

Подводная сварка элементов АЭС из высоколегированных коррозионноустойчивых сталей

Ремонт элементов конструкций АЭС сопряжен с риском радиоактивного облучения персонала. Использование воды в качестве физического барьера против радиации позволяет увеличить допустимое время выполнения работ, что делает перспективным разработку материалов для мокрой подводной сварки нержавеющей сталей. Основываясь на многолетнем опыте применения механизированной сварки в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, разработана самозащитная порошковая проволока для сварки коррозионноустойчивых сталей, с помощью которой можно выполнять сварку стыковых, угловых и нахлесточных соединений в нижнем положении и на вертикальной плоскости сталей типа 18–10 (AISI 304L, 308L, 347 и 321). Механические свойства металла шва соответствуют требованиям, предъявляемым к швам, выполненным на воздухе. Применение механизированной сварки самозащитной порошковой проволокой открывает перспективу автоматизации процесса сварки и исключения участия человека в работах при особо опасных условиях.

Ключевые слова: мокрая подводная сварка; сталь 08X18H10T; самозащитная порошковая проволока; газошлаковая система; легирующие элементы; АЭС.

М. Ю. Каховський, С. Ю. Максимов, Г. В. Фадєєва

Підводне зварювання елементів АЕС з високолегованих корозійностійких сталей

Ремонт елементів конструкцій АЕС пов'язаний з ризиком радіоактивного опромінення персоналу. Використання води як фізичного бар'єру проти радіації дає змогу збільшити допустимий час виконання робіт, що свідчить про перспективність розробки матеріалів для мокрої підводної зварювання нержавіючих сталей. Ґрунтуючись на багаторічному досвіді застосування механізованого зварювання в ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України, розроблено самозахисний порошковий дріт для зварювання корозійностійких сталей, за допомогою якого можна виконувати зварювання стикових, кутових з'єднань і з'єднань внапісок у нижньому положенні й на вертикальній площині сталей типу 18–10 (AISI 304L, 308L, 347 і 321). Механічні властивості металу шва відповідають вимогам, що висуваються до швів, виконаних на повітрі. Застосування механізованого зварювання самозахисним порошковим дрітом відкриває перспективу автоматизації процесу зварювання та запобігання участі людини в роботах при особливо небезпечних умовах.

Ключові слова: мокре підводне зварювання; сталь 08X18H10T; самозахисний порошковий дріт; газошлакова система; легуючі елементи; АЕС.

© Н. Ю. Каховский, С. Ю. Максимов, Г. В. Фадеева, 2014

Вследствие высокого уровня радиации, ограничивающего доступ обслуживающего персонала к оборудованию, находящемуся в непосредственной близости от реактора АЭС, при ремонте или регламентных работах стараются максимально применять технику с дистанционным управлением. В случае необходимости использовать человеческий труд подобная задача сильно усложняется. Одним из возможных путей ее решения может служить использование физических защитных свойств водной среды, которая является естественным барьером, уменьшающим воздействие радиоактивного излучения.

Первые спуски человека под воду в таких условиях относятся к середине 1970-х годов, когда в США первые АЭС достигли середины срока эксплуатации [1]. Пионером по применению сварки под водой стала в 1984 году Пенсильванская АЭС, оснащенная реакторами на кипящей воде мощностью 1050 МВт [2]. Во время загрузки топлива визуальный контроль выявил усталостную трещину в корпусе паросушителя. Уровень радиации на поверхности корпуса составлял 1 бэр/ч, на расстоянии 46 см — 0,5 бэр/ч. Для снижения дозы облучения ремонт выполняли комбинированным способом: помещение заполнили водой, водолаз разделал кромки под сварку, затем воду слили, а дефектный участок заварили вручную неплавящимся электродом.

В 1987 году во время очередной операции по загрузке топливом обнаружилась еще одна усталостная трещина длиной 1400 мм в корпусе парогенератора. Приборы зафиксировали высокий уровень радиации даже в заполненном водой состоянии: на поверхности металла — 6 бэр/ч, на расстоянии 30 см — 1,5 бэр/ч. Из возможных в таких условиях вариантов ремонта выбрали мокрую подводную сварку покрытыми электродами, заполнив водой помещение [2].

Однако сварочные электроды по сравнению с самозащитной порошковой проволокой имеют ряд недостатков:

большой диаметр сварочных электродов, затрудняющий сварку во всех пространственных положениях;

большой коэффициент расхода сварочного материала, вследствие чего большую стоимость 1 кг наплавленного металла;

более низкую производительность выполнения работ, а следовательно, более длительный контакт водолаза с радиоактивной водой и увеличенное время простоя АЭС во время ремонта.

С учетом экономических реалий атомной энергетики, где час простоя АЭС может стоить полмиллиона долларов [1], а каждая лишняя минута нахождения в радиоактивной среде наносит вред здоровью водолаза-сварщика, существовала острая необходимость создания технологии более оперативного ремонта. В ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины было принято решение о разработке технологии с применением в качестве сварочного материала самозащитной порошковой проволоки для мокрой подводной сварки. Данная технология имеет ряд преимуществ и позволит:

повысить производительность и качество проведения подводных сварочно-ремонтных работ за счет использования механизированного способа сварки;

уменьшить вред здоровью водолаза-сварщика благодаря меньшему времени пребывания в радиоактивной среде;

получить экономический эффект при использовании порошковой проволоки за счет меньшего времени простоя оборудования АЭС;

в перспективе — автоматизировать процесс сварки для исключения полного участия человека в работах в особо опасных условиях.

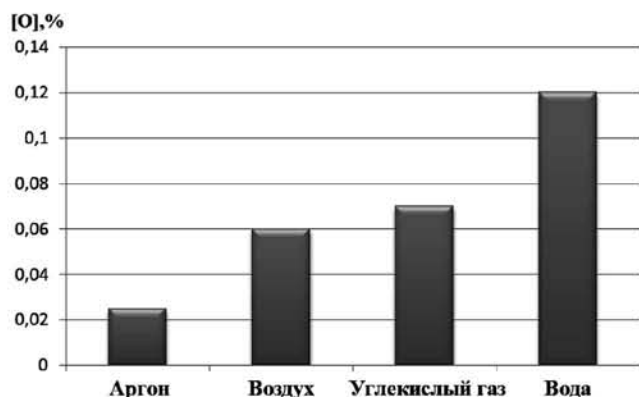


Рис. 1. Окислительный потенциал окружающей среды

Цель исследований заключалась в разработке самозащитной порошковой проволоки для мокрой подводной сварки высоколегированных коррозионностойких сталей типа 18–10 (на данный момент самозащитных порошковых проволок для подводной сварки высоколегированных коррозионностойких сталей в мире не существует).

Мокрая подводная сварка имеет ряд особенностей. При сварке под водой дуга горит в газовом пузыре, который образуется за счет испарения и разложения воды, паров и газов расплавленного металла, компонентов сварочных материалов [3]. Плотность воды в 850 раз больше плотности воздуха, теплоемкость — в 4 раза, теплопроводность — в 25 раз [4]. Дуга, горящая под водой, испытывает два вида сжатия (контрагирования) — от охлаждающего воздействия водорода и гидростатического давления столба жидкости [5]. Охлаждающее действие воды, повышенное давление, диссоциация воды и ее паров приводят к дестабилизации процесса горения дуги, что, в свою очередь, приводит к необходимости затрачивать большую мощность на поддержание дугового разряда, чем при сварке на воздухе [6, 7].

Обеспечение надежной защиты расплавленного металла от окислительного воздействия окружающей среды — одно из основных заданий при разработке порошковых проволок для подводной сварки. На первом этапе разработки необходимо было выбрать оптимальный тип шлаковой системы, которая обеспечивает удовлетворительные сварочно-технологические свойства порошковой проволоки (стабильное горение дуги, хорошую способность шлаков покрывать металл шва, отсутствие пригара, легкую отделимость шлаковой корки, хорошее формирование металла шва и высокую стойкость против образования горячих трещин и пор) с учетом повышенной окислительной способности среды.

При разработке композиции сердечника количество газошлакообразующих компонентов в нем устанавливается исходя из условия обеспечения надежной защиты металла от окружающей среды, а также благоприятного соотношения скоростей плавления оболочки и сердечника. Обычно в порошковых проволоках для сварки высоколегированных сталей на воздухе содержание газошлакообразующих компонентов составляет от 6 до 14 %.

На начальном этапе сварка выполнялась порошковой проволокой диаметром 1,8 мм фторидного типа с оболочкой из коррозионностойкой холоднокатаной ленты на режимах $U_d = 32...34$ В, $I_{св} = 140...160$ А, прямая полярность. Масса газошлакообразующих компонентов составляла 14 % массы проволоки.

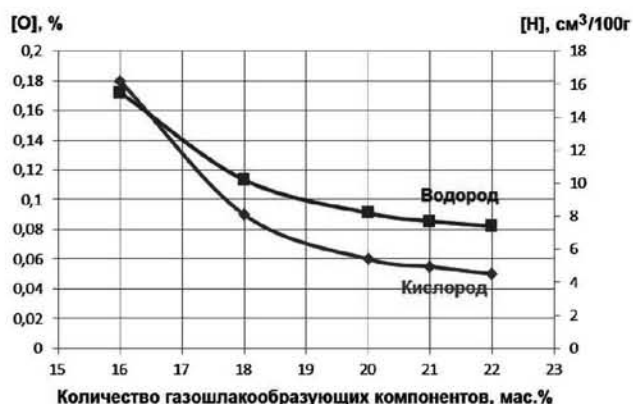


Рис. 2. Зависимость количества кислорода в наплавленном металле шва от количества газошлакообразующих компонентов в шихте порошковой проволоки

Для определения окислительной способности окружающей среды выполнялись накладки в среде аргона, воздуха, углекислого газа и воды. Установлено, что в результате высокого окислительного потенциала содержание кислорода в швах, сваренных под водой, достигало 0,12 % (рис. 1).

Исходя из необходимости снижения содержания кислорода до 0,05...0,06 % количество газошлакообразующих компонентов было увеличено. Нужный результат получен при их содержании в порошковой проволоке около 21 % (рис. 2).

Сравнительные исследования швов, выполненных на воздухе и под водой, показали значительное выгорание С, Si, Mn, Cr, Nb в металле шва (табл. 1). Снижение содержания ферритообразующих элементов (Si, Cr, Nb) приводит к снижению α -фазы до 2 %, что может отрицательно сказаться на технологической прочности металла шва. Снижение содержания углерода компенсируется снижением содержания ниобия и не должно повлиять на стойкость против межкристаллитной коррозии.

Таблица 1. Химический состав наплавленного металла

Окружающая среда	Содержание элементов, %					
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Nb
Воздух	0,06	0,52	1,83	21,83	9,50	0,30
Вода	0,04	0,32	1,23	20,90	9,40	0,21

Влияние среды на газонасыщенность металла шва видно из данных, приведенных в табл. 2. Наиболее значительно повышается содержание водорода — почти в 2 раза, но остается в пределах растворимости в аустените. Поэтому можно не опасаться снижения механических свойств и повышения склонности к порообразованию.

Таблица 2. Содержание газов в металле шва

Окружающая среда	Содержание газов			
	% по массе			см³/100 г
	[N]	[O]	[H]	[H]
Воздух	0,06	0,05	0,0010	11,0
Вода	0,03	0,07	0,0018	20,0

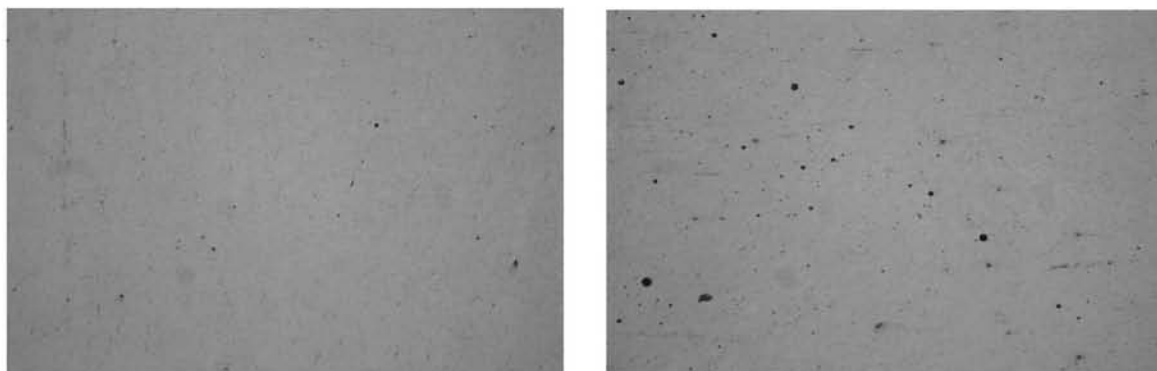


Рис. 3. Неметаллические включения в металле шва при сварке на воздухе (а) и под водой (б)

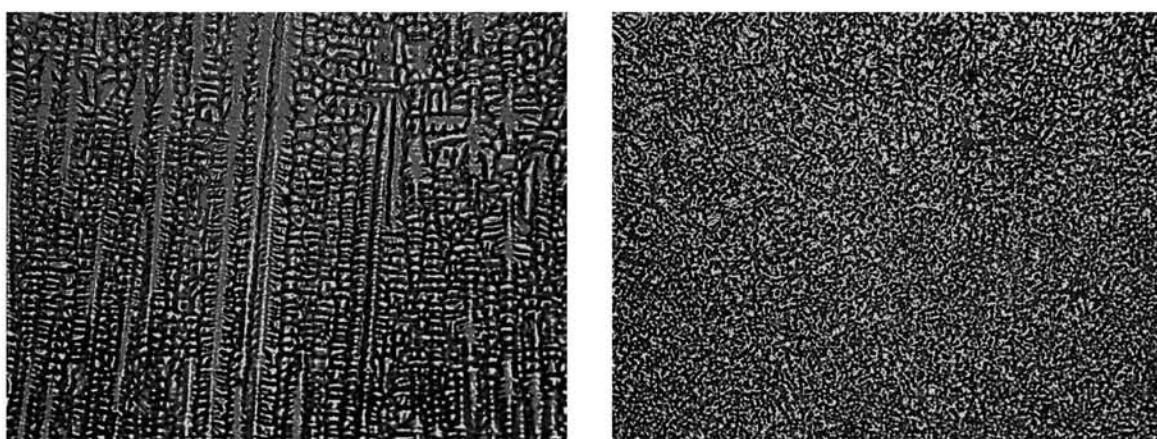


Рис. 4. Микроструктура металла швов, сваренных на воздухе (а) и под водой (б)

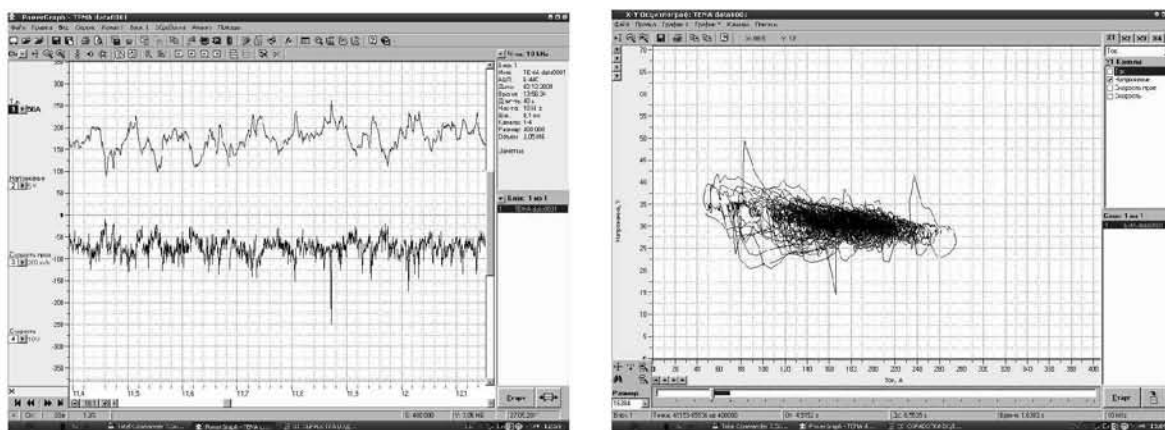


Рис. 5. Осциллограмма процесса сварки (а) и внешняя вольт-амперная характеристика процесса сварки порошковой проволокой (б)

Металлографические исследования показали, что при сварке под водой общее количество неметаллических включений увеличивается почти в 2 раза, но они мелкодисперсные и равномерно распределены по сечению шва (рис. 3).

Структура металла шва в значительной степени измельчается — размер зерен уменьшается более чем в 4 раза (рис. 4).

Разработанной порошковой проволокой были сварены стыковые соединения стали 08X18H10T толщиной 12 мм. Процесс сварки протекает с удовлетворительной стабильностью горения дуги и без коротких замыканий, о чем свидетельствуют осциллограммы тока и напряжения, а также внешняя вольт-амперная характеристика (рис. 5),

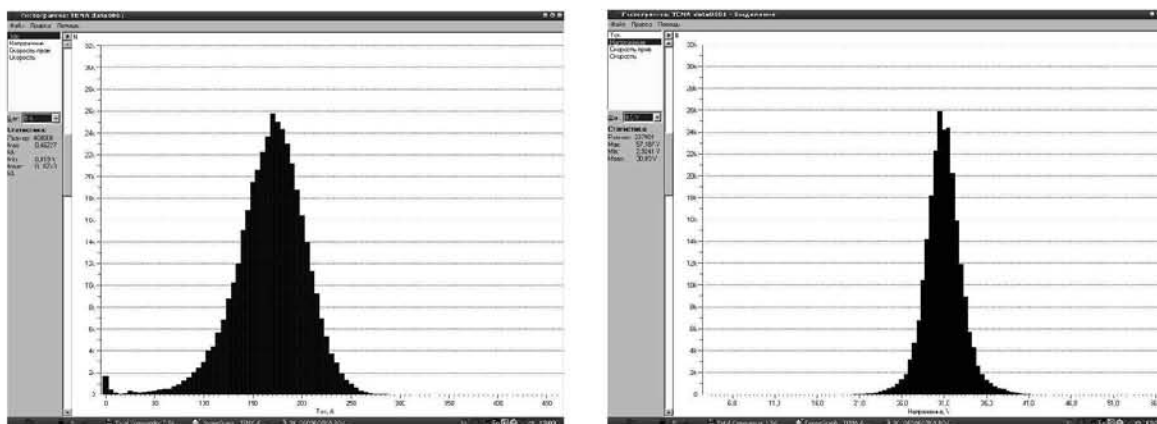


Рис. 6. Гистограммы сварочного процесса по току (а) и напряжению (б)

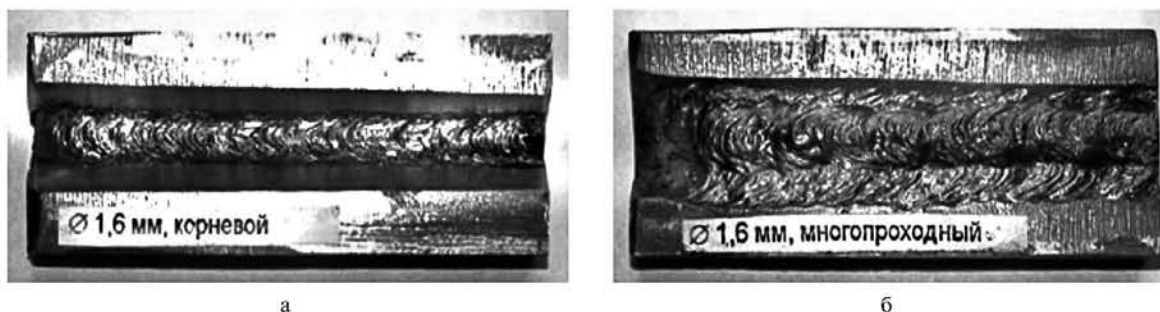


Рис. 7. Формирование металла корневого прохода (а) и многопроходного шва (б)

гистограммы тока и напряжения (рис. 6), построенные с помощью программы Power Graph Professional v.3.3.

На рис. 7 показан внешний вид корневого прохода и заполняющих слоев сварного соединения стали 12X18H10T толщиной 12 мм, выполненных под водой порошковой проволокой диаметром 1,6 мм.

Результаты испытания образцов, вырезанных из стыкового соединения (марка порошковой проволоки — ПП-АНВ-25), при температуре проведения испытаний 293 К (20 °С) таковы:

- предел текучести $\sigma_{0,2}$ — 350,8 МПа;
- предел прочности σ_B — 623,3 МПа;
- относительное удлинение δ — 25,7%;
- относительное сужение Ψ — 28,7%;
- ударная вязкость a_K — 90,3 Дж/см²;
- угол загиба — 68...103 град.

Полученные значения механических свойств превосходят механические свойства металла шва, сваренного на воздухе электродами, обеспечивающими наплавленный металл типа Э-08Х20Н9Г2Б согласно ГОСТ 10052-75. По своим свойствам разработанная самозащитная порошковая проволока для подводной сварки высоколегированных коррозионноустойчивых сталей типа 18–10 полностью соответствует требованиям международного стандарта для подводной сварки ANSI/AWS D3.6. Применение самозащитной порошковой проволоки позволит ощутимо сократить время пребывания водолаза-сварщика вблизи источника радиоактивного излучения, а в перспективе — исключить полностью.

Выводы

Исследована степень окисляющего и наводороживающего влияния водной среды при мокрой подводной сварке стали типа 18–10; определена зависимость оптимального количества кислорода и водорода в наплавленном металле шва. С помощью анализатора сварочных процессов получены временные и электрические параметры сварочного процесса опытными порошковыми проволоками, анализ и корректировка которых позволили добиться стабильного процесса горения дуги под водой.

Разработана самозащитная порошковая проволока, которая обеспечивает необходимый химический состав и механические свойства согласно ГОСТ 10052–75 и выполнение требований класса «В» международного стандарта подводной сварки ANSI/AWS D3.6.

Создана основа для возможности автоматизации процесса сварки с целью исключения полного участия человека в работах в особо опасных условиях.

Список использованной литературы

1. Hancock R. Underwater nuclear // Welding Journal. — 2003. — № 9. — P. 48, 49.
2. O'Sullivan J. E. Wet underwater weld repair of Susquehanna unit 1 steam dryer // Welding Journal. — 1988. — № 6. — P. 19–23.
3. Кононенко В. Я. Подводная сварка и резка / В. Я. Кононенко — К. : Ун-т «Україна», 2011. — 264 с.

4. *Авилов Т. И.* Исследование процесса дуговой сварки под водой // Сварочное производство. — 1958. — № 5. — С. 12—14.
5. *Мадатов Н. М.* Подводная сварка и резка металлов / Н. М. Мадатов. — Л. : Судостроение, 1967. — 164 с.
6. *Лесков Г. И.* Энергетические параметры дуги в условиях гидростатического давления до 5 Мпа / Г. И. Лесков, О. М. Потиха // Автомат. сварка. — 1999. — № 1. — С. 15—18.
7. *Лесков Г. И.* Энергетические характеристики дуги со стальными электродами в атмосфере водорода / Г. И. Лесков // Автомат. сварка. — 1993. — № 10. — С. 3—5.

References

1. *Hancock R.* (2003), "Underwater Nuclear", *Welding Journal*, No. 9, pp. 48, 49.
2. *O'Sullivan J. E.* (1988), "Wet Underwater Weld Repair of Susquehanna Unit 1 Steam Dryer", *Welding Journal*, No. 6, pp. 19—23.
3. *Kononenko V. Ya.* (2011), *Underwater Welding and Cutting [Podvodnaia svarka i rezka]*, Kyiv, University "Ukraine", 264 p. (Rus).

4. *Avilov T. I.* (1958), "Investigation of the Arc Welding Process Under Water" [Issledovaniie protsessa dugovoi svarki pod vodoi. Svarochnoe proizvodstvo], *Welding Production*, No. 5, pp. 12—14. (Rus).
5. *Madatov N. M.* (1967), *Underwater Welding and Cutting of Metals [Podvodnaia svarka i rezka metallov]*, Sudostroenie, 164 p. (Rus).
6. *Leskov G. I., Potikha O. M.* (1999), "Energy Parameters of the Arc Under Hydrostatic Pressure up to 5 MPa" [Energeticheskie parametry dugi v usloviakh gidrostaticeskogo davleniia do 5 MPa], *Avtomaticheskaja svarka*, No. 1, pp. 15—18.
7. *Leskov G. I.* (1993), "Energy Characteristics of the Arc with Steel Electrodes in an Atmosphere of Hydrogen" [Energeticheskie kharakteristiki dugi so stalnymi elektrodami v atmosfere vodoroda], *Avtomaticheskaja svarka*, No. 10, pp. 3—5.

Получено 07.10.2014.