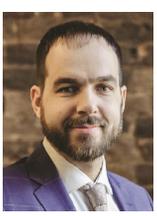
УДК 621.793
DOI

ТОЧНОСТЬ И ДОСТОВЕРНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ ГАЗОАНАЛИТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ЗА СЧЕТ НАНЕСЕНИЯ ИНЕРТНОГО ПОКРЫТИЯ НА ЭЛЕМЕНТЫ ГАЗОВОГО ТРАКТА

П. А. Тополянский,
канд. техн. наук,
ООО «Плазмацентр»,
Санкт-Петербург, Россия.
E-mail: topoljansky@mail.ru

С. А. Ермаков,
канд. техн. наук,
Санкт-Петербургский университет
Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия.
E-mail: cermakov@mail.ru



А. П. Тополянский,
ООО «Плазмацентр»,
Санкт-Петербург, Россия.
E-mail: andrey@plasmacentre.ru

Рассмотрена актуальность применения инертных (барьерных) нанопокрытий для защиты (пассивации) деталей, изготовленных из нержавеющих сталей. Данные покрытия обеспечивают решение проблем, связанных с точностью и достоверностью количественного и качественного анализа веществ при минимальном содержании активных соединений в пробе, отсутствием стабильности содержания активных соединений в пробе с течением времени, невозможностью обработки большого количества проб без повторной калибровки. Представлены результаты исследований нового инертного покрытия SilcoPateks, наносимого методом химического осаждения из паровой фазы с плазменным ассистированием (процесс PACVD). Данное покрытие применяется для защиты от химически активных веществ, способных адсорбироваться и взаимодействовать с металлом, изменять состав в пробе, борьбы с сульфидной и другой коррозией. Приведен сравнительный анализ покрытия SilcoPateks с близкими аналогами – покрытиями SilcoNert® и DurSan®, разработанными ведущими мировыми компаниями – корпорациями Restek и SilcoTek (США). Покрытие SilcoPateks широко применяется в отечественном оборудовании для хроматографии, масс-спектрометрии, в ультрафиолетовых флуоресцентных и других анализаторах веществ, в пробоотборниках для хранения, перевозки, испытаний и исследования проб веществ, для нержавеющей арматуры (клапанов, вентилей), фитингов и манометров, для пробоотборных стендов, систем кондиционирования, калибровочных панелей, кулеров для охлаждения проб, водомасляных ловушек (фильтров) и других изделий.

***Ключевые слова*:** точность измерений, хроматографические измерения, инертное покрытие, барьерное нанопокрытие, сульфинертное покрытие, сульфинертная пассивация, химическое осаждение покрытий из паровой фазы с плазменным ассистированием, PACVD.

P. A. Topolianskii, (Plasmacentre Ltd, St. Petersburg, Russia);
S. A. Ermakov (Peter the Great St. Petersburg University, St. Petersburg, Russia);
A. P. Topolianskii (Plasmacentre Ltd, St. Petersburg, Russia)

PRECISION AND CONFIDENCE LEVEL OF CHANGES IN MEASUREMENTS OF GAS ANALYTICAL COMPLEXES BY MEANS OF APPLYING INERT COVERS ON GAS TRACT ELEMENTS

The relevance of using inert (barrier) nanocoatings for protection (passivation) of parts made of stainless steel has been considered. Such coatings ensure solving problems related to the precision and accuracy of the assay and quality testing of substances with the minimum content of active compounds in a sample, lack of stability in the content of active compounds in a sample over time, inability to treat large amounts of samples without repeated calibration. The findings of the research into the new inert SilcoPateks coating applied by plasma assisted chemical vapor deposition (PACVD process) have been presented. Such coating is used for protection against chemically active

substances capable of absorbing and interacting with metals, of changing the sample composition, for countering sulfide and other corrosion. We present a comparative analysis of the SilcoPateks coating with its close analogues – SilcoNert® and DurSan® coatings developed by the world's leading companies – the Restek Co. and SilkoTek Co. (USA). The SilcoPateks coating is widely used in the domestic equipment for chromatography, mass spectrometry, in ultraviolet fluorescent and other analyzers of substances, in samplers for storage, for transportation, testing and research of samples of substances, for stainless fixtures (valves, faucets), fittings and manometers, for sampling stands, air conditioning systems, calibration panels, coolers for cooling samples, water-oil traps (filters) and other items.

***Keywords*:** measurement accuracy, chromatographic measurements, inert coating, barrier nanocoating, sulfinert coating, sulfinert passivation, plasma assisted chemical vapor deposition, PACVD.

Статья поступила в редакцию 26.11.2020 *Received 26.11.2020*

В различных областях промышленности, сельском хозяйстве, медицине, криминалистике, судебной экспертизе широко применяются такие методы количественного и качественного анализа веществ, как газовая хроматография, масс-спектрометрия, ультрафиолетовая флуоресценция. В отдельных случаях эти методы используются для постоянного мониторинга сырья, продукции и окружающей среды. Точность, достоверность и стабильность результатов анализа данными методами зависит от отсутствия взаимодействия (адсорбции) пробы с поверхностью деталей газовых трактов. Особенно это важно в исследованиях при минимальном содержании активных элементов в пробе, длительных мониторингах и обработке большого количества проб без повторной калибровки.

В настоящее время основным материалом деталей аналитического оборудования, которые контактируют с исследуемыми пробами, выступает нержавеющая сталь 12Х18Н10Т (импортный аналог – EN 1.4301, AISI 304). Несмотря на то что данный материал является коррозионно-стойким, при контактировании с активными веществами, например, содержащими сероводород, ртутные соединения, галогениды, аммиак и др., возникают явления адсорбции и коррозии. Адсорбция на границе раздела газ–металл связана с повышенной энергией адгезионного взаимодействия поверхности металла, шероховатостью, локальными дефектами, растягивающими напряжениями и другими факторами. Образование питтинговой, щелевой, электрохимической, межкристаллитной коррозии и коррозионного растрескивания под напряжением связано с наличием агрессивной среды в контакте с нержавеющей сталью [1, 2].

Для борьбы с адсорбцией и коррозией деталей аналитического оборудования используются технологии пассивации или нанесения тонкопленочных инертных покрытий [3 – 7]. Цель покрытий – обеспечение барьерных свойств поверхностей деталей, расположенных на пути следования проб, снижение пределов обнаружения активных веществ до уровня миллиардных и триллионных долей в соответствии с ужесточением контролирующими органами пределов обнаружения веществ в активных и сложных пробах. Например, необходимость использования таких инертных покрытий в пробоотборниках определяется требованиями ГОСТ 31370–2008 (ISO 10715:1997) «Газ природный (руководство по отбору проб)».

Дополнительно актуальность использования деталей с инертными покрытиями в аналитическом оборудовании связана:

– с исключением повторных измерений или перепроверки сомнительных результатов измерений, приводящих к временным затратам, уменьшению производительности работ, ухудшению итоговых показателей;

– с отсутствием достаточного количества исследуемого вещества для повторных проб, необходимостью быстрого и точного получения результата анализа скоропортящихся проб при малых их количествах;

– с катастрофическими последствиями, связанными с ненадежными результатами в отношении безопасности окружающей среды, качества пищи и криминальных задач.

Наиболее известные инертные покрытия, применяемые в аналитическом оборудовании мировых производителей (Shimadzu, Bruker, Perkin Elmer, Thermo Scientific, Markes International и других), созданы специалистами корпораций Restek и SilcoTec (США). Нанесение таких покрытий осуществляется химическим осаждением кремнийсодержащих материалов из газовой фазы (CVD-процесс). Данная технология в 2004 г. отмечена американской наградой R&D100 («Оскар» в технологиях) «100 наиболее значимых технологических

продуктов года» [8]. Разработанные этими компаниями покрытия SilcoNert®, DurSan®, Sulfinert®, Silcosteel®, Siltek® превосходят по химической инертности все известные методы пассивации, демонстрируют 10-кратное повышение коррозионной стойкости по сравнению с нержавеющей сталью без покрытия. Отдельные свойства данных покрытий представлены в табл. 1 [9].

В целях создания отечественного аналога упомянутым покрытиям разработано покрытие SilcoPateks, которое обладает повышенной инертностью, износостойкостью, эрозионностойкостью, кавитационностойкостью, абразивостойкостью и фреттингостойкостью. Близкое по свойствам кремнийсодержащее покрытие, наносимое методом финишного плазменного упрочнения, уже нашло применение в промышленности [10, 11]. Отдельные отличительные свойства покрытия SilcoPateks от покрытий, предлагаемых корпорацией SilcoTek, представлены в табл. 2.

Для анализа эффективности применения покрытия SilcoPateks проведены исследования, связанные с точностью, достоверностью и стабильностью качественных и количественных характеристик анализа при использовании и отсутствии данного покрытия на различных компонентах аналитического оборудования и деталях отбора, хранения и транспортировки газов.

1. Характеристики инертных покрытий корпорации SilcoTek

Покрытие	Материал	Максимальная температура эксплуатации, °С	Угол смачивания[2], °	Толщина, мкм	Коэффициент трения[3]	Коэффициент износостойкости[4], 10^{-13}, $м^3 \cdot Н^{-1} \cdot м^{-1}$	pH среды[5]	Характеристики
SilcoNert®	(a-Si:H), гидрированный кремний[1]	450	≥65	0,1…0,5	0,7	14	0…8	Повышенная адгезия с верхним слоем керамики
DurSan®	(a-SiO_x:CH_y), кремний, кислород, углерод[1]	450	≥81	0,4…1,6	0,358	6,13	0…14	Износостойкое, гидрофобное, влагоотталкивающее, с верхним слоем керамики
Silcolloy®	(a-Si:H), гидрированный кремний	1410	≥40	0,18…0,80	0,7	14	0…8	Высокотемпературное, против выщелачивания, мультислойное
SilcoKlean®	(a-Si:H), гидрированный кремний[1]	1100	≥65	0,1…0,5	0,7	14	0…8	Антинагарное, против закоксованности, с верхним слоем керамики
SilcoGuard®	(a-Si:H), гидрированный кремний	1410	≥20	0,18…0,60	0,7	14	0…8	Повышенные барьерные свойства, предотвращает дегазацию в вакууме, мультислойное
DurSox®	(a-SiO_x), кремний, кислород[1]	1250	<40	0,4…1,6	0,378	6,13	0…14	Износостойкое, влагостойкое, эрозионностойкое, с верхним слоем керамики

[1] Дополнительно функциализирован органическими и неорганическими молекулами.
[2] Смачивающая жидкость – вода, для сравнения угол смачивания воды с нержавеющей сталью 36°.
[3] Для сравнения коэффициент трения нержавеющей стали AISI 304 составляет 0,589.
[4] Для сравнения коэффициент износостойкости нержавеющей стали AISI 304 составляет $13{,}81 \cdot 10^{-13}$ $м^3 \cdot Н^{-1} \cdot м^{-1}$.
[5] Показатель pH среды эксплуатации.

2. Отличительные свойства инертного покрытия SilcoPateks от аналогов

Характеристика	Покрытие SilcoPateks	Покрытия DurSan®, SilcoNert®
Метод нанесения	Химическое осаждение из паровой фазы с плазменным ассистированием (PACVD)	Химическое осаждение из паровой фазы (CVD)
Температура деталей при нанесении покрытия, °C	≤200	400
Используемые в процессе нанесения материалы	Аргон, азот, кремнийсодержащие жидкости	Силан, этилен, кислород
Материал покрытия	Мультислойное покрытие из соединений кремния	Аморфный кремний с верхним функционализированным слоем (SilcoNert®), аморфный оксикарбид кремния (DurSan®)
Цвет покрытия	Радужный	Ярко-радужный
Толщина покрытия, мкм	До 2	0,1…0,5 (SilcoNert®)
Количество слоев	От 50 и выше	До 10 (DurSan®)
Коэффициент трения	0,1	0,36 (DurSan®)
Коэффициент износа, 10^{-13} м^3·Н$^{-1}$·м$^{-1}$	4,6	6,13 (DurSan®)

Определение стабильности концентрации серосодержащих компонентов в газовой смеси в пробоотборнике

В исследованиях газовая смесь известного состава перепускалась из исходного баллона Luxfer в баллоны-пробоотборники БП-ПД 01 объемом 1 л, изготовленные из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Один из баллонов был пассивирован инертным покрытием SilcoPateks. Анализ газовой смеси проводили через 4 и 19 дней от начала испытаний. Исходная концентрация компонентов газовой смеси и ее изменение со временем приведены в табл. 3 и на рис. 1, 2.

В исследованиях применялся хроматограф «Хроматэк-Кристалл 5000.2» (ЗАО СКБ «Хроматэк», Йошкар-Ола) с масс-спектрометрическим детектором.

3. Концентрация компонентов исследуемой газовой смеси

№	Компоненты газовой смеси	Концентрация/погрешность, ppm моль				
		Исходная	через 4 дня		через 19 дней	
			без покрытия	с покрытием	без покрытия	с покрытием
1	H_2S [сероводород]	0,071/0,018	0,038/0,011	0,073/0,022	<0,02/0,01	<0,02/0,01
2	COS [карбонилсульфид]	0,053/0,013	0,046/0,015	0,050/0,015	0,041/0,012	0,042/0,012
3	CH_3SH [метантиол]	0,057/0,014	0,046/0,016	0,052/0,016	0,010/0,003	0,010/0,003
4	C_2H_5SH [этантиол]	0,055/0,014	0,035/0,011	0,037/0,011	<0,01/0,01	<0,01/0,01
5	*i*-C_3H_7SH [2-пропантиол (изопропантиол)]	0,043/0,011	0,031/0,009	0,031/0,009	0,011/0,003	<0,01/0,01
6	tert-C_4H_9SH [2-метил-2-пропантиол (трет-бутантиол)]	0,035/0,009	0,024/0,010	0,034/0,010	<0,01/0,01	<0,01/0,01
7	C_3H_7SH [1-пропантиол]	0,033/0,009	0,026/0,010	0,040/0,012	<0,01/0,01	<0,01/0,01
8	sec-C_4H_9SH [2-бутантиол (втор-бутантиол)]	0,033/0,008	0,025/0,009	0,026/0,007	<0,01/0,01	<0,01/0,01
9	*i*-C_4H_9SH [2-метил-1-пропантиол (изобутантиол)]	0,032/0,008	0,021/0,007	–	<0,01/0,01	<0,01/0,01
10	C_4H_9SH [1-бутантиол]	0,029/0,007	0,012/0,005	0,015/0,005	<0,01/0,01	<0,01/0,01
11	CH_4 [метан]	Остальное				

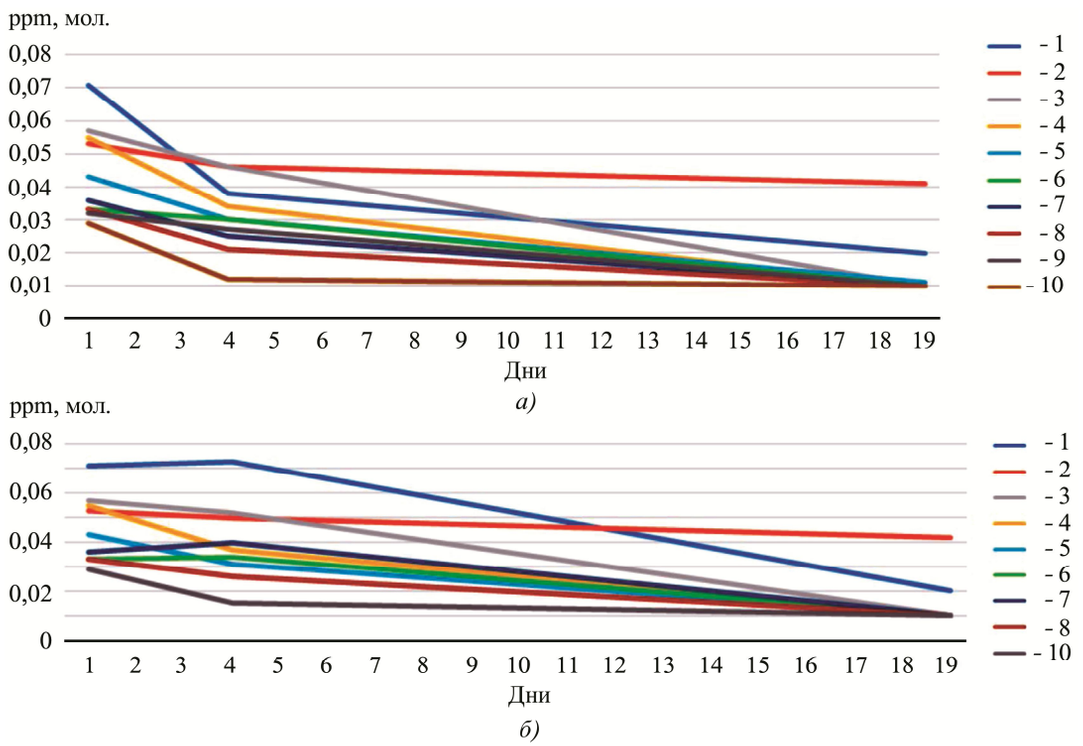


Рис. 1. Изменение концентрации веществ исходной газовой смеси в зависимости от времени нахождения в пробоотборнике без покрытия (*а*) и с покрытием SilcoPateks (*б*):
1 – 10 указаны в табл. 3

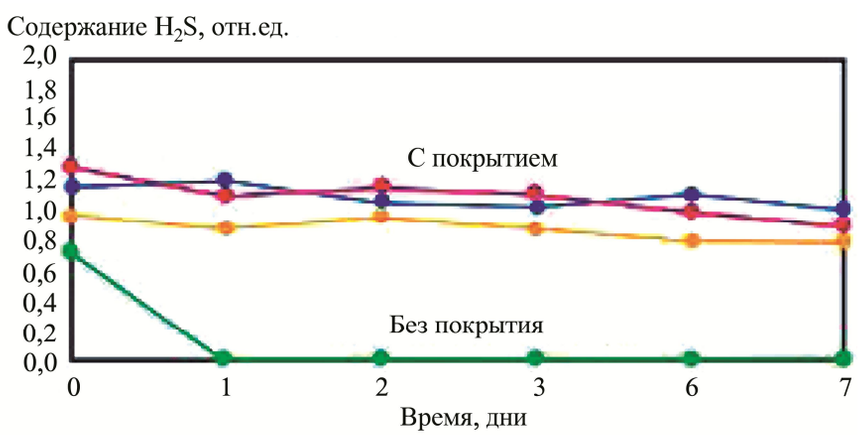
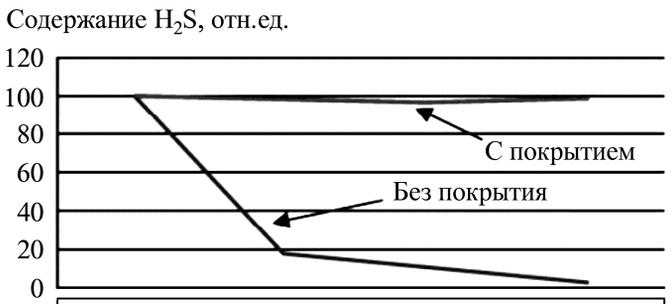


Рис. 2. Изменение содержания компонентов сероводородсодержащей газовой смеси со временем в пробоотборнике с покрытием SilcoNert® [12]

На основании данных исследований видно, что содержание сероводорода в баллоне с покрытием SilcoPateks за 7 дней падает на 10 % – с 0,071 до 0,063 ppm. Для сравнения при использовании покрытия SilcoNert® от компании SilcoTek это падение составляет 8 % (рис. 3, синяя кривая) [12]. Небольшое отличие падения содержания сероводорода связано с разной толщиной наносимых покрытий.

При использовании инертного покрытия DurSan®, нанесенного внутри пробоотборника, относительное содержание сероводорода в газовой смеси не изменяется через 75 ч.

В пробоотборнике без покрытия содержание сероводорода резко падает уже после 25 ч (см. рис. 3) [13]. Известно, что покрытие DurSan® эффективно противостоит многим химическим соединениям в условиях испытаний погружением по ASTM G31, проведенным с использованием различных кислот в течение 24 ч при комнатной температуре (табл. 4).



Содержание H_2S, отн.ед.	Продолжительность нахождения в пробоотборнике, ч			
	0:00	25	50	75
Нержавеющая сталь	100	19	10	4
Карбоксилан	100	98	96,6	98,3

Рис. 3. Относительное содержание сероводорода в газовой смеси со временем в пробоотборнике без покрытия и с покрытием DurSan® [13]

4. Сравнительные характеристики коррозионной стойкости нержавеющей стали AISI 316L SS с покрытием Dursan® [13]

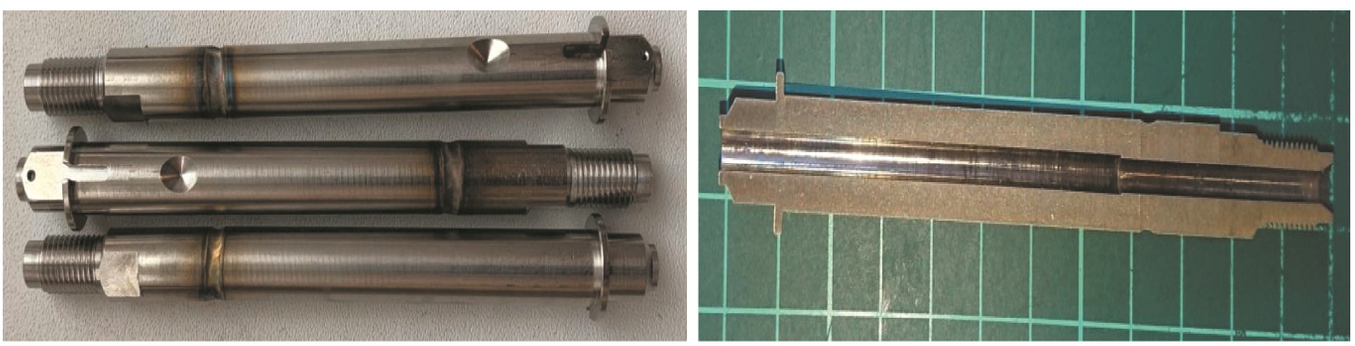
Скорость коррозии, mpy	6N HCl	6N HBr	25 % H_2SO_4	Концентрация HNO_3	85 % H_3P_4	5 % HF
Сталь AISI 316L SS	114	3,4	54,6	0,78	0,62	120
Dursan® на стали AISI 316L SS	2,7	0,8	5,4	0,1	0,08	80,4

В соответствии с проведенными исследованиями разработанного покрытия SilcoPateks (см. рис. 1), являющегося близким аналогом покрытия DurSan®, содержание сероводорода в газовой смеси также не изменяется в течение 75 ч.

Оценка хемосорбции серосодержащих соединений в инжекторе бесшприцевого ввода проб в разделительную колонку хроматографа

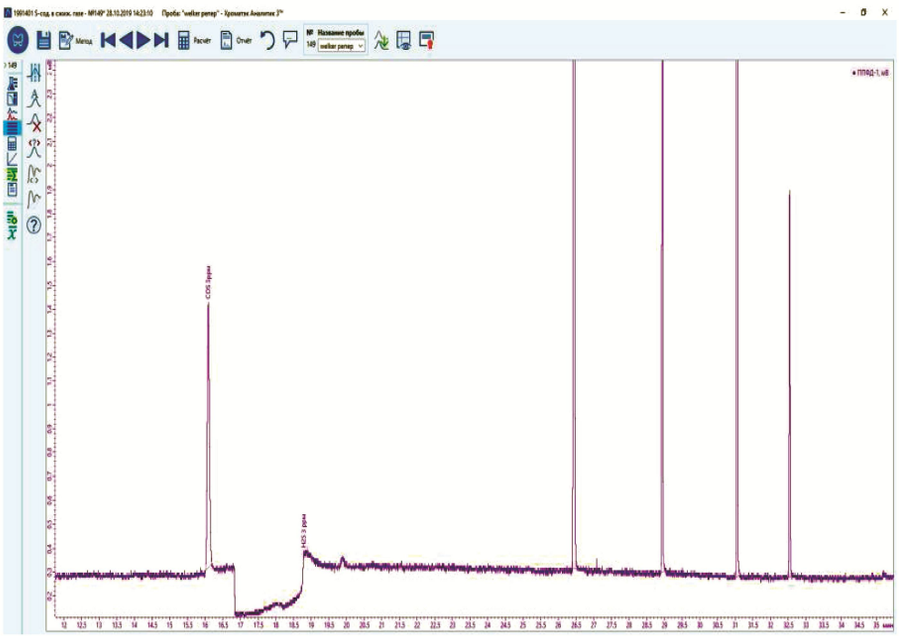
В качестве объекта исследований выбран инжектор бесшприцевого ввода – поршневой кран с подвижным цилиндрическим штоком и дозирующей кольцевой канавкой 0,25 мкл. Основным элементом инжектора, контактирующим с агрессивной пробой, является корпус, изготовленный из нержавеющей стали AISI 304 (рис. 4, *а*). Два корпуса были пассивированы инертным покрытием SilcoPateks. На одном из корпусов был сделан продольный разрез, который исследовали под микроскопом (рис. 4, *б*). Микроскопический анализ подтвердил равномерность нанесенного покрытия на всей внутренней поверхности.

Материал исследуемой пробы – нестабильный газовый конденсат, состоящий из жидких и газообразных углеводородов с концентрацией по приготовлению 3 ppm. При испытаниях использовали хроматограф «Хроматэк-Кристалл 5000» (ЗАО СКБ «Хроматэк», Йошкар-Ола), поршневой

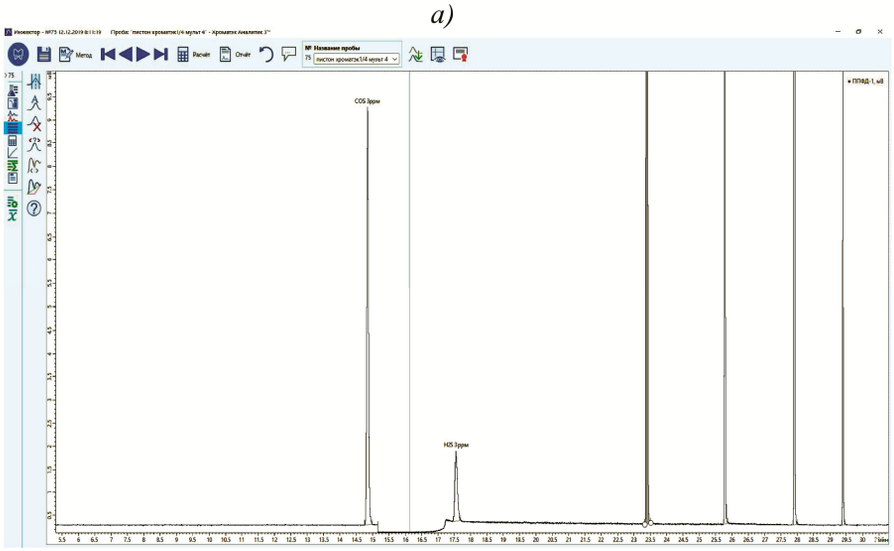


а) *б)*

Рис. 4. Общий вид корпусов инжектора бесшприцевого ввода проб (*а*) и продольный разрез корпуса с покрытием SilcoPateks (*б*)



а)



б)

Рис. 5. Хроматограммы испытаний пробы при использовании корпуса инжектора бесшприцевого ввода без покрытия (*а*) и с покрытием SilcoPateks (*б*)

пробоотборник ПП-1000, пульсирующий пламенно-фотометрический детектор, колонку капиллярную GS-GasPro 30 м 0,32 мм. Условия испытаний: температура инжектора бесшприцевого ввода 100 °С; температура колонки 60 °С 2 мин; программируемая скорость нагрева колонки 20 °С/мин до 200 °С; газ-носитель – гелий, марка А, с расходом 1,8 мл/мин; расход газа через инжектор 9 мл/мин.

Анализ хроматограммы, полученной при использовании корпуса инжектора бесшприцевого ввода без покрытия (рис. 5, *а*), показал, что высота пика COS (сероуглерод) недостаточна по сравнению с другими пиками – наличие размывания пика H_2S (сероводород), который имеет неправильную форму. Результат анализа может быть объяснен хемосорбцией активных веществ пробы на поверхностях из нержавеющей стали. При этом насыщения поверхности не происходит, вероятно, из-за низких концентраций соединений. При анализе хроматограммы, полученной при использовании корпуса инжектора бесшприцевого ввода с покрытием SilcoPateks (рис. 5, *б*), наблюдается существенное повышение пика COS, более четкое отображение пика H_2S (хотя имеет место небольшое его размывание, возможно, из-за конструктивных особенностей камеры).

Таким образом, после нанесения покрытия SilcoPateks высота пика COS существенно выросла, а пик H_2S стал более четким.

Дополнительно проведена оценка остаточных пиков (рис. 6) после ввода нестабильного газового конденсата с углеводородами С1 – С22 без метанола. Использовали хроматограф «Хроматэк-Кристалл 5000», инжектор бесшприцевого ввода с дозирующей кольцевой канавкой 0,25 мкл и корпусом с покрытием SilcoPateks, пламенно-ионизационный детектор и капиллярную колонку RTX-1 30 м 0,53 мм. Условия анализа: температура инжектора 350 °С; температура колонки 0 °С 4 мин; программируемая скорость нагрева колонки 15 °С/мин до 290 °С; газ-носитель – гелий, марка А, с расходом 60 мл/мин и расходом газа через инжектор 170 мл/мин.

Как показали результаты данного анализа, инертное покрытие SilcoPateks на корпусе инжектора не оказывает существенного влияния на изменение высоты остаточных пиков, что говорит как об отсутствии адсорбции (потере соединений), так и десорбции (увеличении количества соединений). Появление остаточных пиков (соотношение от 500:1 до 1000:1) в большей степени связано с загрязнениями, поступающими в колонку из газовых линий – регулятора расхода газов и трубок без инертного покрытия.

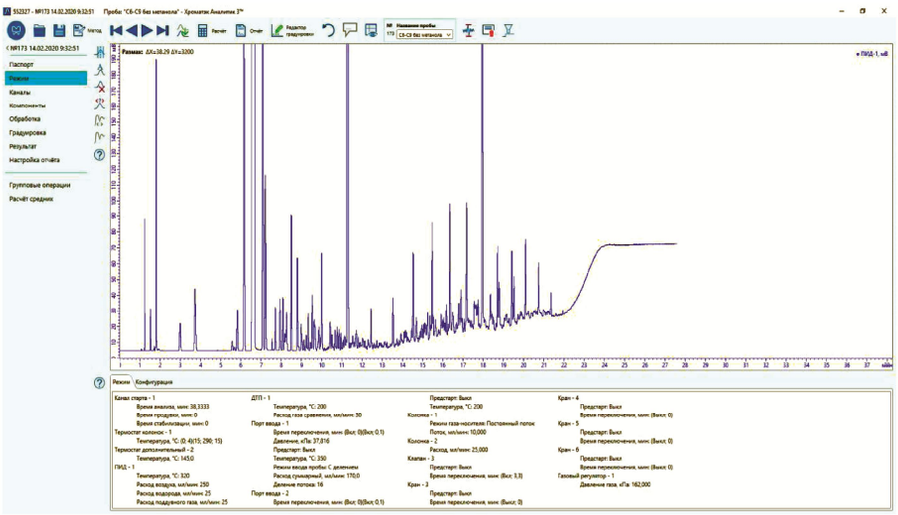


Рис. 6. Хроматограмма конденсата газового нестабильного при использовании корпуса инжектора бесшприцевого ввода с покрытием SilcoPateks

Анализ полученных хроматограмм конденсата газового нестабильного с низкой концентрацией веществ показал наличие узких и симметричных пиков, что характеризует высокое качество количественного анализа и показывает важность наличия инертного покрытия SilcoPateks.

Оценка стабильности определения серы в серосодержащей газовой пробе методом ультрафиолетовой флуоресценции

В исследованиях использовали анализатор элементный «СПЕКТРОСКАН МЕТА-S» (ООО «НПО «Спектрон», Санкт-Петербург), принцип работы которого основан на сжигании образца пробы с последующим определением содержания серы в продуктах сгорания методом ультрафиолетовой флуоресценции.

Инертное покрытие SilcoPateks наносили на устройство газопроводной системы модуля ввода газов, которое представляет собой свернутую в спираль трубку из нержавеющей стали AISI 304 с внешним диаметром 3,18 мм (1/8″) и толщиной стенки 0,02 мм (рис. 7).

Материалом пробы являлся стандартный образец содержания серы в изооктане – CONOSTAN S in Isooctane 10 ppm. В качестве дополнительных материалов использовали газ-окислитель – кислород высокой чистоты (99,999 %) и газ-носитель – аргон высокой чистоты (99,999 %).

Измерения содержания серы проводили через 30 мин после выхода анализатора на режим тремя сериями. В каждой серии для статистики образец пробы вводили 3 раза подряд. В условиях первой серии газообразные продукты сгорания поступали из блока печи в детектор серы непосредственно через канал подачи пробы, во второй серии – через спираль без покрытия, в третьей серии – через спираль с покрытием SilcoPateks. Результаты измерений содержания серы приведены в табл. 5 и на рис. 8.

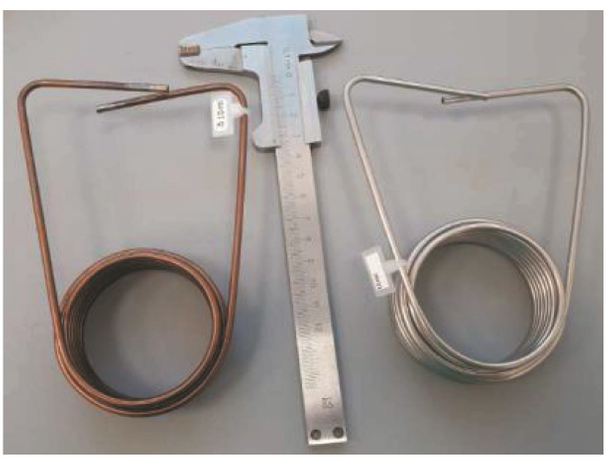


Рис. 7. Исследуемые спирали без покрытия (справа) и с покрытием SilcoPateks (слева)

5. Содержание серы в стандартном образце CONOSTAN S in Isooctane 10 ppm

Образец	№ опыта	Площадь пика, мВ·с	Содержание серы в опыте, ppm	Среднее содержание серы, ppm
Без спирали	1	3655	9,62	9,81
	2	3767	9,91	
	3	3764	9,91	
Спираль без покрытия	1	3397	8,94	8,86
	2	3285	8,64	
	3	3417	8,99	
Спираль с покрытием SilcoPateks	1	3693	9,72	9,67
	2	3670	9,66	
	3	3666	9,65	

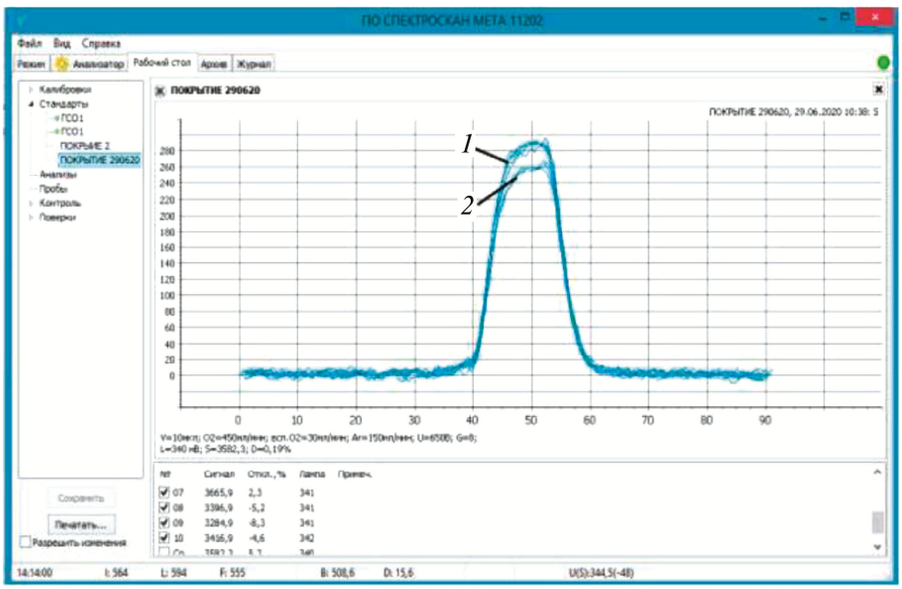


Рис. 8. Отклики детектора на серу при прохождении газообразной пробы через спираль с покрытием SilcoPateks (*1*) и без покрытия (*2*)

Анализ результатов показал, что при контакте серосодержащей газообразной пробы с поверхностью спирали из нержавеющей стали AISI 304 сера вступает во взаимодействие с поверхностью металла. Это привело к уменьшению измеренного содержания серы в пробе примерно на 9,7 %. При использовании спирали модуля ввода газов с инертным покрытием SilcoPateks уменьшение содержания серы в пробе практически не наблюдается. Таким образом, инертное покрытие SilcoPateks эффективно препятствует взаимодействию серы с нержавеющей сталью и способствует получению достоверного анализа.

На основании данного эксперимента можно заключить, что точность результата измерения, т.е. близость измеренного значения к истинному значению измеряемой величины по ГОСТ Р ИСО 5725-1–2002, за счет нанесения инертного покрытия повысилась практически на 10 %.

Выводы

1. Сравнительный анализ разработанного инертного покрытия SilcoPateks продемонстрировал близость свойств с аналогами – покрытиями SilcoNert® и DurSan®, используемыми компаниями Restek и SilcoTek для исключения адсорбции, десорбции и коррозии деталей аналитического оборудования.

2. При использовании покрытия SilcoPateks:

– доказана стабильность содержания активных соединений в пробе в течение 7 сут при определении концентрации серосодержащих веществ в газовой смеси в пробоотборнике, что обеспечивает практически 100%-ную повторяемость результатов анализа при испытаниях в течение 7 дней;

– выявлено отсутствие хемосорбции серосодержащих соединений в инжекторе бесшприцевого ввода проб в разделительную колонку хроматографа, что характеризует повышенную чувствительность и точность хроматографического анализа вплоть до уровня ppb частей на миллиард;

– доказана стабильность определения серы в серосодержащей газовой пробе методом ультрафиолетовой флуоресценции, что определяет максимальную достоверность анализа при минимальном (следовом) содержании активных компонентов в пробе.

Библиографический список

1. **Uhlig's** Corrosion Handbook 3rd ed. / Ed. by R. Winston Revie Wieley. 2011. 1285 p.

2. **Туфанов Д. Г.** Коррозионная стойкость нержавеющих сталей, сплавов и чистых металлов. М.: Металлургия, 1990. 320 с.

3. **Smith D., Yuan M., Bischof J. et al.** Amorphous silicon coatings for control of corrosion and metal ion contamination // Conference: 2017 28th Annual SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference (ASMC). 15 – 18 may 2017, Saratoga Springs, US, 2017. DOI: 10.1109/ASMC.2017.7969259

4. **Vaittinen O., Metsälä M., Show S. et al.** Adsorption of ammonia on treated stainless steel and polymer surfaces // Applied Physics B. 2013. V. 115, No. 2. DOI: 10.1007/s00340-013-5590-3

5. **Barone G., Higgins M., Smith D.** The Use of Coatings to Improve the Physical and Analytical Reliability of Process Monitors Used for Ammonia, Mercury and Hydrogen Sulfide Service. Presented as Paper 99 at the Gulf Coast Conference, Galveston Island, TX, October 17, 2012.

6. **Barone G., Higgins M.** Improving the Reliability of Analytical and Sampling Systems in Challenging and Corrosive Environments // ISA AD 2011. The 56th Annual Symposium of the Analysis Division, League City. TX 2011.

7. **Sulyok M., Harberhauer-Troyer C., Rosenberg E., Grasserbauer M.** Investigation of the Storage Stability of Selected Volatile Sulfur Compounds in Different Sampling Containers // J. of Chromatography A. 2001. V. 917, No. 1-2. P. 367 – 374.

8. **Restek** Performance Coating. URL: https://leco.com.au/files/restek_performance_coatings.pdf

9. **SilcoTek** Coatings. Helping to Solve You Most Demanding Surface Challenges. URL: http://silcotek.com

10. **Клевцов Г. В., Валиев Р. З., Клевцова Н. А. и др.** Коррозионная стойкость наноструктурированной стали 10 с алмазоподобным покрытием // Фундаментальные исследования. 2012. № 6. С. 441 – 443.

11. **Федосеев Е. В., Лагуткин М. Л., Рюмин Ю. А. и др.** Испытания на коррозионно-эрозионный износ лопастей турбинных мешалок в условиях воздействия пульпы экстракционной фосфорной кислоты // Ремонт, восстановление, модернизация. 2013. № 9. С. 23 – 27.

12. **Chemically Inert Coating Properties**. Improve Analytical and Process Sampling. URL: https://www.silcotek.com/coating-properties/chemically-inert-coatings

13. **Characterizing the Performance** of Surface Modifications that Enhance Sensitivity, Reliability, Reproducbility and Accuracy of Analytical Instruments. URL: https :// www . silcotek . com / hubfs / TI %2011-21-17%20 Enhancing %20 Reliability %20 and%20 Accuracy %20 of %20 Analytical %20 Instruments. pdf

Библиографический список

1. **Uhlig's** Corrosion Handbook 3rd ed. / Ed. by R. Winston Revie Wieley. 2011. 1285 p.

2. **Туфанов Д. Г.** Коррозионная стойкость нержавеющих сталей, сплавов и чистых металлов. М.: Металлургия, 1990. 320 с.

3. **Smith D., Yuan M., Bischof J. et al.** Amorphous silicon coatings for control of corrosion and metal ion contamination // Conference: 2017 28th Annual SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference (ASMC). 15 – 18 may 2017, Saratoga Springs, US, 2017. DOI: 10.1109/ASMC.2017.7969259

4. **Vaittinen O., Metsälä M., Show S. et al.** Adsorption of ammonia on treated stainless steel and polymer surfaces // Applied Physics B. 2013. V. 115, No. 2. DOI: 10.1007/s00340-013-5590-3

5. **Barone G., Higgins M., Smith D.** The Use of Coatings to Improve the Physical and Analytical Reliability of Process Monitors Used for Ammonia, Mercury and Hydrogen Sulfide Service. Presented as Paper 99 at the Gulf Coast Conference, Galveston Island, TX, October 17, 2012.

6. **Barone G., Higgins M.** Improving the Reliability of Analytical and Sampling Systems in Challenging and Corrosive Environments // ISA AD 2011. The 56th Annual Symposium of the Analysis Division, League City. TX 2011.

7. **Sulyok M., Harberhauer-Troyer C., Rosenberg E., Grasserbauer M.** Investigation of the Storage Stability of Selected Volatile Sulfur Compounds in Different Sampling Containers // J. of Chromatography A. 2001. V. 917, No. 1-2. P. 367 – 374.

8. **Restek** Performance Coating. URL: https://leco.com.au/files/restek_performance_coatings.pdf

9. **SilcoTek** Coatings. Helping to Solve You Most Demanding Surface Challenges. URL: http://silcotek.com

10. **Клевцов Г. В., Валиев Р. З., Клевцова Н. А. и др.** Коррозионная стойкость наноструктурированной стали 10 с алмазоподобным покрытием // Фундаментальные исследования. 2012. № 6. С. 441 – 443.

11. **Федосеев Е. В., Лагуткин М. Л., Рюмин Ю. А. и др.** Испытания на коррозионно-эрозионный износ лопастей турбинных мешалок в условиях воздействия пульпы экстракционной фосфорной кислоты // Ремонт, восстановление, модернизация. 2013. № 9. С. 23 – 27.

12. **Chemically Inert Coating Properties**. Improve Analytical and Process Sampling. URL: https://www.silcotek.com/coating-properties/chemically-inert-coatings

13. **Characterizing the Performance** of Surface Modifications that Enhance Sensitivity, Reliability, Reproducbility and Accuracy of Analytical Instruments. URL: https :// www . silcotek . com / hubfs / TI %2011-21-17%20 Enhancing %20 Reliability %20 and%20 Accuracy %20 of %20 Analytical %20 Instruments. pdf

Для цитирования статьи:

Тополянский П. А., Ермаков С. А., Тополянский А. П. Точность и достоверность измерений газоаналитических комплексов за счет нанесения инертного покрытия на элементы газового тракта // Контроль. Диагностика. 2021. Т. 24, № 5. С. 4 – 13.

Тополянский П. А., Ермаков С. А., Тополянский А. П. Точность и достоверность измерений газоаналитических комплексов за счет нанесения инертного покрытия на элементы газового тракта // Контроль. Диагностика. 2021. Т. 24, № 5. С. 4 – 13.