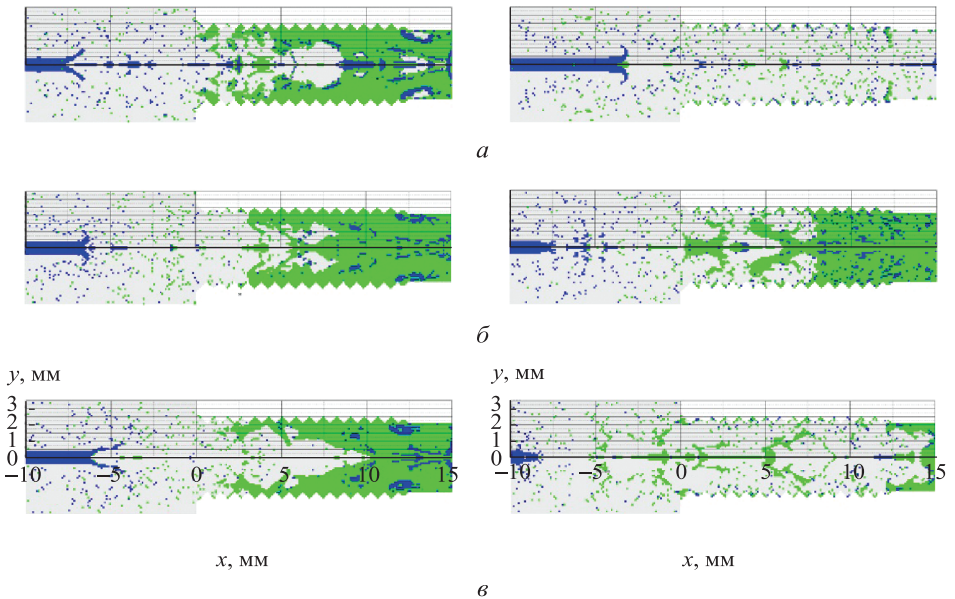
**Рис. 4.** Объем остаточного загрязнения при гидроочистке резьбовых отверстий М3 (а), М4 (б), М5 (в) со скоростью  $v_c = 5$  м/с истечения водяной струи в моменты времени  $t = 10$  (слева) и 80 мс (справа)

В работе были рассмотрены случаи истечения водяной струи со скоростями  $v_c = 3; 5; 7$  м/с для вариантов отверстий М3, М4 и М5 (результаты представлены на рис. 5). Вследствие сложной конфигурации поверхности очистка отверстий диаметром  $d_o < 3$  мм затруднена или нереализуема данным методом. При увеличении диаметра  $d_o$  отверстий наблюдается значительный рост производительности процесса гидроочистки независимо от скорости струи ( $d_c = 0,8$  мм). Целесообразным можно считать применение метода струйной промывки при значении коэффициента  $K_{ц} = d_o/d_c$  ( $K_{ц}$  — введенный показатель применимости метода) более 5 (4/0,8).



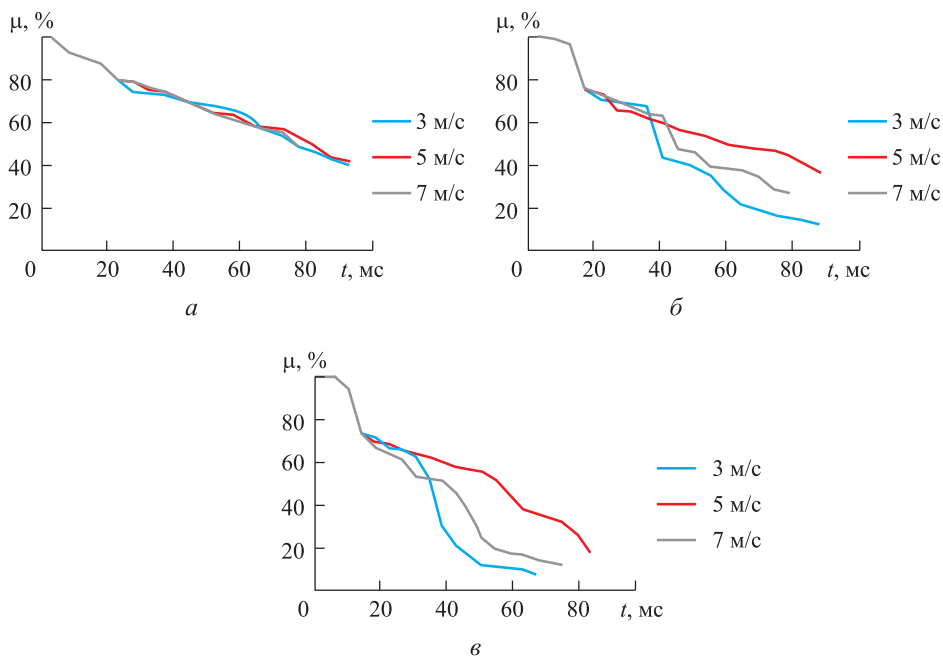
**Рис. 5.** Объем остаточного загрязнения в различные моменты времени при скорости  $v_c$  истечения водяной струи 3 (*a*), 5 (*б*), 7 м/с (*в*) для отверстий М3, М4 и М5

**Влияние скорости водяной струи на режим гидроочистки.** На рис. 6 приведены характеристики режимов гидроочистки отверстия М5 при истечении водяной струи с различной скоростью.



**Рис. 6.** Объем остаточного загрязнения при гидроочистке резбового отверстия М5 со скоростью  $v_c$  истечения водяной струи 3 (*a*), 5 (*б*), 7 м/с (*в*) в моменты времени  $t = 20$  (слева) и 60 мс (справа)

Анализ численного исследования режимов гидроочистки позволил установить, что при увеличении диаметра резьбового отверстия значимость выбора режимов подачи воды повышается (результаты представлены на рис. 7). При этом самые низкие значения производительности процесса получены на скорости струи 5 м/с, а самые высокие — на пониженной скорости 3 м/с.



**Рис. 7.** Объем остаточного загрязнения в различные моменты времени при диаметре резьбового отверстия М3 (а), М4 (б), М5 (в) и разной скорости  $v_c$

Отсюда следует вывод, что функция производительности процесса от скорости подачи водяной струи нелинейна и необходимо проведение дополнительных экспериментов. Можно предположить, что при такой сложной конфигурации отверстия значения производительности имеют случайный характер.

**Выводы.** Математическое моделирование процесса струйно-динамической промывки деталей с резьбовыми отверстиями, реализованное в двумерной осесимметричной постановке с использованием программного комплекса ANSYS Autodyn, позволило:

- разработать новые рекомендации по назначению режимов промывки отверстий с резьбой;
- провести сравнительную оценку скорости гидроочистки отверстий с резьбой и глухих отверстий соответствующего диаметра без резьбы;
- оценить целесообразность применения метода очистки для резьбовых отверстий малых диаметров.

Следствием проведенной работы может являться:

- 1) повышение экономичности и эффективности метода струйно-динамической промывки;
- 2) рациональный расход водных ресурсов и ценных химических элементов при очистке изделий;
- 3) снижение объемов сточных вод и повышение экологичности производства.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Алексеев А.Н., Тарасов В.А. Разработка и внедрение струйной пакетной технологии для очистки поверхностей деталей на предприятиях машиностроительного комплекса. *Справочник. Инженерный журнал*, 2003, № 12, с. 6–10.
- [2] Тарасов В.А., Галиновский А.Л. Проблемы и перспективы развития гидроструйных технологий ракетно-космического машиностроения. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, № 3 (15). URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/636.html>
- [3] Виноградов С.С. *Промывные операции в гальваническом производстве* Кудрявцев В.Н., ред. Москва, Глобус, 2007, с. 157.
- [4] Тарасов В.А., Алексеев А.Н., Боярская Р.В., Королев А.Н. Повышение эффективности гальванохимической обработки деталей ЛА. *Общероссийский научно-технический журнал «Полет»*, 2010, № 3, с. 42–46.
- [5] Тарасов В.А., Колпаков В.И., Королев А.Н., Баскаков В.Д. Численное моделирование процесса струйно-динамической промывки деталей с глухими отверстиями. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2011, № 4, с. 34–41.
- [6] Казакова О.И., Колпаков В.И. Численное моделирование гидроабразивной резки листовых заготовок из алюминиевых сплавов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2012, № 7, с. 56–60.
- [7] Абашин М.И., Барзов А.А., Галиновский А.Л., Казакова О.И., Ковалев А.А., Колпаков В.И., Муляр С.Г., Новожилов С.А., Сысоев Н.Н. *Численное моделирование гидрофизических процессов в зоне ударно-динамического взаимодействия ультразвуку жидкости с твердотельной мишенью*. МГУ им. М.В. Ломоносова. Препринт. Москва, 2011, № 4/2011, с. 35.

Статья поступила в редакцию 30.04.2015

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Королев А.Н., Колпаков В.И., Филимонов А.С., Гомаров П.П. Параметрический анализ режимов струйной промывки деталей с глухими отверстиями разной конфигурации. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2015, вып. 4. URL: <http://engjournal.ru/catalog/mesc/meng/1393.html>

**Королев Александр Николаевич** — ассистент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана, зам. декана факультета «Специальное машиностроение» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 20 научных работ в области технологии машиностроения. e-mail: [dekanatsm2010@mail.ru](mailto:dekanatsm2010@mail.ru)





**Колпаков Владимир Иванович** — д-р техн. наук, профессор кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 150 научных работ в области математического моделирования динамических процессов.  
e-mail: kolpakov54@mail.ru



**Филимонов Алексей Сергеевич** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана, зам. декана факультета «Специальное машиностроение» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 30 научных работ в области технологии машиностроения. e-mail: alexf72@mail.ru



**Гомаров Павел Петрович** — студент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: pavel-gomarov@yandex.ru



## Parametric analysis of the jet flushing modes of the components with blind holes of different configuration

© A.N. Korolev, V.I. Kolpakov, A.S. Filimonov, P.P. Gomarov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

*The article presents the results of carried out investigations related to such priorities as rational nature. This research continues the study of important issue of interoperation washing of components in mechanical, electroplating, harvesting and other industries. The results of numerical calculations of jet washing of the components with blind threaded holes, filled with liquid contamination are presented. A rationale limit by the diameter of the threaded holes that allow the efficient removal of contaminants has been worked out. A comparison of jet washing of the components with blind holes and tapped blind holes has been carried out. The studies concretized the exposure of details at jet flushing.*

**Keywords:** *galvanochemical processing, method of flushing, jet flushing, conoidal nozzle.*

### REFERENCES

- [1] Alekseev A.N., Tarasov V.A. *Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal – Handbook. Engineering Journal*, 2003, no. 12, pp. 6–10.
- [2] Tarasov V.A., Galonovsky A.L. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii – Engineering Journal: Science and Innovations*, 2013, issue 3 (15), Available at: <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/636.html>.
- [3] Vinogradov S.S. *Promyvnnye operatsii v galvanicheskom proizvodstve* [The washing operations in galvanic production]. Koudryavtsev V.N., ed. Moscow, Globus Publ., 2007, pp. 157.
- [4] Tarasov V.A., Alekseev A.N., Boyarskaya R.V., Korolev A.N. *Obscherossiyskiy nauchno-tekhnicheskiy zhurnal "Polet" — The All-Russia Scientific-technical journal "Polet"*, 2010, no. 3, pp. 42–46.
- [5] Tarasov V.A., Kolpakov V.I., Korolev A.N., Baskakov V.D. *Vestnik MGTU imeni N.E. Baumana. Seriya Mashinostroenie — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Mechanical Engineering*, 2011, no. 4, pp. 34–41.
- [6] Kazakova O.I., Kolpakov V.I. *Izvestiya vysshykh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie — Proceedings of the Higher Education Institutions. Machine Building*, 2012, no. 7, pp. 56–60.
- [7] Abashin M.I., Barzov A.A., Galonovsky A.L., Kazakova O.I., Kovalev A.A., Kolpakov V.I., Mulyar S.G., Novozhilov S.A., Sysoev N.N. *Chislennoe modelirovanie gidrofizicheskikh protsessov v zone udarno-dinamicheskogo vzaimodeistviya ultrastrui zhidkosti s tverdotelnoi mishen'yu* [Numerical modeling of hydrophysical processes in the area of shock-dynamic interaction between ultra-jet of fluid and solid targets]. Preprint. Moscow, Lomonosov MSU, 2011, no. 4, pp. 35.

**Korolev A.N.**, assistant lecturer at the Department “Technologies of Rocket and Space Engineering” in Bauman Moscow State Technical University, Deputy Dean of the Faculty “Special machinery” at BMSTU. He is the author of more than 20 research papers in the field of engineering technologies. e-mail: [dekanatsm2010@mail.ru](mailto:dekanatsm2010@mail.ru)

**Kolpakov V.I.**, Dr. Sci. (Eng.), professor of the Department “Technologies of Rocket and Space Engineering” at Bauman Moscow State Technical University. He is the author of more than 150 research papers in the field of mathematical modeling of dynamic processes. e-mail: kolpakov54@mail.ru

**Filimonov A.S.**, Cand. Sci. (Eng.), associate professor at the Department “Technologies of Rocket and Space Engineering” at Bauman Moscow State Technical University, Deputy Dean of the Faculty "Special machinery" at BMSTU. He is the author of more than 30 research papers in the field of engineering technologies. e-mail: alexf72@mail.ru

**Gomarov P.P.**, a student at the Department “Technologies of Rocket and Space Engineering” at Bauman Moscow State Technical University.  
e-mail: pavel-gomarov@yandex.ru