

УДК 621.357.7:658.52.011.56.012.3](035)

В. А. Т а р а с о в, В. И. К о л п а к о в,
А. Н. К о р о л е в, В. Д. Б а с к а к о в

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СТРУЙНО-ДИНАМИЧЕСКОЙ ПРОМЫВКИ ДЕТАЛЕЙ С ГЛУХИМИ ОТВЕРСТИЯМИ

Приведены результаты численных исследований технологической операции струйно-динамической промывки глухих отверстий, заполненных загрязнением. Выявлены общие закономерности процесса промывки и получены зависимости, характеризующие основные особенности процесса удаления загрязнений. Предложена методика назначения режимов и условий ведения промывки глухих отверстий.

E-mail: tarasov@sm.bmstu.ru; alxnik@yahoo.com

Ключевые слова: *загрязнение, струйно-динамическая промывка, глухое отверстие, численное исследование, струя, интенсивность промывки, относительное остаточное загрязнение.*

Струйно-динамическая промывка (СДП), основанная на обработке узлов и деталей машин пакетом водяных струй, истекающих в ламинарном режиме из многофорсуночных струеформирующих головок, — это весьма перспективная промышленная технология удаления загрязнений, остатков смазочно-охлаждающих жидкостей, химических реагентов и иных инородных сред при изготовлении, эксплуатации и ремонте машиностроительной продукции различного назначения. По сравнению со штатными технологиями промывки, основанными на методе погружения деталей в очищающую жидкость, СДП позволяет экономить энергетические и водные ресурсы, повышать производительность труда, снижать уровень загрязнения окружающей среды [1].

Эксплуатация опытно-промышленных установок СДП показывает, что наиболее сложно удаляются твердые и жидкие загрязнения из глубоких глухих отверстий. При этом до настоящего времени не разработаны рекомендации по назначению рациональных режимов и условий ведения СДП деталей с отверстиями такого типа. Во многом это вызвано трудностями в проведении экспериментальных исследований по изучению динамики очистки глухих отверстий.

Цель настоящей работы — численные исследования основных закономерностей массопереноса при взаимодействии жидкой струи с жидким загрязнением, расположенным в глухом отверстии, и разработка на основе полученных результатов рекомендаций по ведению

СДП деталей машин. На данном этапе исследований свойства струи и загрязнения принимались идентичными.

Численные исследования проводились с помощью стандартного программного обеспечения ANSYS AUTODYN в системе координат Эйлера. Расчетная осесимметричная область включала в себя: непрерывно истекающую со скоростью v_c струю воды диаметром d_c ; столб воды длиной l_0 и диаметром d_0 , заполнявший глухое отверстие цилиндрической формы и область над лицевой поверхностью детали, не заполненную средой и предназначенную для исследования выброса жидкости из глухого отверстия. Прочность воды на разрыв принималась равной 28 МПа в соответствии с данными для дистиллированной воды [2]. При проведении расчетов варьировались параметры v_c в диапазоне 3...7 м/с и d_0 в интервале 2...18 мм. Указанные диапазоны соответствовали техническим возможностям опытно-промышленной установки СДП и конструктивным особенностям группы типовых деталей ракетной техники с гальваническими покрытиями. Глубина отверстий на данном этапе исследований оставалась постоянной и составляла $l_0 = 20$ мм. Данное числовое значение l_0 — предельное для указанной группы деталей. Диаметр $d_c = 0,8$ мм соответствовал диаметру форсунки струеформирующей головки лабораторной установки.

Анализ динамики массопереноса в системе струя–загрязнение позволил выявить характерные механизмы промывки глухих отверстий (рис. 1). Так, при проникании высокоскоростной ($v_c = 7$ м/с) струи в отверстие большого диаметра ($d_0 = 5$ мм) до момента достижения струей дна отверстия промывка проходит в квазистационарном режиме и работает механизм вымывания (вытеснения) загрязнения через кольцевой зазор между проникающей струей и боковой стенкой отверстия (рис. 1, а, б). В момент достижения струей воды дна отверстия квазистационарный режим промывки переходит в нестационарный режим и начинает работать механизм выталкивания оставшегося загрязнения, сопровождающийся деструкцией загрязнения и струи (рис. 1, в–е). При этом скорость, приобретаемая загрязнением в процессе взаимодействия со струей, хотя и невелика, но ориентирована в сторону, противоположную направлению движения струи.

Отметим радиальные удары, которым подвергается струя воды со стороны загрязнения в процессе выталкивания (см. рис. 1, д). Подобные удары частично разрушают струю. Однако в силу слабой интенсивности ударов и высокой скорости движения струи такие разрушения в целом не нарушают отмеченные стадии и механизмы промывки.

Несколько иная картина массопереноса наблюдается при проникании низкоскоростной ($v_c = 3$ м/с) струи в отверстие малого диаметра ($d_0 = 2$ мм). Здесь квазистационарный режим проникания переходит в нестационарный режим значительно быстрее, вымываемое

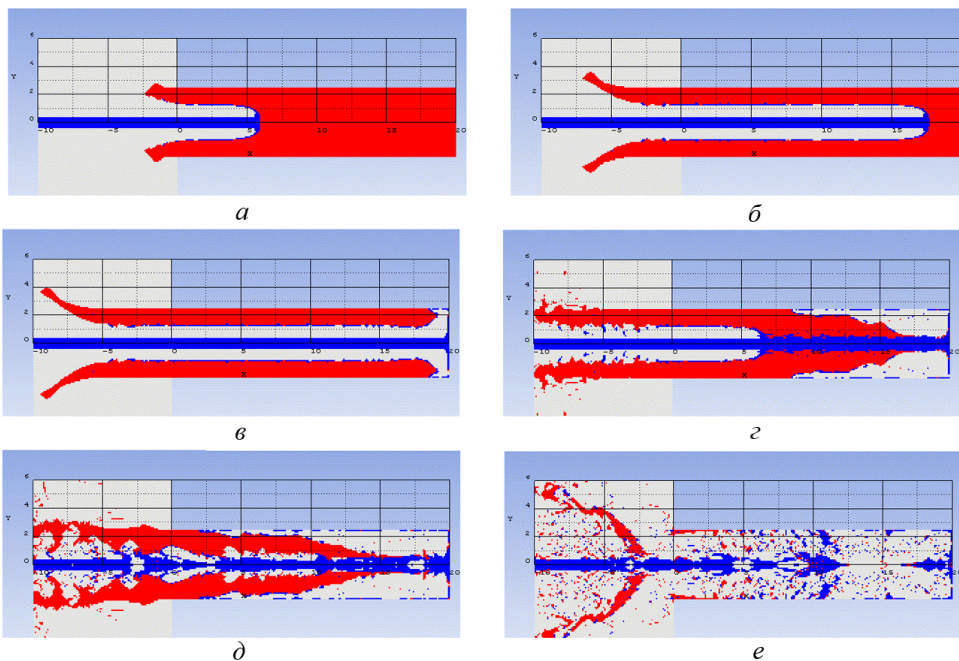


Рис. 1. Характерные стадии процесса промывки глухого отверстия диаметром $d_0 = 5$ мм при скорости струи $v_c = 7$ м/с и времени $t = 2$ мс (а); 6 мс (б); 8 мс (в); 12 мс (г); 15 мс (д); 26 мс (е)

в кольцевой зазор загрязнение защемляет струю, тормозит ее и вызывает повторные срабатывания струи на одних и тех же участках отверстия. Подобный механизм вымывания загрязнения с защемлением струи искажает поле скоростей в загрязнении, снижает уровень скорости движения загрязнения из отверстия, однако способствует интенсификации деструкции загрязнения. В момент достижения струей дна отверстия начинает работать указанный механизм выталкивания оставшегося загрязнения из отверстия. Однако в отличие от примера, представленного на рис. 1, этот механизм очистки выражен слабо. Реализации данного механизма промывки глухих отверстий также препятствует защемление проникающей струи. На завершающих стадиях промывки оба механизма очистки отверстий работают одновременно.

Следует также отметить, что защемление струи в некоторых случаях может сопровождаться ее объемным разрушением, полной деструкцией загрязнения и интенсивным перемешиванием материала струи и загрязнения.

Процесс проникания водяной струи в заполненное отверстие интересен не только перечисленными особенностями. Например, на квазистационарной стадии вымывания загрязнения в кольцевой зазор (до развития повреждений в проникающей струе) наблюдается зависимость скорости проникания струи в загрязнение ($\bar{v}_{пр} = v_{пр}/v_c$) от диаметра отверстия ($\bar{d}_0 = d_0/d_c$) (рис. 2, а). Явление непостоянства скоро-

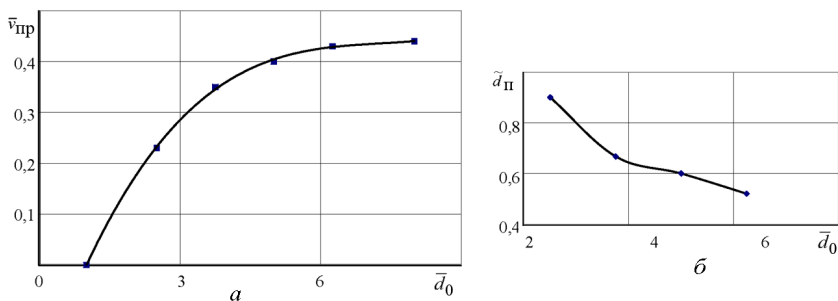


Рис. 2. Зависимость скорости проникания $\bar{v}_{пр}$ (а) и диаметра полости $\bar{d}_{п}$ (б) от диаметра отверстия \bar{d}_0 :

точки — результаты численного моделирования; линии — аппроксимирующая кривая

сти проникания не отмечено в классической теории взаимодействия струй идеальной жидкости, где рассматриваются струйные течения со свободными границами [3].

Обращает на себя внимание непротиворечивость экстраполяции зависимости $\bar{v}_{пр}(\bar{d}_0)$ в область малых значений \bar{d}_0 . Из рис. 2 следует, что при $\bar{d}_0 \approx 1$ скорость проникания $\bar{v}_{пр}$ близка к нулю. Это является следствием очевидного запрета прониканию струи в отверстие, диаметр которого не превышает диаметра струи.

Анализ результатов расчетов показал, что диаметр полости $d_{п}$ в загрязнении, формируемой на квазистационарной стадии проникания, зависит только от диаметра отверстия d_0 и не зависит от скорости струи v_c (рис. 2, б). Взаимосвязь между $d_{п}$ и d_0 носит немонотонный характер. В диапазоне $0 < \bar{d}_0 < 1$ струя не проникает в отверстие, поэтому $d_{п} = 0$. С началом проникания относительный размер $\bar{d}_{п} = d_{п}/d_0$ полости резко возрастает. Далее с увеличением относительного диаметра отверстия \bar{d}_0 форма полости меняется и при $\bar{d}_0 > 20$ проникающая в загрязнение струя создает полость, близкую по форме к полости, образующейся при проникании струи в полупространство.

Графические зависимости $\bar{v}_{пр} = \bar{v}_{пр}(\bar{d}_0)$ и $\bar{d}_{п} = \bar{d}_{п}(\bar{d}_0)$, представленные на рис. 2, можно использовать в качестве основы методики выбора рациональных режимов и условий промывки на квазистационарной стадии процесса.

Остановимся на этой методике подробнее. Введем понятие интенсивности промывки J_0 , определяя эту величину как отношение площади сечения $s_{п} = \pi d_{п}^2/4$ промытой полости в глухом отверстии к площади сечения $s_0 = \pi d_0^2/4$ самого отверстия: $J_0 = \bar{d}_{п}^2$. Очевидно, что качество промывки на квазистационарной стадии тем лучше, чем больше J_0 . В связи с этим, учитывая, что функция $J_0 = J_0(\bar{d}_0)$ (рис. 3) принимает наибольшее значение $J_{0\max}$ на границе области определения, т.е. при $\bar{d}_0 = \bar{d}_{0\min}$ (где $\bar{d}_{0\min}$ — минимальное значение

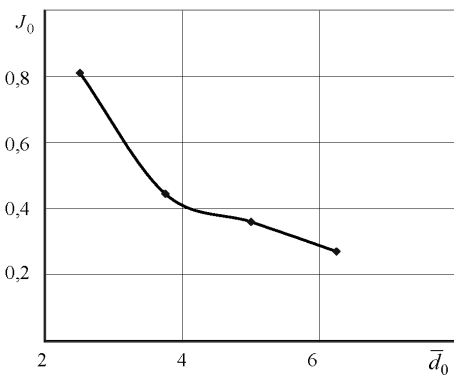


Рис. 3. Зависимость интенсивности J_0 промывки от диаметра \bar{d}_0 отверстия:

точки — результаты численного моделирования; линия — аппроксимирующая кривая

относительного диаметра отверстия, при котором реализуется квазистационарное проникание струи в загрязнение), можно предложить следующий порядок определения рациональных режимов промывки глухих отверстий на квазистационарной стадии процесса.

1. С помощью зависимости $J_0 = J_0(\bar{d}_0)$ (см. рис. 3) выбирается значение $\bar{d}_0 = \bar{d}_{0\min}$, соответствующее максимальному значению $J_{0\max}$ функции $J_0 = J_0(\bar{d}_0)$.

2. Для заданного диаметра d_0 промываемого отверстия определяется диаметр струи $d_c = d_0/\bar{d}_{0\min}$ и, следовательно, диаметр форсунок струеформирующих головок.

3. Исходя из технических возможностей установки СДП и иных ограничений назначается максимально возможная скорость струи $v_{c\max}$.

4. С помощью графической зависимости $\bar{v}_{\text{пр}} = \bar{v}_{\text{пр}}(\bar{d}_0)$ (см. рис. 2, а) вычисляется скорость $v_{\text{пр}}$ проникания струи в загрязнение.

5. Рассчитывается время $t_{\text{пр}} = l_0/v_{\text{пр}}$ достижения струей жидкости дна загрязненного отверстия.

6. Определяется минимально необходимое время $t_{0\min} = t_{\text{пр}} - l_0/v_c$ истечения струи из форсунки. За это время струя конечной длины достигнет дна глухого отверстия и полностью работается.

7. С учетом поправочного коэффициента $k_{\text{п}}$ определяется потребное время $t_0 = k_{\text{п}}t_{0\min}$ взаимодействия струи с загрязнением. Поправочный коэффициент формирует запас времени, необходимый для инициирования механизма выталкивания оставшегося загрязнения из отверстия. Обработка результатов численных расчетов показывает, что минимально необходимое значение поправочного коэффициента составляет $k_{\text{п}} = 1,2$.

8. По формуле $v_{\text{под}} = (d_c + d_0)/(2t_0)$ вычисляется скорость поперечной подачи, реализующей найденное время t_0 воздействия струи на загрязнение.

Одним из наиболее важных технологических показателей, характеризующих качество СДП, является динамика величины $\mu(t)$ относительного остаточного загрязнения в отверстии, определяемого следующим образом: $\mu(t) = \vartheta_{\text{ост}}(t)/\vartheta_0$, где $\vartheta_{\text{ост}}(t)$, ϑ_0 — объем соответственно остаточного загрязнения в произвольный момент времени t

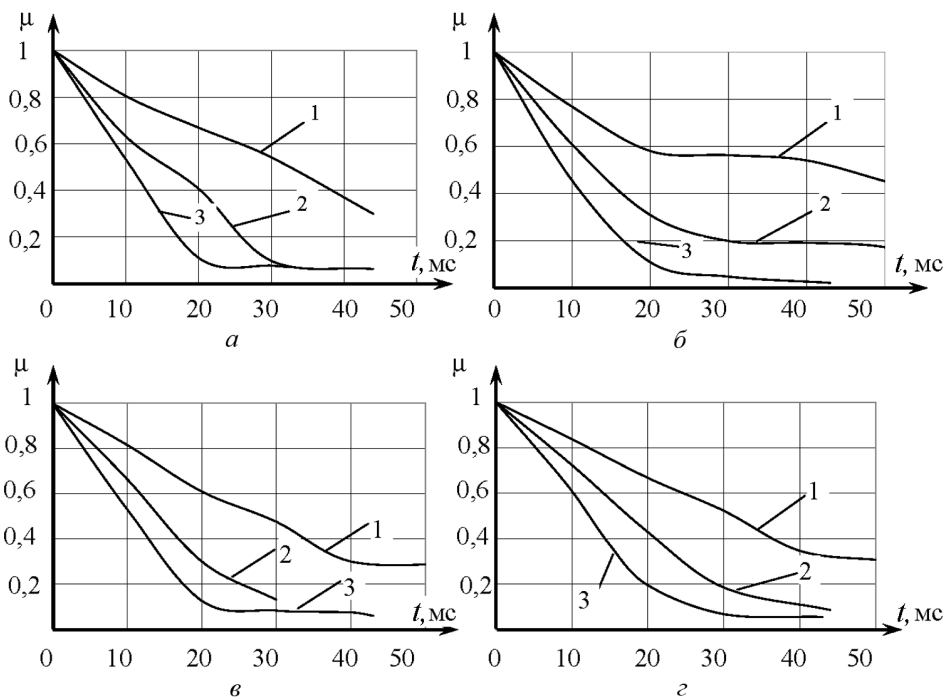


Рис. 4. Зависимость относительного остаточного загрязнения μ от времени t , при изменении диаметра d_0 и скорости струи v_c :
 $d_0 = 2,5$ (а); $3,75$ (б); 5 (в) и $6,25$ (г); $v_c = 3$ м/с (кривая 1); 5 м/с (2); 7 м/с (3)

и его начальное значение при $t = 0$ (рис. 4). На графических зависимостях $\mu(t)$ можно выделить квазистационарную стадию промывки (линейный характер функций $\mu(t)$) и последующую во времени нестационарную стадию (нелинейный участок графической зависимости $\mu(t)$). Здесь модуль скорости $|\mu'(t)|$ изменения величины $\mu(t)$ является функцией времени t , причем $|\mu'(t)|$ интенсивно падает с уменьшением остаточного загрязнения $\vartheta_{\text{ост}}(t)$. Эта особенность связана с тем, что на нестационарной стадии промывки в отверстии располагается значительный объем загрязнений в разрушенном состоянии, достаточно медленнодвигающийся в направлении из отверстия (см. рис. 1, е). Если положить, что разрушенное загрязнение в конечном итоге будет вынесено из отверстия остатками промывающей жидкости и принять за характеристику остаточного загрязнения в отверстии только не подвергшийся разрушению остаток, функция $\mu(t)$ на нестационарной стадии промывки будет более крутая и пересечет ось абсцисс.

Зависимости $\mu(t)$ учитывают все стадии промывки и также весьма полезны при назначении режимов и условий СДП. С их помощью также можно оценить требуемую скорость $v_{\text{под}}$ поперечной подачи струи. Если за один цикл промывки глухих отверстий необходимо обеспечить относительное остаточное загрязнение $\mu \leq \mu_{\text{пр}}$, где $\mu_{\text{пр}}$ — предельно допустимое значение величины μ , то с помощью графиков $\mu(t)$, пред-

ставленных на рис. 4, полагая $\mu = \mu_{пр}$, для заданного диаметра d_0 отверстия и выбранной скорости v_c истечения струи можно определить $t_{0\min}$ – потребное время взаимодействия струи с загрязнением. Далее по формуле $v_{под} = (d_c + d_0) / (2t_0)$ вычисляется скорость поперечной подачи, реализующая найденное время $t_{0\min}$.

Оценка скорости подачи с помощью зависимостей $\mu = \mu(t)$ предпочтительнее по сравнению с приведенной оценкой, основанной на взаимосвязи $J_0 = J_0(\bar{d}_0)$, поскольку не использует допущение об обязательной реализации квазистационарной стадии проникания до момента достижения струей дна отверстия.

Выводы. 1. На основе математического моделирования (с использованием численных методов механики сплошной среды) процесса проникания водяной струи в глухие отверстия, заполненные жидкостью, установлены два основных механизма струйно-динамической промывки: вытеснение и выталкивание загрязнений, реализующихся соответственно на квазистационарной и нестационарной стадиях промывки.

2. На основе установленных зависимостей скорости проникания струи в загрязнение и диаметра формируемой полости от диаметра отверстия разработана методика выбора рациональных режимов и условий промывки глухих отверстий на квазистационарной стадии процесса.

3. Получены графические зависимости изменения остаточного загрязнения глухих отверстий во времени. Показана возможность применения данных зависимостей для оценки скорости поперечной подачи струеформирующих головок относительно промываемых деталей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Т а р а с о в В. А., А л е к с е е в А. Н., К о р о л е в А. Н., Ф и л и м о н о в А. С. Технологические факторы гидроструйной очистки поверхностей деталей в операционном модуле гальванического производства // Полет. – 2009. – № 12.
2. Ш т а м п о в к а взрывом. Основы теории / Под ред. М.А. Анучина. – М.: Машиностроение, 1972. – 152 с.
3. Г у р е в и ч М. И. Теория струй идеальной жидкости. – М.: Наука, 1979. – 536 с.

Статья поступила в редакцию 28.06.2011

Владимир Алексеевич Тарасов родился в 1946 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1969 г. Д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой “Технологии ракетно-космического машиностроения” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 200 научных работ в области технологии машиностроения, контроля и диагностики.

V.A. Tarasov (b. 1946) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1969. D. Sc. (Eng.), professor, head of “Technologies of Rocket and Space Engineering” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 200 publications in the field of technology of mechanical engineering, check and diagnostics.



Владимир Иванович Колпаков родился в 1954 г., окончил в 1978 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Технологии ракетно-космического машиностроения” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 150 научных работ в области физики взрыва и высокоскоростного удара.

V.I. Kolpakov (b. 1954) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1978. Ph. D. (Eng.), assoc. professor of “Technologies of Rocket and Space Engineering” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 150 publications in the field of physics of explosion and high-speed impact.



Александр Николаевич Королев родился в 1978 г., окончил в 2002 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Ассистент кафедры “Технологии ракетно-космического машиностроения” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор семи научных работ в областях неразрушающего контроля и гальванического производства.

A.N. Korolev (b. 1978) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2002. Assistant lecturer of “Technologies of Rocket and Space Engineering” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 7 publications in the field of nondestructive inspection and galvanic production.



Владимир Дмитриевич Баскаков родился в 1954 г., окончил в 1977 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Технологии ракетно-космического машиностроения” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 70 научных работ в области разработки технологических средств обеспечения эксплуатационных характеристик машин и технологии машиностроения.

V.D. Baskakov (b. 1954) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1977. Ph. D. (Eng.), assoc. professor of “Technologies of Rocket and Space Engineering” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 70 publications in the field of development of technological means for providing the operation characteristics of machines.

