

авторами математическая модель и компьютерная программа. Мониторинг процесса хранения осуществлялся с помощью температурных датчиков, заложенных внутри штабеля. Производственные опыты в первые два года внедрения данного способа хранения фанерного сырья в объеме 20 000 куб. м показали его высокую эффективность. Потери качества древесного сырья не наблюдалось. Фактические температуры в процессе мониторинга внутри штабеля, на границе между теплоизолятором и штабелем были близки к расчетным значениям, полученным с помощью разработанных математических моделей.

### Литература

1. Справочник фанерщика. / под ред. И.А. Шейдина. 3 изд. М.: Лесн. Пром-сть, 1968. 830 с.
2. Чудновский А.Ф. Теплофизические характеристики дисперсных материалов. М.: Физматгиз, 1962. 456 с.
3. Комяков А.Н. О теплопроводности дисперсных материалов типа замороженной древесной щепы // Вестн. Моск. гос. ун-та леса Лесной вестник. 2010. № 4. С.132-136.
4. Комяков А.Н. Приближенное решение задачи о движении границы таяния льда в замороженном слое плавучего контейнера с древесной щепой // Там же. С.129-132.
5. Комяков А.Н., Лозовецкий В.В., Лукьянов А.А., Шевелев И.Л. Новая технология доставки измельченных древесных материалов в мягких большегрузных плавучих контейнерах. // Транспорт: Наука, техника, управление.: сб. обзор. Информ. ВИНТИ. 2000. № 10 С. 39-41.
6. Комяков А.Н., Карпачев С.П. Применение большегрузных плавучих контейнеров для нужд биоэнергетики. // Там же. С. 104-107.

7. Тихонов А.Н. и Самарский А.А. Уравнения математической физики. М.: Изд-во МГУ, 1999. 798 с.
8. Деч Г. Руководство к применению преобразования Лапласа и z-преобразования. М.: Наука, 1971. 288 с.
9. Комяков А.Н. Как сохранить качество древесного сырья. Лесопромышленник. 2001. С. 29.

### Литература

5. Справочник фанерщика. Под ред. И.А. Шейдина, 3 изд., М.: Лесная промышленность, 1968. 830 С.
6. Чудновский А.Ф. Теплофизические характеристики дисперсных материалов. М.: Физматгиз, 1962. 456 с.
7. Комяков А.Н., О теплопроводности дисперсных материалов типа замороженной древесной щепы. Вестник Московского государственного университета леса - Лесной вестник. №4, М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2010. С.132-136.
8. Комяков А.Н. Приближенное решение задачи о движении границы таяния льда в замороженном слое плавучего контейнера с древесной щепой. Вестник Московского государственного университета леса - Лесной вестник, №4, – М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2010. С.129-132.
5. Комяков А.Н., Лозовецкий В.В., Лукьянов А.А., Шевелев И.Л. Новая технология доставки измельченных древесных материалов в мягких большегрузных плавучих контейнерах. Транспорт: Наука, техника, управление. Сборник обзорной информации ВИНТИ. 2000. № 10 С.39-41.
6. Комяков А.Н., Карпачев С.П. Применение большегрузных плавучих контейнеров для нужд биоэнергетики. Вестник Московского государственного университета леса - Лесной вестник. , №4, – М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2010. С. 104-107.
7. Тихонов А.Н. и Самарский А.А. Уравнения математической физики. М.: Издательство МГУ, 1999. 798 с. 2001. С.29.

УДК 669:620.193/197; 669:017

## Электрохимические методы исследований образцов трубопроводных энергетических систем, подвергнутых противокоррозионной обработке

А.Н. Баранов<sup>1</sup>, Н.И. Янченко<sup>1</sup>, Е.А. Гусева<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Иркутский государственный технический университет, ул. Лермонтова, 83, Иркутск, Россия. E-mail: a\_baranow@mail.ru  
Статья поступила 11.08.2012, принята 16.11.2012

*Оборудование промышленных производств подвергается разрушению в результате коррозии металлических элементов конструкций. Эти разрушения могут быть связаны с высокими температурами процессов, агрессивностью среды, высокой влажностью воздуха, возможными нарушениями технологического режима. В связи с этим становится актуальной проблема надежности оборудования. Надежность достигается проведением противокоррозионной обработки, например, нанесением защитных покрытий, качество которых можно оценить измерением скорости коррозии. В данной работе представлены результаты исследования скорости коррозии стальных образцов трубопроводов энергетического оборудования действующей ГРЭС. На поверхность трубопроводов различными способами были нанесены защитные пассивирующие покрытия. Исследования скорости коррозии производились по результатам обработки полученных поляризационных кривых. Применяемая методика позволяет оценить качество защитной способности различных покрытий с применением потенциостата «ПИ-50-Pro». Методика позволяет легко и с высокой точностью осуществлять диагностику коррозионной устойчивости металлического оборудования при его контакте с электролитами. Установлено, что скорость коррозии образцов с покрытиями ниже, чем у незащищенных образцов.*

**Ключевые слова:** электродные потенциалы, коррозионные токи, потенциостат, скорость коррозии, трубопроводная система, противокоррозионная обработка.

# Electrochemical methods to study pipeline energy systems subjected to anticorrosion treatment

A.N. Baranov<sup>1</sup>, N.I. Yanchenko<sup>1</sup>, E.A. Guseva<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Research Irkutsk State Technical University, 83 Lermontova str., Irkutsk, Russia. E-mail: a\_baranow@mail.ru  
The article received 11.08.2012, accepted 16.11.2012

*The industrial equipment is subjected to destruction as a result of metal elements corrosion. This destruction can be attributed to high temperatures of the processes, the environment aggressiveness, high air humidity and possible operating practices disturbances. In this connection, the equipment reliability problem becomes the urgent one. The reliability improvement is achieved through the corrosion prevention treatment, for example protective coat applying, the quality of which can be evaluated by the corrosion rate measurements. The paper presents the research results of the pipeline steel samples corrosion rate of the operating SDPP (State District Power Plant) power equipment. The protective inhibitive coatings were applied on the pipeline surfaces using different methods. The corrosion rate studies were carried out according to the results of the obtained polarization curves. The technique in operation makes it possible to evaluate the quality of the various coatings protective capacity by using the «PI-50-Pro» potentiostat. The technique allows maintaining the corrosion resistance diagnostics of the metal equipment under its contact with electrolytes easily and with high accuracy. It has been established that the corrosion rates of the samples having coatings are lower than that of the unprotected ones.*

**Keywords:** electrode potentials, corrosion currents, potentiostat, corrosion rate, pipeline system, anticorrosion treatment.

**Введение.** Оборудование промышленных производств (например, металлургическое, энергетическое и т. д.) подвергается разрушению в результате коррозии металлических элементов конструкций. Эти разрушения связаны с высокими температурами процессов, агрессивностью среды, возможными нарушениями технологического режима. В связи с этим становятся актуальными проблемы исследования коррозионных процессов и измерения скорости коррозии путем снятия поляризационных кривых. Повышение надежности оборудования может достигаться проведением противокоррозионной обработки трубопроводных систем, например, нанесением защитных пассивирующих покрытий.

Известны электрохимические методы исследования процесса коррозии образцов стали, которые заключаются в снятии поляризационных кривых на потенциостате. Кривые, графически отражающие зависимость анодного и катодного токов от потенциала, называются поляризационными кривыми [1]. Стационарному состоянию системы соответствует значение потенциала, при котором выполняется условие

$$I_k = I_a \quad (1)$$

Оценка принципиальной возможности протекания электрохимической коррозии производится по величине ЭДС коррозионного элемента, равной разности равновесных потенциалов сопряженных электрохимических реакций. Кинетические характеристики коррозионных процессов удобно представлять графически в виде совокупности поляризационных кривых катодного и анодного процессов. При этом по оси абсцисс откладывают потенциалы анодных и катодных процессов, по оси ординат – соответствующие анодные и катодные токи, либо строят полулогарифмическую зависимость в координатах «потенциал – lg плотности тока».

Суждение о реальной скорости процесса коррозии можно получить из кинетических зависимостей анод-

ной и катодной реакций. Катодную и анодную поляризационные кривые снимают непосредственно на образце, коррозию которого изучают. Точка пересечения анодной и катодной поляризационных кривых дает на оси абсцисс общую скорость коррозии, а на оси ординат – стационарный потенциал. Так как вблизи стационарного потенциала поляризационные данные перестают укладываться в полулогарифмическую зависимость, то скорость коррозии находят обычно по точке пересечения экстраполированных прямолинейных кривых [2]. Значение стационарного (коррозионного) потенциала всегда лежит между значениями равновесных потенциалов сопряженных реакций. Общую скорость коррозии выражают силой тока, отнесенной к единице всей поверхности металла (плотность тока), без разделения ее на катодные и анодные участки. Скорость коррозии зависит, в том числе, от механизма анодного растворения металла и катодного процесса восстановления окислителя, и, таким образом, может быть рассчитана в зависимости от взаимного расположения поляризационных кривых [3, 4].

Графический метод расчета скорости коррозии позволяет, в отличие от аналитического, рассчитать скорость коррозии для весьма сложных случаев, соответствующих реальным условиям протекания коррозионного процесса.

**Материалы и методы исследований.** В качестве объекта исследований выбрана трубопроводная система энергетического оборудования одной из действующих ГРЭС. В качестве предмета исследования представлены как незащищенные металлические образцы, так и образцы, на поверхность которых различными способами были нанесены защитные пассивирующие покрытия.

Для снятия зависимости «ток – потенциал» использовали потенциостаты. Ранее применяли механические потенциостаты марки П и электронные «ПИ-50», в которых ток и потенциал записывались с помощью самописца ПДП, либо показания снимались с прибора со стрелочным или цифровым индикатором. Это достаточно трудоемкая работа, не позволяющая с необходимой точностью снимать показания. В настоящее время разрабо-

тан потенциостат-гальваностат «ПИ-50-Pro», в котором показания фиксируются компьютером в цифровом виде, что значительно облегчает проведение экспериментов и повышает точность обработки полученных данных. Прибор разработан как электронное оборудование, предназначенное для проведения широкого спектра научных исследований в различных областях химии и физики. В частности, поддерживается большинство электрохимических экспериментальных методов – вольтамперометрия, потенциометрия, кулонометрия, хронопотенциометрия, циклическая и линейная развертки потенциала или тока, импульсные аналитические методы исследований, а также многие другие. Потенциостат позволяет работать по двух-, трех- или четырехэлектродной схеме подключения к электрохимической ячейке, как в потенциостатическом, так и в гальваностатическом режимах. Управляющие программы позволяют полностью управлять прибором и оперировать с регистрируемыми данными с персонального компьютера.

Диагностика и контроль качества исследуемых защитных покрытий осуществлялись с помощью потенциостата «ПИ-50-Pro». В данных исследованиях реализовали трехэлектродную схему подключения к электрохимической ячейке с использованием хлор-серебряного электрода сравнения и вспомогательного платинового электрода.

Для проведения коррозионных испытаний в качестве фонового раствора использовали 3 %-й раствор NaCl в дистиллированной воде.

На внутренней поверхности образцов трубопроводной системы был выделен участок площадью 10 см<sup>2</sup>. Остальная поверхность покрывалась электроизоляци-

онным лаком. Перед испытанием образцы промывались дистиллированной водой, затем помещались в стакан вместимостью 500 мл таким образом, чтобы выделенный участок оказался полностью погруженным в 3 %-й раствор NaCl в дистиллированной воде.

**Снятие «U-I»-кривых.** Включить потенциостат «ПИ-50-Pro», запустить программу «PS\_Pack2», выбрать тип прибора – импульсный. В стакан налить 150 мл 3 %-го раствора NaCl. Исследуемый образец присоединить к разъемам Work и Comp, электрод сравнения – к разъему Ref, вспомогательный – к Counter.

Нужно измерить начальный потенциал при отключенной ячейке до его полного установления в течение 10-15 мин. Выбрать тип эксперимента – линейная развертка. Установить режим «Потенциостат». Режим работы: потенциал начальный – около 400 мВ; максимальный потенциал – 100 мВ; минимальный потенциал – 1500 мВ; конечный потенциал – 100 мВ; начальное направление – в катодную область; скорость развертки – 26,932 мВ/с, диапазон тока – 2000 мА, диапазон потенциала – 50 В, количество фиксируемых точек – 1 в сек. Применили заданные условия и запустили программу.

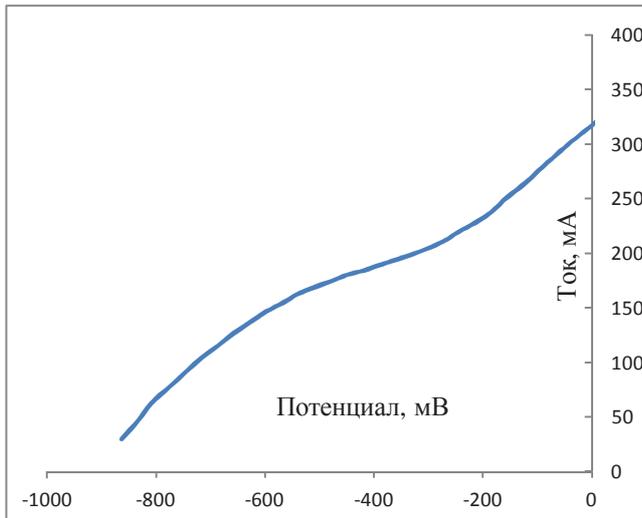
Испытания проводились при температуре 25 °С. Полученные результаты сохранялись в виде графиков и таблиц данных.

**Результаты и обсуждение.** На основании исходных данных рассчитаны токовый, весовой, глубинный показатели коррозии. Обработанные результаты коррозионных исследований трубопроводных систем энергетического оборудования с различными покрытиями представлены в таблице 1 и на рис.1(а, б).

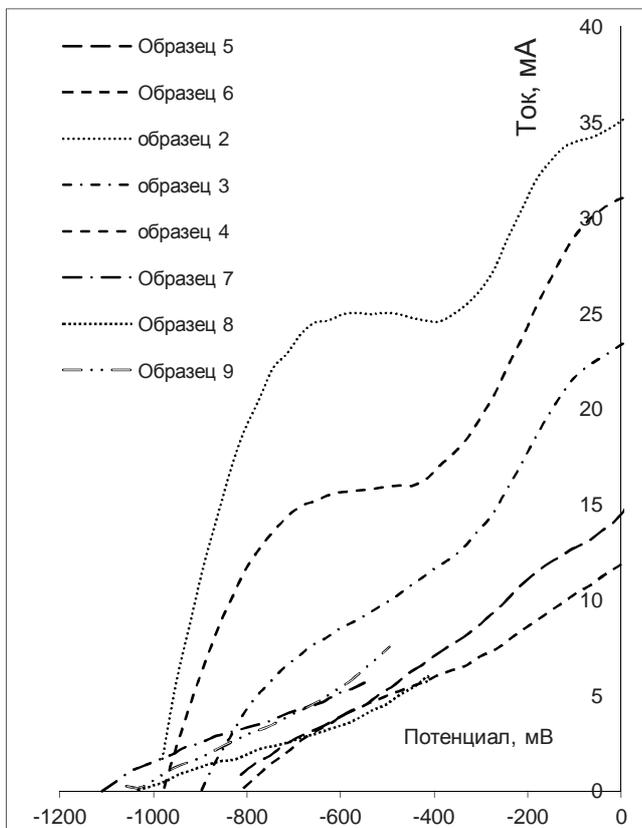
Таблица 1

*Результаты коррозионных исследований трубопроводных систем энергетического оборудования с различными покрытиями*

Номер по порядку	Наименование образца	Токовый показатель скорости коррозии, А/м <sup>2</sup>	Весовой показатель Km, г/м <sup>2</sup> ч	Глубинный показатель Kп, мм/год
1	Стальная труба котельного оборудования (БЕЗ ПОКРЫТИЯ)	85 79	88,57 82,32	99 92
2	Стальная труба котельного оборудования (ПОКРЫТИЕ №1)	17	17,7	19,82
3	Стальная труба котельного оборудования (ПОКРЫТИЕ №2)	6,3	6,56	7,34
4	Стальная труба котельного оборудования (ПОКРЫТИЕ №3)	1	1,042	1,16
5	Стальная труба котельного оборудования (ПОКРЫТИЕ №4)	4	4,168	4,66
6	Стальная труба котельного оборудования (ПОКРЫТИЕ №5)	3,2	3,34	3,74
7	Стальная труба котельного оборудования (ПОКРЫТИЕ №6)	3	3,126	3,5
8	Стальная труба котельного оборудования (ПОКРЫТИЕ №7)	2,2	2,2	2,56
9	Стальная труба котельного оборудования (ПОКРЫТИЕ №8)	3,2	3,33	3,7



а)



б)

**Рис.1.** Зависимость силы тока (mA) от потенциала (mV) относительно хлор - серебряного электрода сравнения (а) - для образца 1 без покрытия; (б) - для образцов 2 - 9 с покрытием

На рис. 1 видно, что ток коррозии образцов с пассивирующими покрытиями значительно ниже, чем у незащищенных образцов.

Установлено, что усредненная скорость коррозии образца № 1 (без покрытия) высокая и составляет около 95 мм/год в растворе 3 % NaCl. Образцы, имеющие

в качестве покрытия защитную пассивирующую пленку, корродируют в том же растворе медленнее. Скорость коррозии у образца № 2 составляет около 20 мм/год, в сравнении с образцом 1 скорость коррозии уменьшается в 4 раза. Наибольшую защиту обеспечивает пассивирующая пленка, нанесенная на образец № 3, скорость коррозии которого составляет около 1 мм/год.

На основании этого можем сделать вывод о том, что пассивирующие защитные пленки обеспечивают определенную степень защиты.

Таким образом, предлагаемая методика по контролю качества защитной способности покрытий с применением потенциостата «ПИ-50-Pro» позволяет легко и с высокой точностью осуществлять диагностику коррозионной устойчивости металлического оборудования при его контакте с электролитами.

**Выводы.** Для оценки коррозионной устойчивости защитных покрытий металлических образцов применяли электрохимический метод исследования на приборе «ПИ-50-Pro».

1. В качестве объекта исследований выбрана трубопроводная система энергетического оборудования одной из действующих ГРЭС. В качестве предмета исследования были выбраны как незащищенные металлические образцы (один), так и образцы, на поверхность которых различными способами были нанесены защитные пассивирующие покрытия (восемь).

2. Получены зависимости тока от потенциала в растворе хлористого натрия. На основании полученных данных рассчитаны токовый, весовой, глубинный показатели коррозии.

3. Установлено, что скорость коррозии образцов с покрытиями ниже, чем у незащищенных образцов.

#### Литература

1. Дамаскин Б.Б., Петрий О.А., Цирлина Г.А. Электрохимия. М.: Химия, Колос, 2006. 672 с.
2. Баранов А. Н., Михайлов Б. Н. Защита металлов от коррозии. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2012. 152 с.
3. Янюшкин А.С., Архипов П.В. Атомно-молекулярные процессы в зоне алмазного круга и обрабатываемого материала // Технология металлов. 2010. № 1. С.25-33.
4. Баранов А.Б., Юдин А.Н., А.С.Янюшкин А.С., Рычков Д.А. Способ получения комбинированного хромового покрытия: пат. 2459018. Рос. Федерация. опубл. 20.08.12, Бюл. № 23.

#### References

1. Damaskin B.B., Petrij O.A., Cirliina G.A. Jelektrohimija: ucheb. posobie dlja vuzov. 2-e izd., ispr. i pererab. M.: Himija, Kolos, 2006. 672 s.
2. Baranov A. N., Mihajlov B. N. Zawita metallov ot korrozii: Ucheb. posobie. – Irkutsk: Izdatel'stvo IrGTU, 2012. – 152 s.
3. Yanyushkin A.S., Arhipov P. V. Atomic and molecular processes in a zone of a diamond circle and a worked stock. Process metallurgy. No. 1, 2010. Page 25-33.
4. Patent Russian Federation No. 2459018. A mode of deriving of the combined chromic coverage//A.N.Baranov, A.N.Yudin, A.S.Yanyushkin, D.A.Rychkov. Opubl. 8/20/2012. Byul. No. 23.