

А.Р. Ризун, Л.З. Богуславский, Ю.В. Голень, Т.Д. Денисюк

Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев

РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОЙ ОЧИСТКИ МОРСКИХ СТАЦИОНАРНЫХ ПЛАТФОРМ ОТ БИОЛОГИЧЕСКОГО ОБРАСТАНИЯ



Обосновано использование импульсного коронного разряда в морской воде для разрушения биообрастания стационарных платформ. Предложены наиболее эффективные схемы и параметры электроразрядного способа очистки, создано оборудование для его реализации. Внедрение электроразрядной технологии позволит существенно уменьшить затраты средств на ремонтные работы морских стационарных платформ и в 2–3 раза сократить затраты энергии и сроки выполнения ремонтных и профилактических работ.

К л ю ч е в ы е с л о в а: импульсный коронный разряд, морская стационарная платформа, биологическое обрастание, волна сжатия, очистка металлоконструкций.

АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ

Повышение добычи углеводного сырья на шельфе Черного моря является одним из приоритетных направлений деятельности нефтегазового комплекса Украины. При этом очень важно обеспечить безопасные условия функционирования морских стационарных платформ (МСП), с помощью которых ведутся нефтегазодобывающие работы на морском шельфе. Интенсивное биологическое обрастание МСП существенно влияет на их стойкость и безопасность, поэтому для эффективного проведения работ требуется периодическая (от трех до четырех раз в год) очистка металлических конструкций от такого обрастания. Существующие традиционные методы очистки не удовлетворяют всем требованиям и потребностям эксплуатации и использования МСП. Наиболее распространенный в использовании механический способ недостаточно продуктивный, имеет высокую стоимость и трудоем-

кость. Например, импортное оборудование типа "Brash-kart" или "Cavi-jet" стоимостью до 100–150 тыс. дол. США требует значительных затрат на проведение водолазных работ. Поэтому разработка и внедрение новых эффективных и безопасных технологий очистки металлических конструкций МСП от биологического обрастания является актуальной задачей.

В качестве альтернативы механическому способу предложен электроразрядный как эффективный и безопасный метод очистки. Исследованиями установлено, что этот метод может обеспечить очистку металлических поверхностей с производительностью до 200 м²/ч при незначительных энергетических затратах [1]. Однако для выполнения работ в среде с повышенной проводимостью (в морской воде) необходимо либо подвод в зону разряда значительного количества пресной воды, либо стабилизация разряда взрывающейся проволокой, диэлектрической нитью, магнитным полем. Это усложняет конструкцию тех-

нологических и электротехнических устройств и значительно повышает массогабаритные показатели оборудования, что неприемлемо для условий работы на МСП. Способ очистки металлоконструкций МСП от биологического обрастания импульсным коронным разрядом (ИКР) позволяет производить обработку в среде с повышенной проводимостью, значительно упрощает конструкцию технологической и электротехнической частей оборудования и снижает их массогабаритные показатели. Способ имеет достаточно высокую перспективу и широко внедряется не только на отечественном рынке, но и на зарубежных. Внедрение электроразрядной технологии очистки морских стационарных платформ от биологического обрастания на основе ИКР существенно уменьшает затраты по обеспечению условий безопасного функционирования объектов нефтегазового комплекса на морском шельфе и увеличивает сроки их эксплуатации.

Масштабность проблемы подтверждается прогнозными объемами работ. В частности, только на газовых месторождениях шельфа Крымского полуострова в ближайшие годы необходимо обработать до 45–60 тыс. м² металлических конструкций на 10 МСП.

Целью настоящего проекта, разработанного в Институте импульсных процессов и технологий НАН Украины, является разработка и внедрение технологического процесса электроразрядной очистки металлоконструкций морских стационарных платформ от биологического обрастания.

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Использование коронного разряда основано на реализации при определенных условиях достаточно высокой интенсивности гидродинамических возмущений, генерируемых им. Такая особенность присуща ИКР в сильных водных электролитах, для которых характерно наличие короны в виде сплошного плазменного образования (СПО), формой ко-

торого можно управлять, а соответственно и формировать в жидкости поля давлений заданной конфигурации [2]. Плазменное образование повторяет форму острия электрода, которое, как правило, выполнено в виде полусферы. Пространственная модель ИКР разделяется на следующие области: СПО, переходный слой *плазма–жидкость* и слой электролита, представляется полусферическими слоями, ограниченными поверхностью острия, изолятором и заземленным электродом. В этом случае максимальный пространственный размер системы r будет ограничен длиной разрядного промежутка l ($r \leq l$). Использование параллельных электродов, включенных в один разрядный контур, позволяет существенно расширить технологические возможности использования ИКР со СПО. Согласно исследованиям [3] для проводимостей $\sigma_0 \leq 0,1$ См/м возможно зажигание СПО на n электродах одновременно с практически идентичными параметрами. В этом случае появляется еще одно условие, связанное с одновременным зажиганием разряда на n электродах. Время развития перегретой неустойчивости, необходимое для зажигания разряда, t_n , должно удовлетворять условия [4]

$$t_n \ll R_{np} C, \quad (1)$$

где R_{np} — начальное сопротивление промежутка; C — емкость накопителя.

Начальное сопротивление промежутка в этом случае будет определяться соотношением

$$R_{np} = \frac{R_{эл}}{n} = \frac{1}{2\pi\sigma_0 n r_{эл}}, \quad (2)$$

где $R_{эл}$ — сопротивление электрода; n — количество электродов; σ_0 — проводимость воды; $r_{эл}$ — радиус закругления стержня электрода.

Развитие перегретой неустойчивости t_n определяется равенством

$$t_n = \frac{\rho_v c_p}{\alpha} \frac{1}{\sigma_0 E_0^2} = \frac{\rho_v c_p}{\alpha} \frac{r_{эл}^2}{\sigma_0 U_0^2}, \quad (3)$$

где ρ_v — плотность жидкости, c_p — теплоемкость, α — температурный коэффициент электроп-

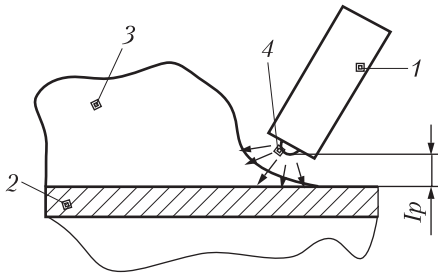


Схема обработки: 1 – электрод; 2 – металлоконструкция МСП; 3 – массив биообрастания; 4 – СПО

роводности жидкости; E_0 – напряженность на поверхности электрода; U_0 – зарядное напряжение.

Таким образом, получим

$$\frac{\rho_e c_p}{\alpha} \frac{r_{эл}^2}{\sigma_0 U_0^2} \ll \frac{1}{2\pi\sigma_0 n r_{эл}}$$

Отсюда максимальное количество параллельных электродов не должно превышать

$$n \leq \frac{\alpha}{\rho_e c_p} \frac{U_0^2 C}{r_{эл}^3}. \quad (4)$$

Максимум мощности диссипации энергии, которая будет выделяться в каждом из n зажегшихся СПО N_{nam} , определится равенством

$$N_{nam} = \frac{N_{am}}{n}, \quad (5)$$

где N_{am} – максимальная мощность разряда.

При линейризации нелинейного сопротивления разрядного промежутка по начальному сопротивлению согласно математической модели ИКР со СПО [5] максимальную мощность можно оценить из выражения

$$N_{am} = \frac{A_s (\gamma - 1) U_0^2 C}{2\pi k L P_{am} a_m} \left(\frac{a_m}{r_{эл}} - 1 \right). \quad (6)$$

Здесь $A_s = 105 (B^2 \cdot c) / m^2$ – искровая постоянная; $\gamma = 1,26$ – показатель адиабаты; L – индуктивность разрядного контура; P_{am} – максимум давления на границе *плазма–жидкость*; a_m – радиус СПО к моменту достижения N_{am} ;

k – коэффициент, определяемый режимом разряда, $k = c^{-2}$ – для критического разряда; $k = (\delta + \sqrt{\delta^2 - 1})^{\frac{-2\delta}{\sqrt{\delta^2 - 1}}}$ где $\delta = \frac{1}{4\pi\sigma_0 r_{эл}} \sqrt{\frac{C}{L}}$ – для аperiодического разряда.

Аналитические зависимости для P_{am} и a_m , полученных из моделей [5] аппроксимации экспериментальных данных зависимости N_{am} от σ_0 [2], представлены в виде

$$P_{am} = \left(\frac{0,021 (\gamma - 1)^2 A_s U_0^2 k \rho_0^2 v_{am} \sigma_0}{(\gamma + \frac{1}{3}) L^2 r_{эл} (1 + \frac{v_{am}}{c_0})^2} \right)^{1/4}, \quad (7)$$

где v_{am} – скорость движения границ (СПО), для большинства режимов разряда к моменту достижения N_{am} соответствует 10^3 м/с [6]; c_0 – скорость звука в воде; σ_0 – плотность воды. Соответственно максимальный радиус каждого из СПО будет определяться как

$$a_{nm} = \left(\frac{5,3 \cdot 10^{-4} (\gamma - 1)^2 A_s U_0^2 C^2 k \cdot \sigma_0 \left(1 + \frac{v_{am}}{c_0}\right)^2}{(\gamma + \frac{1}{3}) r_{эл} \rho_0^2 v_{am}^3} \right)^{1/4}. \quad (8)$$

Давление на фронте ударной волны от каждого из СПО определится как [7]

$$P_m = \frac{P_{am}}{r}. \quad (9)$$

Отсюда при подстановке (7) и (8) получим

$$P_{nm} = \frac{(\gamma - 1)}{2\pi r} \left(\frac{0,252 A_s W_0 k \sigma_0}{(\gamma + \frac{1}{3}) r_{эл} v_{am} L n} \right)^{1/2}, \quad (10)$$

где $W_0 = \frac{C U_0^2}{2}$ – энергия, запасаемая емкостью накопителя генератора.

Так, например, для разрядного контура с параметрами $r_{эл} = 1,75$ мм, $U_0 = 50$ кВ, $C = 2$ мкФ и для полусферы радиусом $r = 90$ мм давление на фронте волны сжатия достигает величины $P(r) \geq 3$ МПа, что обеспечивает разрушение биообрастания.

Для очистки МСП от биологического обрастания выбрана схема обработки, при которой расстояние между острием электрода и

металлоконструкцией МПС l_p не превышает 0,09 м (рисунок).

Зона разрушения биообрастания представляет собой полусферу радиусом r . На плоской поверхности отложений зона разрушения будет представлять круг площадью $s = \pi r^2$. Для перекрытия зон обработки электрод от импульса к импульсу следует перемещать на расстояние $l = 1,5 r$.

Для отложений прочностью на растяжение до 3 МПа на плоской поверхности зона разрушения от одного разряда представляет круг площадью $s = 25,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$.

При перемещении электрода вдоль обрабатываемой поверхности со скоростью $v = 0,135 \text{ м/с}$ с учетом зон перекрытия часовая производительность процесса

$$Q = 63 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Таким образом, для достижения планируемой производительности не менее $200 \text{ м}^3/\text{ч}$ необходимо вести обработку тремя и более электродами.

ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНАЯ УСТАНОВКА

Для реализации технологического процесса и технологических требований разработана и изготовлена электрогидроимпульсная установка (ЭГУ) "Корона-1", предназначенная для электроразрядной очистки опорных конструкций морских стационарных платформ от биологического обрастания.

Установка представляет собой мобильное устройство, которое можно транспортировать от одного объекта к другому и размещать как на плавсредствах, так и на МСП, а также портовых гидротехнических сооружениях (причалах, молах, волнорезах и т.п.). Потребляемая мощность до 5 кВт позволяет работать от судовой энергетической установки, системы энергообеспечения МСП или от автономного источника питания.

Промышленные испытания оборудования проводились на газодобывающей МСП на

шельфе Крымского полуострова (месторождение "Штормовое") в сентябре 2007 г. при выполнении электроразрядной очистки опорных металлоконструкций от биологического обрастания.

ВЫВОДЫ

Впервые был применен новый технологический процесс — электроразрядная очистка опорных металлоконструкций от биологического обрастания как альтернатива механическим способам очистки.

Разработанное и изготовленное оборудование для реализации электроразрядной технологии травмобезопасное для обслуживающего персонала, мобильное, не громоздкое и очень простое в эксплуатации. Установка позволяет выдерживать нормы действующих стандартов экологического контроля.

При эксплуатации оборудования с несколькими электродными системами можно достичь производительности до $200 \text{ м}^2/\text{час}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Электроразрядная* очистка поверхностей технологического оборудования от нежелательных неметаллических отложений / Т.Д. Денисюк, А.Р. Ризун, Ю.В. Голень // *Электронная обработка материалов*, 2007. — № 6. — С. 50 — 52.
2. *Динамика* импульсного коронного разряда в водных электролитах / Л.З. Богуславский, В.В. Кучеренко, Е.В. Кривицкий // Николаев, 1993. — 41 с. (Препринт ИИПТ НАНУ, № 22).
3. *Исследование* зажигания многофакторного коронного разряда в слабопроводящих электролитах / Л.З. Богуславский, Е.В. Бристецкий, Е.В. Кривицкий // *Теория, эксперимент, практика электроразрядных технологий*. — 2002. — Вып. 4. — С. 7—15.
4. *Динамика* электровзрыва в жидкости / Е.В. Кривицкий. — Киев: Наук. думка, 1986. — 208 с.
5. *Математическое* моделирование коронного разряда в сильных водных электролитах / В.В. Шамко, Л.З. Богуславский // *Теория, эксперимент, практика электроразрядных технологий*. — 2002. — Вып. 4. — С. 34—44.
6. *Определение* скорости прорастания импульсной короны в сильных электролитах / С.А. Хайнацкий, В.В. Шамко, Л.З. Богуславский // *Электронная обработка материалов*. — 2005. — № 5. — С. 42—47.

7. *Теоретические основы инженерных расчетов энергетических и гидродинамических параметров подводного искрового разряда* / В.В. Шамко, В.В. Кучеренко // Николаев, 1991. — 51 с. (Препринт ИИПТ НАН Украины, № 18).

*А.Р. Різун, Л.З. Богуславський,
Ю.В. Голень, Т.Д. Денисюк*

РОЗРОБКА І ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ЕЛЕКТРОРОЗРЯДНОГО ОЧИЩЕННЯ ПЛАТФОРМ ВІД БІОЛОГІЧНОГО ОБРОСТАННЯ

Обґрунтовано використання імпульсного коронного розряду в морській воді для руйнування біообростання стаціонарних платформ. Запропоновані найбільш ефективні схеми і параметри електророзрядного способу очищення, створено устаткування для його реалізації. Впровадження електророзрядної технології дасть можливість істотно зменшити витрати засобів на ремонтні роботи морських стаціонарних платформ та в 2–3 рази скоротити витрати енергії і терміни виконання ремонтних і профілактичних робіт.

Ключові слова: імпульсний коронний розряд, морська стаціонарна платформа, біологічне обростання, хвиля стиску, очищення металоконструкцій.

A.R. Rizun, L.Z. Boguslavskii, U.V. Holen, T.D. Denisuk

DEVELOPMENT AND INTRODUCTION OF TECHNOLOGICAL PROCESS OF ELECTRICAL DISCHARGE CLEANING OF MARINE STATIONARY PLATFORMS FROM BIOLOGICAL OVERGROWING

The use of pulse corona discharge in sea-water for destruction of biological overgrowing is proved. The most effective circuits and parameters of electrical discharge treatment are revealed, the equipment for its realization is introduced. Introduction of electrical discharge technology will allow substantial cutting down of marine stationary platforms repair work expenses, reducing in 2–3 times energy expenditures and terms of repair and prophylactic works.

Keywords: pulse corona discharge, marine stationary platform, biological overgrowing, compression wave, metal-work cleaning.

Надійшла до редакції 07.04.08.