2. *Иванов, П.С.* Новые ресурсосберегающие технологии в рельсовом хозяйстве / [П.С. Иванов и др.] // Путь и путевое хозяйство. – 2011. – № 7. – С. 23 – 25.

3. *Липунов, Ю.И.* Исследование процессов охлаждения при термоупрочнении арматуры / [Ю.И. Липунов и др.] // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 2007. – № 2. – С. 54 – 57.

4. *Липунов, Ю.И.* Освоение устройств контролируемого охлаждения листа в потоке стана 5000 ОАО «Северсталь» / [Ю.И. Липунов и др.] // Сталь. – 2005. – № 3. – С. 55 – 61.

5. Патент RU 2291206 C1 2005г.

6. *Цзи-Хун, Яо* Охлаждение и выбор сред при закалке стали / Яо Цзи-Хун // Индукционный нагрев. – 2011. – № 18.

7. *Эйсмондт, К.Ю.* Разработка и внедрение в производство устройств термоупрочнения проката регулируемым охлаждением на основе анализа процессов теплообмена: автореф. дис. … канд. техн. наук / К.Ю. Эйсмондт. – Екатеринбург, 2011.

8. *Эйсмондт, Ю.Г.* Исследование возможности закалки рельсовых накладок в полимерной среде / Ю.Г. Эйсмондт, М.А. Гервасьев, Т.А. Трунина // Сталь. – 2000. – № 9. – С. 71 – 73.

УДК 621.7.024

В.А. Стенин

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ТЕХНОЛОГИИ ПРОМЫВКИ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В работе представлено теоретическое обоснование активных способов интенсификации промывки гидравлических судовых систем (турбулизации и аэрирования) и даны рекомендации по их реализации.

Турбулизация, аэрирование, способы интенсификации, промывка системы, частицы загрязнений.

The work presents the theoretical basis of active ways of intensification of flushing hydraulic marine systems (turbulence and aeration) and recommendations on their implementation.

Turbulence, aeration, ways of intensification, rinsing system, particles of dirt.

Рост требований к эксплуатационной надежности и долговечности судовых систем и их оборудования ведет к ужесточению требований к чистоте внутренних полостей систем (ВПС) и рабочих жидкостей. Наличие в рабочих средах даже небольшого количества посторонних примесей способствует преждевременному износу механизмов и арматуры. В системах гидравлики, используемых на современных судах, присутствие механических частиц загрязнений размером свыше 16 мкм опасно [5], [6], [7]. Как правило, при гидродинамических очистках 95 % вымываемых частиц имеют размеры более 0,1 мм. Наиболее трудно удалять абразивную и металлическую пыль и частицы с положительной плавучестью типа древесины и ткани.

Поскольку все судовые трубопроводные системы отличаются сложной разветвленной конфигурацией, значительной протяженностью и насыщенностью различными агрегатами и арматурой, промывка гидросистем является очень ответственной и трудоемкой операцией, составляющей до 15 – 25 % от общей трудоемкости работ при сборке системы. Рекомендованная отраслевым стандартом промывка стационарным потоком рабочей жидкости либо не обеспечивает достижения необходимого уровня чистоты ВПС, либо существенно увеличивает продолжительность технологического процесса промывки.

Операция промывки трубопроводов осуществляется при помощи технологических стендов, создающих в системе циркуляцию воды со скоростью движения, обеспечивающей вымывание из внутренней полости труб загрязняющих частиц и улавливание их в фильтрах стенда. Работа А, Дж, затрачиваемая на перекачку моющей жидкости, равна [4]:

$$A = \rho_{ж} \cdot g \cdot Q \cdot H \cdot t / \eta , \qquad (1)$$

где Q – подача промывочного насоса, $м^3/с$; H – напор, м; $\rho_{ж}$ – плотность моющей жидкости, $кг/м^3$; g – ускорение свободного падения, $м/с^2$; η – КПД промывочного насоса; t – продолжительность промывки, с.

Величину подачи центробежного насоса представим в виде:

$$Q = \varphi \cdot w , \qquad (2)$$

где φ – площадь живого сечения потока, $м^2$; w – скорость потока моющей жидкости, $м/с$.

В соответствии с уравнениями (1) и (2), повысить энергоэффективность промывки можно путем снижения продолжительности промывки t и подачи Q (скорости потока w). С другой стороны, как показывают исследования, достигаемый класс чистоты системы после промывки зависит напрямую от времени и скорости промывки [6], [7]. Исследованиями, показанными в [5], рекомендована скорость в 8 – 15 м/с, обеспечивающая отрыв частиц от внутренней поверхности стенок трубопроводов. Однако допус-

тимая скорость промывки собранных на судне судовых систем находится в пределах от 3 до 4 м/с [6], [7]. Продолжительность промывки при соответствующей интенсификации (к примеру, смена направления потока) по данным [6] в среднем находится в пределах 44…54 ч.

Рассмотрим энергетические особенности известных активных способов интенсификации процесса промывки, заключающихся в следующем: оптимизация скоростного режима, вибрационное воздействие на изделие или промывочную среду, барботаж (аэрирование) промывочной среды, пульсация давления и расхода промывочной среды.

Большинство исследований рассматривают процесс уноса частиц в ядро потока при промывке как результат действия подъемной силы, образующейся вследствие пульсационной составляющей скорости, действующей в поперечном направлении [6], [7]. Однако при этом следует иметь в виду, что частицы пересекают гидродинамический пограничный слой, в котором движение технологических загрязнений существенно отличается от перемещения их во внешнем потоке.

Рассмотрим условия витания частиц загрязнений в гидродинамическом пограничном слое. По толщине пограничного слоя вследствие действия сил вязкости скорость промывочной жидкости изменяется от нуля на поверхности стенки до скорости невозмущенного потока [1]. Представим частицу загрязнений в виде элементарного объема с размерами dx, dy, dz, помещенную в пограничный слой промывочной жидкости (рис. 1). Допустим, что скорость в потоке изменяется только по оси y.

Силы, действующие на рассматриваемый элементарный объем, можно разделить на массовые (или объемные) и поверхностные. Сила тяжести $dF_{\text{Т}}$ приложена в центре тяжести элемента. Ее проекция на ось Oy равна произведению проекции ускорения свободного падения g_y на массу элемента:

$$dF_{\text{Т}} = \rho \cdot g_y \cdot dv, \qquad (3)$$

где ρ – плотность частицы, кг/м^3; dv – элементарный объем, м^3.

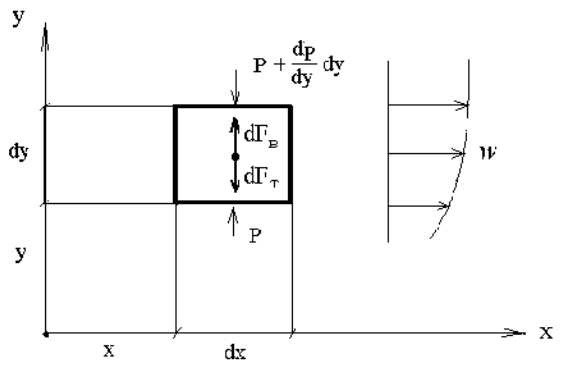


Рис. 1. К определению сил, действующих на частицу, помещенную в пограничный слой

Выталкивающая (архимедова) сила $dF_{\text{В}}$ равна произведению проекции ускорения свободного падения g_y на массу жидкости, вытесненной элементарным объемом [3]:

$$dF_{\text{В}} = -\rho_{\text{ж}} \cdot g_{\text{y}} \cdot dv. \qquad (4)$$

Равнодействующая сил давления равна [4]:

$$dF_P = -\frac{dp}{dy} \cdot dv. \qquad (5)$$

В зависимости (5) величина градиента полного давления dp/dy складывается из двух составляющих, одинаковых по знаку: градиента dp_c/dy гидростатического давления; градиента dp_w/dy гидродинамического (скоростного) давления.

$$\frac{dp}{dy} = \frac{dp_c}{dy} + \frac{dp_w}{dy}. \qquad (6)$$

Аналитически их величины определяются из дифференциальных уравнений Эйлера [3]:

$$\frac{dp_c}{dy} = \rho_{\text{ж}} \cdot g_y, \qquad (7)$$

$$\frac{dp_w}{dy} = -\rho_{\text{ж}} \cdot w \cdot \frac{dw}{dy}, \qquad (8)$$

где $\rho_{\text{ж}}$ – плотность моющей жидкости, кг/м^3; w – скорость потока моющей жидкости, м/с; dp/dy – градиент давления, Па/м.

Объединяя уравнения (3) – (8), получим условие витания частицы в пограничном слое моющей жидкости:

$$\frac{dp}{dy} = \rho \cdot g_y - \rho_{\text{ж}} \cdot g_y. \qquad (9)$$

Таким образом, в соответствии с уравнением (9), частица загрязнения уносится в ядро потока, если градиент полного давления dp/dy будет больше, чем градиент условного давления dp_y/dy, где $dp_y/dy = (\rho \cdot g_y - \rho_{\text{ж}} \cdot g_y)$. При обратном соотношении частица загрязнения опускается на стенку трубопровода.

При математическом моделировании в CosmosFloWorks процесса течения моющей жидкости в горизонтальном трубопроводе было установлено, что dp/dy в пограничном слое существенно больше dp_y/dy. К примеру, при средней скорости потока 2 м/с в трубе (условный проход Ду100) на расстоянии от стенки 0,7 до 6,2 мм максимум градиента полного давления превышает градиент условно-

го давления в шесть раз. Следовательно, частицы загрязнений, имеющие радиус больший 0,0007 м (0,7 мм), будут подхватываться потоком со стенки и выноситься в ядро потока, что хорошо согласуется с результатами промывки трубопроводов в условиях действующего производства.

Вымыванию частиц загрязнений, находящихся в застойных зонах, способствует активное аэрирование. Стабилизированный равновесный пузырьковый режим течения встречается весьма редко. Газовые пузырьки, присутствующие в жидкостях, обычно стремятся слиться друг с другом, в результате чего пузырьковая структура теряет свою однородность. На практике пузырьковый режим течения нарушается по одной из двух причин: из-за слияния пузырей при их образовании или в процессе их движения по каналу; вследствие специфических особенностей процессов вдува и генерации газовой фазы [9]. Ввиду практической необходимости сохранения устойчивого пузырькового режима моющей жидкости, представляет интерес обоснование условий его поддержания.

Работа L, Дж, затрачиваемая на образование пузырька в объеме жидкости, определяется зависимостью [1]:

$$L = -p_n \cdot V_n + \sigma \cdot S_n = 4 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \sigma - \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R^3 \cdot p_n , \quad (10)$$

где V_n – объем пузырька, м^3; S_n – поверхность пузырька, м^2; p_n – давление внутри пузырька газа, Па; σ – поверхностное натяжение жидкости, Н/м; R – радиус пузырька, м.

Объем и поверхность пузырька равны соответственно: $V_n = 4 \cdot \pi \cdot R^3 / 3$; $S_n = 4 \cdot \pi \cdot R^2$.

При слиянии двух пузырьков работа их образования L_1 определится следующим образом:

$$L_1 = 4 \cdot \sqrt[3]{4} \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \sigma - \frac{8}{3} \cdot \pi \cdot R^3 \cdot p_n . \quad (11)$$

Сопоставив уравнения (10) и (11), найдем избыточную работу образования двух пузырьков в сравнении с их объединением:

$$\Delta L = 2 \cdot L - L_1 = (8 - 4 \cdot \sqrt[3]{4}) \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \sigma = 1,65 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \sigma . \quad (12)$$

Так как работа $2 \cdot L > L_1$, то агломерация пузырьков энергетически выгодна.

В соответствии с уравнением (12) для сохранения пузырьковой структуры потока следует компенсировать избыточную работу внешним воздействием:

$$\frac{8 \cdot \pi \cdot R^3 \cdot p_к}{3} = 1,65 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \sigma . \quad (13)$$

Из уравнения (13) найдем величину компенсирующего давления $p_к$: $p_к = \frac{0,62 \cdot \sigma}{R}$.

Мощность источника, компенсирующего избыточную работу образования пузырька радиуса R (объема V_n), равна:

$$N_V = \frac{\Delta L \cdot f}{2} , \quad (14)$$

где f – частота собственных колебаний пузырька радиусом R, Гц.

Для определения частоты собственных колебаний пузырька воспользуемся уравнением незатухающих гармонических колебаний. При любых колебаниях отклонение R системы (пузырька газа) вызывает появление восстанавливающей силы F_{BC} [2]:

$$F_{BC} = -D \cdot R = \frac{m \cdot d^2 R}{dt^2} , \quad (15)$$

где R – отклонение, м; D – жесткость системы, Н/м; m – масса системы, кг.

Преобразуем уравнение (15) к виду:

$$\frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{D}{m} \cdot R = \ddot{R} + \frac{D}{m} \cdot R = \ddot{R} + \omega^2 \cdot R = 0 , \quad (16)$$

где $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ – угловая частота, 1/с.

В первом приближении в качестве массы m можно принять массу воды, вытесненную пузырьком:

$$m = \frac{4 \cdot \pi \cdot R^3 \cdot \rho_ж}{3} . \quad (17)$$

Если принять в качестве восстанавливающей силы F_{BC} силу давления на поверхность пузырька, то

$$F_{BC} = p_n \cdot S_n . \quad (18)$$

Объединяя уравнения (15) – (18), получим зависимость для определения собственной f частоты колебаний пузырька:

$$f = \frac{\omega}{2 \cdot \pi} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{p_n \cdot S_n}{R \cdot m}} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{6 \cdot \sigma}{\rho_ж \cdot R^3}} . \quad (19)$$

Полученная зависимость (19) удовлетворительно согласуется с результатами экспериментальных исследований [8].

Мощность источника, воздействующего на определенный объем двухфазной смеси, с учетом зависимости (14) равна:

$$N = N_V \cdot n = \frac{N_V \cdot V_Г}{V} = \frac{N_V \cdot \alpha \cdot V_{см}}{V} = \frac{\Delta L \cdot f \cdot \alpha \cdot V_{см}}{2 \cdot V} ,$$

где n – число пузырьков газа определенного радиуса в смеси; $V_{Г}$ – объем газа в смеси, $м^3$; α – объемное газосодержание; $V_{см}$ – объем двухфазной смеси, $м^3$.

Таким образом, энергетический анализ технологии промывки гидравлических систем показал, что движущимся стационарным потоком моющей жидкости вымываются крупные частицы загрязнений. Для удаления более мелких частиц необходима структурная реорганизация потока путем искусственной его турбулизации, что позволит оторвать частицу от стенки и переместить ее в пограничный слой, где равнодействующая сил давления обеспечит витание частицы в моющей жидкости горизонтального трубопровода. В застойных зонах трубопровода витание частицы обеспечивается пузырьковым режимом течения, поддержание которого возможно путем использования внешнего источника мощности, воздействующего на определенный объем двухфазной смеси.

Литература

1. *Исаченко, В.П.* Теплопередача / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – М., 1981.

2. *Кухлинг Х.* Справочник по физике / Х. Кухлинг. – М., 1982.

3. *Ландау, А.Д.* Гидродинамика / А.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М., 1986.

4. *Савин, И.Ф.* Основы гидравлики и гидропривод / И.Ф. Савин, П.В. Сафонов. – М., 1978.

5. *Сапожников, В.М.* Монтаж и испытание гидравлических и пневматических систем летательных аппаратов / В.М. Сапожников. – М., 1979.

6. *Соловьев, Б.В.* Очистка судовых систем от технологических загрязнений / Б.В. Соловьев. – Л., 1977.

7. *Соловьев, Б.В.* Предпусковые очистки и промывки оборудования ЯЭУ / Б.В. Соловьев, Е.А. Константинов. – М., 1984.

8. *Стретт, Дж.В.* Теория звука. Т. 2 / Дж. В. Стретт. – М., 1955.

9. *Уоллис, Г.* Одномерные двухфазные течения / Г. Уоллис. – М., 1972.