



Мониторинг состояния почвы, воздуха, воды

УДК 661.1

DOI: 10.25514/CHS.2021.2.20010

Аналитический контроль содержания ионов тяжелых металлов в сточных водах буровой платформы**Ж. В. Сурикова¹, Д. О. Сидоренко¹✉, А. С. Коваленко²**

¹Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина», Москва, Россия, e-mail: ormr66@yandex.ru

²АО Научно-производственная фирма «ДИЭМ», Москва, Россия

Поступила в редакцию: 10.09.2021 г.; после доработки: 12.10.2021 г.; принята в печать: 14.10.2021 г.

Аннотация – Загрязнение окружающей среды тяжелыми металлами в настоящее время является серьезной экологической проблемой. Один из источников образования соединений тяжелых металлов – предприятия нефтегазового комплекса, в том числе буровые платформы. На данный момент содержание ионов тяжелых металлов в сточных водах при морском бурении не контролируется, что может привести к загрязнению морских вод. В статье рассматривается проблема загрязнения акватории в результате деятельности буровой платформы, расположенной в Баренцевом море. На основе изучения схем водопотребления и водоотведения, в том числе закачке вод в пласт, был сделан вывод о необходимости контроля содержания соединений тяжелых металлов и определены точки отбора проб на разных стадиях водоочистки. Для выбора наиболее эффективного подхода к анализу была проведена сравнительная оценка методов, определяющих содержание ионов ТМ. В результате сопоставления характеристик был выбран метод инверсионной вольтамперометрии с использованием аппаратурно-программного комплекса «Экотест-ВА». По итогам исследования выявлены превышения концентраций кадмия, цинка и меди в сравнении с нормативами ПДК для морских вод. На основании этого были даны рекомендации по модернизации действующей технологической схемы водоочистки.

Ключевые слова: морское бурение, буровая платформа, мониторинг, содержание тяжелых металлов, водоочистка, закачка в пласт, инверсионная вольтамперометрия, аппаратурно-программный комплекс, пластовые воды, буровые сточные воды

Monitoring soil, air, water status

UDC 661.1

DOI: 10.25514/CHS.2021.2.20010

Analytical control of heavy metal ions content in drilling platform wastewater**Zhaneta V. Surikova¹, Dmitriy O. Sidorenko¹✉, and Anastasia S. Kovalenko²**

¹National University of Oil and Gas «Gubkin University», Moscow, Russia,
e-mail: ormr66@yandex.ru

²Scientific-Production Firm "DIEM". Moscow, Russia

Received: September 10, 2021; Revised: October 12, 2021; Accepted: October 14, 2021

Abstract – The pollution of the environment with heavy metals is currently a serious environmental problem. One of the sources of heavy metal compounds formation is oil and gas enterprises, including drilling platforms. At the moment, the content of heavy metal ions in wastewater from offshore drilling is not controlled, which can lead to pollution of sea waters. The article deals with the problem of pollution of the water area as a result of the operation of a drilling platform located in the Barents Sea. Based on the study of water consumption and water disposal schemes, including water injection into the reservoir, it was concluded that it was necessary to control the content of heavy metal compounds, and sampling points were determined at different stages of water treatment. To select the most effective approach to the analysis, a comparative assessment of methods determining the content of TM ions was carried out, as a result of comparing the characteristics, the method of inversion voltammetry using the hardware-software complex Ecotest-VA was chosen. According to the results of the study, excess concentrations of cadmium, zinc and copper were detected in comparison with the standards for seawaters. Based on this, recommendations were made for the modernization of the existing technological scheme of water treatment.

Keywords: offshore drilling, drilling platform, monitoring, heavy metal content, water treatment, injection into the reservoir, inversion voltammetry, hardware-software complex, reservoir waters, drilling wastewater

ВЕДЕНИЕ

Одной из групп суперэкоотоксикантов являются соединения тяжелых металлов. Исследование последствий накопленного экологического ущерба, причиненного тяжелыми металлами, а также антропогенным загрязнением природной среды, в настоящее время становится исключительно важным аспектом для поддержания здоровья и безопасности населения [1].

На предприятиях нефтегазового комплекса образование тяжелых металлов происходит при бурении, нефтепереработке, транспортировке и хранении нефти и нефтепродуктов [2]. В результате производственных процессов тяжелые металлы попадают в сточные воды. Поэтому вопрос обнаружения тяжелых металлов и установления их точной концентрации является достаточно актуальным. Особенно эта проблема касается морских буровых платформ, поскольку удаление таких загрязнителей из стоков непосредственно на платформе осуществлять довольно сложно.

На всех стадиях водоочистки и при закачке воды в пласт не исключены утечки и потери, так как при существующем уровне организации производства практически невозможно полностью обеспечить разобщение различных систем водоотведения. Объемы закачки воды в пласт ежегодно увеличиваются и в результате различных причин (проливы, аварии и т.д.) будет происходить попадание сточных вод в море; при значительных их количествах возможно негативное влияние на морскую фауну и флору, в первую очередь обусловленное наличием тяжелых металлов, так как ТМ аккумулируются живыми организмами и концентрируются в пищевых цепях.

Для решения этой проблемы необходимо проведение аналитического контроля содержания ионов тяжелых металлов в сточных водах буровой платформы для оценки эффективности стадий очистки пластовой, балластной и нефтесодержащей сточной воды.

Целью проведенной работы являлся выбор подходящего метода мониторинга тяжелых металлов, для этого необходимо решить ряд задач:

- выбор оптимального метода аналитического контроля ионов тяжелых металлов в производственных сточных водах непосредственно на буровой платформе;
- изучение специфики водопотребления и водоотведения объекта исследования;
- проведение анализа проб сточных вод буровой платформы на разных стадиях очистки;
- определение соответствия качества сбрасываемых вод установленным нормативам.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Объектом исследования являются пластовые и производственные воды буровой стационарной платформы, расположенной в районе Ямало-Ненецкого автономного округа.

Согласно технической документации для обеспечения технологических и бытовых нужд предприятия на буровой платформе используется морская и пресная вода.

Для места, где расположена платформа, характерен морской полярный климат, поскольку платформа размещается за Полярным кругом. Такой климат отличается суровыми погодными условиями: большую часть года составляет холодный период, средние годовые температуры ниже 0°C, повышенная влажность воздуха.

Деятельность буровой платформы включает в себя несколько этапов:

- осуществление производственных процессов бурения скважин и сбор пластовой продукции;
- разделение эмульсии нефти и воды, переработка пластовой нефти до товарной;
- хранение переработанной нефти и транспортировка ее на челночном танкере до мест реализации;
- закачка пластовой воды, отделенной от нефти обратно в пласт через нагнетательные скважины;
- использование попутного нефтяного газа на собственные нужды платформы для полного ее энергообеспечения и/или сжигание его избытков на газовом факеле (свече).

Практически на всех стадиях работы платформы образуются сточные воды различного состава:

1. Нефтесодержащие сточные воды – образуются в результате утечек и проливов нефтепродуктов в системах энергоблока, компрессорного оборудования, грузоподъемных механизмов, при ремонте и чистке

технологического оборудования; к данному виду стоков относятся также производственно-дождевые (промливневые) воды, а также балластная и забортная вода из емкостей хранения, загрязненная вода от обратной промывки фильтров, пластовая вода из уравнительного резервуара;

2. Буровые сточные воды, повторное использование которых в системе циркуляции уже невозможно, а также сточные воды, образующиеся при промывке буровой площадки, бурового оборудования и инструмента; к стокам этого вида иногда относят и остатки цементных растворов;
3. Пластовые воды;
4. Санитарные (хозяйственно-бытовые и хозфекальные) сточные воды – образуются в результате эксплуатации санитарно-гигиенических помещений, пищевого оборудования, моек камбузов и других помещений, в результате жизнедеятельности персонала;
5. Использованная морская вода – это условно чистая сточная вода из систем охлаждения компрессорного, насосного, технологического и вспомогательного оборудования и от опреснительных установок;
6. Стоки от пожаротушения.

Согласно традиционной схеме на буровой платформе, предусмотрено несколько систем водоотведения:

- система сбора, очистки и утилизации отходов бурения;
- система обработки пластовых вод;
- система очистки нефтесодержащих вод;
- система очистки хозяйственно-бытовых стоков.

Существующая проектная схема технологического комплекса предусматривает выделенную из флюида пластовую воду, вытесненную из танков-хранилищ балластную воду и сточные воды после специальной подготовки использовать для поддержания пластового давления. Система закачки воды в пласт по проекту должна функционировать непрерывно, обеспечивая полную закачку в поглощающие скважины балансового количества воды, полученного при подготовке товарной нефти, накоплении и хранении ее товарной партии; а также поддерживать пластовое давление за счет заданных объемов воды.

Закачка воды в пласт на буровой проводится согласно ГОСТ Р 53241-2008 [3]. Основные требования к закачиваемым в продуктивный коллектор пластовым водам включают следующее:

- допустимое содержание нефти и механических примесей устанавливается в зависимости от проницаемости и относительной трещиноватости коллектора;
- значение рН пластовой воды должно находиться в пределах от 4,5 до 8,5;
- при закачке воды в поровые коллекторы проницаемостью свыше 0,1 мкм 90% частиц механических примесей должно быть не крупнее 5 мкм, а при закачке воды в поровые коллекторы проницаемостью до 0,1 мкм – не крупнее 1 мкм;

- содержание растворенного кислорода в пластовой воде не должно превышать $0,5 \text{ мг/дм}^3$;
- в воде, нагнетаемой в продуктивные коллекторы, в пластовых водах которых не содержится сероводород или содержатся ионы железа, сероводород должен отсутствовать;
- при коррозионной активности воды свыше $0,1 \text{ мм/год}$ необходимо предусматривать мероприятия по антикоррозийной защите трубопроводов и оборудования;
- проверка токсических свойств отводимых пластовых вод, при этом ЛК₅₀ (за 96 ч) при биологическом тестировании по аттестованным методикам должна быть не ниже 10 мл/дм^3 [3].

Схема водоочистки и водоподготовки, реализуемая на буровой платформе, включает в себя стадии очистки, которые обеспечивают соответствие практически всем пунктам, изложенным в ГОСТ 53241-2008.

Для выполнения требований ГОСТ по проверке токсических свойств отводимых вод необходимо, чтобы содержание ионов тяжелых металлов находилось в пределах ПДК. В противном случае летальная концентрация не будет соответствовать нормативам.

Помимо этого, при закачке воды в пласт через нагнетательную скважину возможны случаи частичного попадания нагнетаемой воды в морские воды.

Схема водопотребления, водоотведения и очистки сточных вод представлена на рисунке 1.

Пластовый флюид из скважины подвергается сепарации, в результате отделяются попутный газ, нефть и пластовая вода, которая идет на очистку в гидроциклоны, а затем в уравнильный резервуар. Производственная и забортная воды после нагревания поступают на первичную и далее на вторичную сепарации, куда также подается подтоварная и балластная воды. После второго сепаратора, вода поступает в уравнильный резервуар. После смешения стоки поступают во флотатор, затем в фильтр тонкой очистки и деаэратор. По окончании очистки вода закачивается в пласт.

Схема водоочистки на буровой платформе ориентирована в основном на удаление из сточных вод нефти, нефтепродуктов и механических примесей.

Для анализа были отобраны пробы: с нагнетания насосов от вторичного сепаратора, проба на входе во флотатор и на выходе из него; проба после фильтра тонкой очистки и деаэрата.

Нормирование вредных веществ в морских водах устанавливается в соответствии с Приказом № 552 от 13.12.2016 г. Министерства сельского хозяйства РФ [4]. В приказе предъявляются жесткие требования к нормированию ПДК тяжелых металлов в морских водах. Поэтому необходимо контролировать присутствие ионов тяжелых металлов в водах, подлежащих закачке в пласт.

Для того чтобы выбрать наиболее подходящий метод аналитического контроля ионов ТМ непосредственно на буровой платформе, было проведено

сравнение различных методик. Основными критериями для выбора метода являлись:

- продолжительность анализа и безопасность его проведения;
- возможность определения нескольких элементов одновременно;
- габаритные размеры приборов и оборудования;
- возможность автоматизации и компьютеризации
- высокая надежность приборов и оборудования при постоянной вибрации на платформе;
- простота ремонта и возможность замены оборудования;
- невысокая стоимость оборудования.

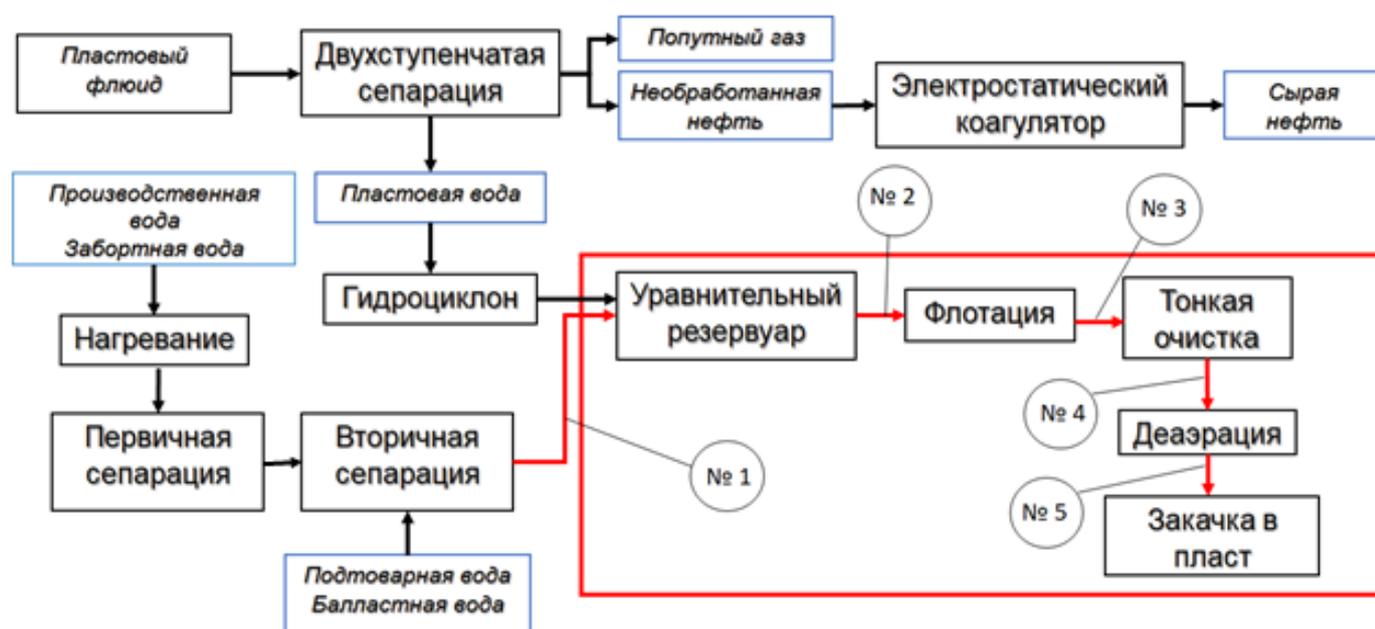


Рис. 1. Схема водопотребления, водоотведения и очистки сточных вод буровой платформы (№1–5 – точки отбора проб системы водоочистки).

Fig. 1. Scheme of water consumption, drainage and wastewater treatment of the drilling platform (No. 1–5 – sampling points of the water treatment system).

Перечисленным критериям отвечает метод инверсионной вольтамперометрии. Приборы, в основе работы которых лежит вольтамперометрический анализ имеют высокую чувствительность, что позволяет обнаруживать ионы металлов даже при низких концентрациях [5].

Отсутствует необходимость вручную производить расчеты и строить градуировочные графики, поскольку приборы оснащены автоматическими режимами выполнения измерений и расчета концентраций; анализаторы очень компактны и мобильны, что позволяет их использовать как в лаборатории, так и в полевых условиях. Кроме того, работа приборов осуществляется без инертного газа и использования вытяжных устройств, в отличие от метода атомно-абсорбционной спектроскопии. И наконец, оптимальная стоимость оборудования такого класса [6].

Эксперимент проводился на анализаторе «Экотест-ВА». Для измерений используется трехэлектродная электрохимическая ячейка, в которую входят

рабочий, вспомогательный электроды и электрод сравнения. Программное обеспечение комплекса позволяет выводить на экран вольтамперограммы, строить градуировочные графики и рассчитывать концентрации металла в анализируемой пробе.

Для анализа на «Экотест-ВА» были выбраны методики для определения Zn, Cd, Pb, Bi и Cu в природной, морской и очищенной сточной воде. Методика для определения меди и висмута отличается началом развертки потенциала, продолжительностью очистки электрода и накопления на нем иона металла [7].

Для проведения аналитического контроля вод буровой платформы были отобраны пробы сточной воды, образующейся на буровой площадке, на нескольких стадиях до и после очистки (рис. 1, табл. 1).

Таблица 1. Местоположение точек отбора проб

Table 1. Location of sampling points

Номер точки отбора пробы	Наименование точки отбора пробы
1	нагнетание насоса балластной, забортной и производственной сточных вод
2	вход на установку флотации
3	выход с установки флотации
4	выход после фильтров тонкой очистки
5	выход из деаэратора

Пробы воды на выходе из гидроциклона анализу не подвергались, поскольку в пробах содержатся остатки нефти. Для корректной работы электродов прибора «Экотест-ВА» присутствие в анализируемой пробе остатков нефтепродуктов нежелательно.

Для вольтамперометрического определения ионов тяжелых металлов необходимо исключить влияние органических соединений на ход анализа. Поэтому предварительно пробы пропустили через гидрофобный фильтр. Производитель прибора «Экотест-ВА» рекомендует проводить разбавление проб, или проведение минерализации до влажных солей (упаривание со слабым нагревом) или фотохимическую обработку в фотолизной камере ФК-12М (облучение).

Перед началом анализа было проведено разбавление проб дистиллированной водой в соотношении 1:1, чтобы снизить концентрацию органических соединений, которые могут присутствовать в пробе.

Параметры вольтамперометрического определения приведены в таблице 2, а вольтамперограммы, полученные в ходе анализа (на примере пробы №2, отобранной на входе во флотатор) – на рисунке 2.

Таблица 2. Параметры электрохимического измерения

Table 2. Parameters of electrochemical measurement

Наименование параметра	Единицы измерения	Величина параметра				
		Zn	Cd	Pb	Cu	Bi
Схема соединения		Трехэлектродная				
Скорость развертки потенциала	мВ/с	50				
Начало развертки потенциала	мВ	-1300			-950	
Конец развертки потенциала	мВ	200				
Потенциал очистки электрода	мВ	100				
Продолжительность очистки электрода:						
- для фонового электролита	сек	30			30	
- для анализируемой пробы		90			60	
- для стандартных добавок		60			60	
Диапазон измерения тока	мкА	2/200				
Продолжительность накопления иона металла:						
- для фонового электролита	сек	30			30	
- для анализируемой пробы		90			60	
- для стандартных добавок		60			60	
Параметры для расчета концентраций						
Объем электрохимической ячейки	мл	25			25	
Объем анализируемой пробы:	мл					
– фоновый электролит		5			5	
– анализируемая проба	20			20		
Объем добавки 1	мл	0,03			0,03	
Объем добавки 2	мл	0,03			0,03	

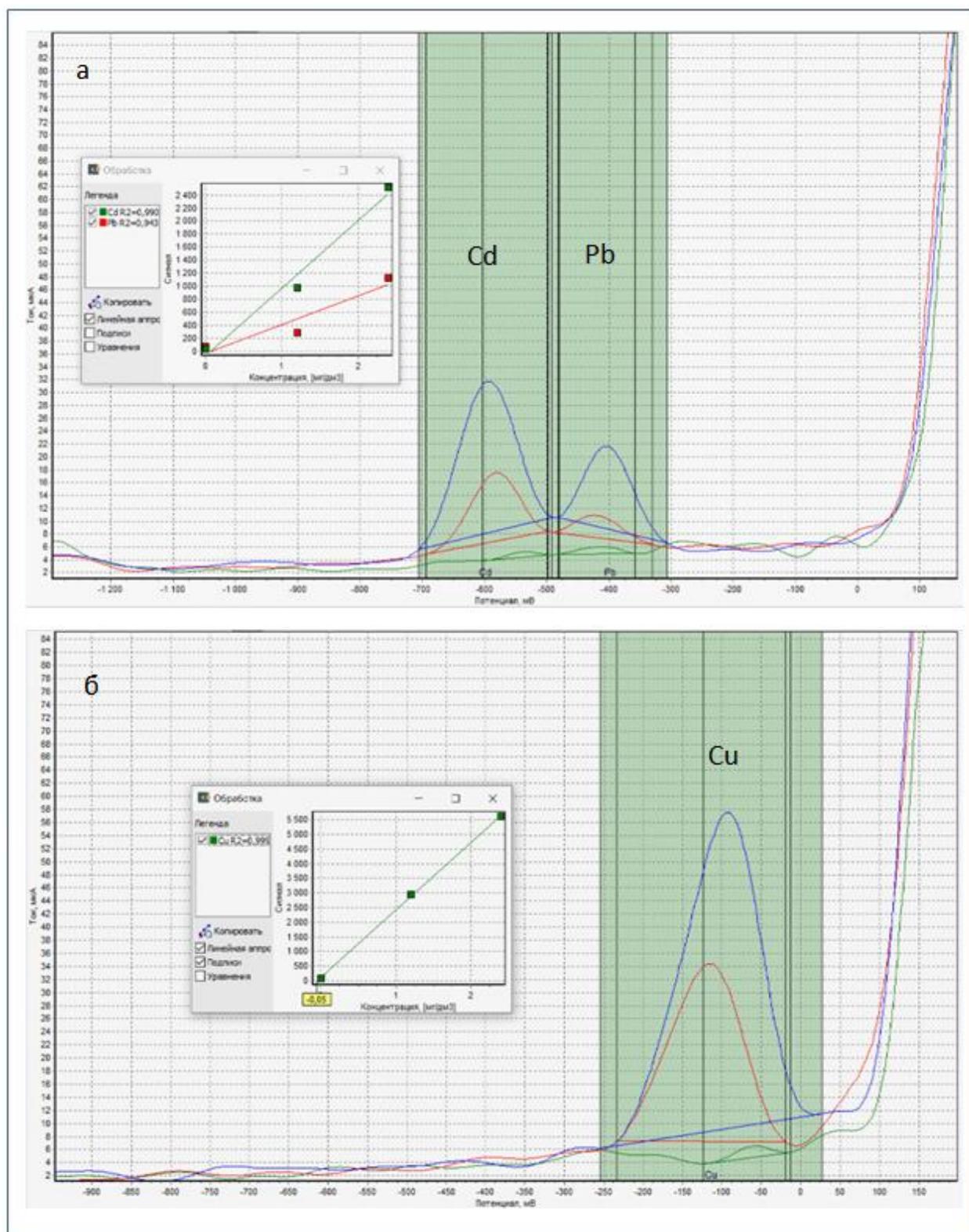


Рис. 2. Вольтамперные кривые определения содержания ионов тяжелых металлов: а – вольтамперограмма измерения Zn, Cd, Pb; б – вольтамперограмма измерения Cu, Bi.

Fig. 2. Voltage curves for determining the content of heavy metal ions: a – voltammogram for measuring Zn, Cd, Pb; b – voltammogram for measuring Cu, Bi.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам измерений и обработки полученных экспериментальных данных, было проведено сравнение концентраций ионов тяжелых металлов с

установленными нормативами ПДК в морских водах по приказу № 552 [4]. Полученные данные приведены в таблице 3.

Таблица 3. Показатели качества вод буровой платформы на разных стадиях водоочистки
Table 3. Water quality indicators of the drilling platform at different stages of water treatment

№ пробы	Результаты измерений, мг/дм ³			ПДК для морских вод, мг/дм ³			Кратность превышения ПДК		
	Cd	Pb	Cu	Cd	Pb	Cu	Cd	Pb	Cu
1	0,1383	0,0669	0,0334	0,01	0,01	0,005	13,8	6,69	6,68
2	0,2360	0,1052	0,0504				23,6	10,5	10,08
3	0,1381	0,0610	0,0290				13,81	6,1	5,8
4	0,1062	0,0469	0,0196				10,62	4,69	3,92
5	0,1061	0,0467	0,0192				10,61	4,67	3,84

В стоках, прошедших всю систему очистки на буровой, обнаружено превышение ПДК по свинцу в 4,67 раза, по кадмию в 10,61 раза, и по меди в 3,84 раза.

Ионов цинка и висмута в водах не обнаружено. При использовании приведенных методик необходимо учитывать, что на поверхности электрода могут образовываться интерметаллические соединения, поскольку медь эффективно взаимодействует с цинком и уже при соотношении цинк : медь 2:1 могут образовываться интерметаллиды состава: CuZn, CuZn₂ и CuZn₃, для которых стандартные потенциалы отличаются от стандартных потенциалов цинка. Чтобы удалить медь из проб нужно пропустить пробу через сорбирующий патрон «Диапак-ИДК». Либо в ходе измерений добавить соль галлия, с ней медь будет образовывать более устойчивые комплексы, чем с цинком. Удаление меди проводилось при помощи нитрата галлия и затем пробы анализировались повторно. Пики цинка также не были обнаружены [7,8].

Для того чтобы достичь норм ПДК по содержанию тяжелых металлов в водах, подлежащих закачке в пласт, необходимо провести модернизацию очистных сооружений. На рисунке 3 представлена технологическая схема водоочистки сточных вод буровой платформы. В верхней половине схемы – действующая система очистки (выделено красным), в нижней части – представлены рекомендации по модернизации действующей схемы (выделено зеленым).

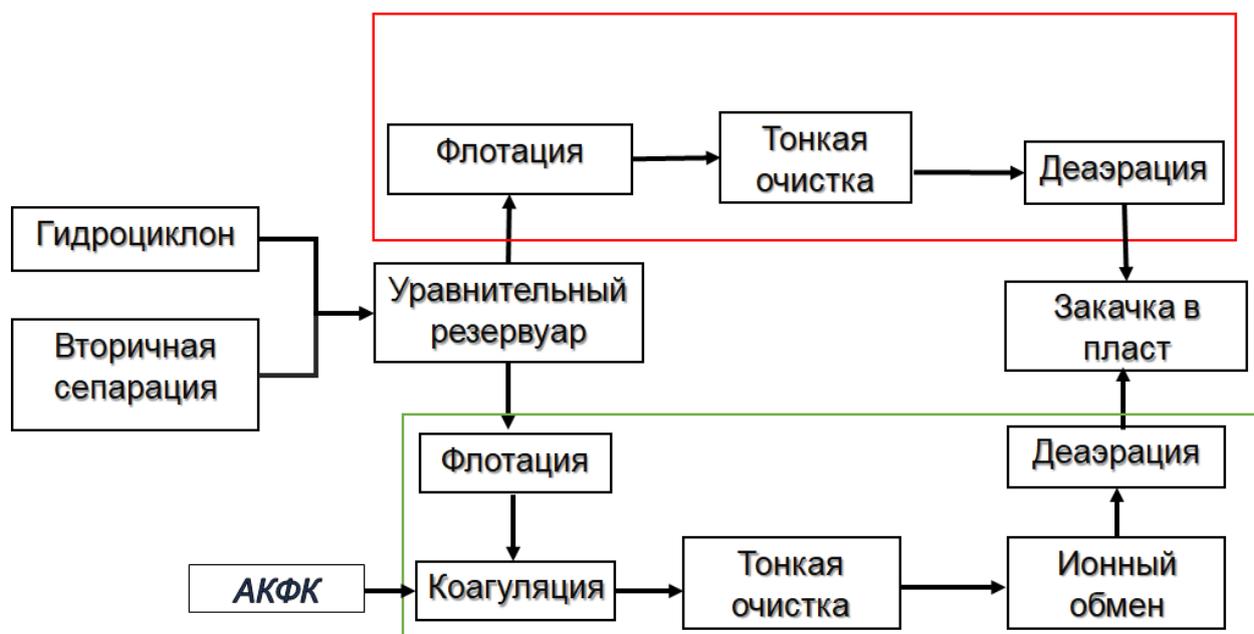


Рис. 3. Технологическая схема водоочистки сточных вод буровой платформы.

Fig. 3. Technological scheme of wastewater treatment of the drilling platform.

Предлагается после флотации стоков добавить блок коагуляции с применением смеси алюмокремниевого коагулянт-флокулянта АКФК и силоска. Применение такого реагента поможет удалять тяжелые металлы и остатки нефтепродуктов, поскольку АКФК и силоск выполняют одновременно функции коагулянта, флокулянта, осадителя и адсорбента [9]. Второе предложение по модификации очистных сооружений – добавление в систему очистки установки ионного обмена, которая в последовательной схеме должна располагаться следом за фильтром тонкой очистки. С применением процесса ионного обмена будет достигнута более глубокая степень водоочистки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Рассмотрена специфика работы буровой платформы, а именно организация процессов водопотребления и водоотведения;
- Проведена сравнительная характеристика методов анализа, определяющих содержание ионов ТМ в пробах сточных вод буровой платформы, в результате анализа был выбран метод инверсионной вольтамперометрии;
- Проведен контроль содержания ионов ТМ с использованием программного комплекса анализатора «Экотест-ВА»;
- По результатам анализа в стоках, прошедших всю систему очистки на предприятии, обнаружено превышение ПДК по свинцу в 5 раз, по кадмию в 11 раз, по меди в 4 раза;
- Предложены способы модернизации очистных сооружений, направленные на снижение концентрации ионов тяжелых металлов в стоках для закачки в пласт.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTERESTS:

The authors declare no conflict of interests.

Список литературы:

1. Давыдова С.Л., Тагасов В.И. (2002). *Тяжелые металлы как супертоксиканты XXI века*. М.: РУДН.
2. Дитц Л.Ю., Дудина Т.Н., Цускман Е.И., Катункина Е.В. (2020). Геоэкологические проблемы территорий нефтедобычи. *Успехи современного естествознания*. 3. 72–77. <https://doi.org/10.17513/use.37348>
3. ГОСТ Р 53241-2008. Геологоразведка морская. Требования к охране морской среды при разведке и освоении нефтегазовых месторождений континентального шельфа, территориального моря и прибрежной зоны. М.: Стандартинформ, 2009.
4. Приказ Минсельхоза России от 13.12.2016 N 552. Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения.
5. Петров С. И., Сурикова Ж.В., Другов С.Ю. (2001). *Электрохимические методы в экологическом мониторинге*. М: РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина.
6. Универсальный вольтамперометрический анализатор «Экотест-ВА». Эконикс – Эксперт. <http://www.ecosolution.ru/catalog/page014.php>
7. Массовая концентрация меди, свинца, кадмия, цинка, висмута, марганца, никеля и кобальта в почвах, грунтах, донных отложениях и осадках сточных вод. Измерение методом инверсионной вольтамперометрии на вольтамперометрическом анализаторе «Экотест-ВА». М.: ООО «Эконикс-Эксперт». 2004.
8. Шеремет А.А., Ермаков С.С., Москвин Л.Н. (2008). Влияние образования интерметаллических соединений в системах Cu-Cd и Cu-Zn на аналитические сигналы этих элементов при их инверсионно-вольтамперометрическом определении на ртутно-графитовом пленочном электроде. *Научное приборостроение*, 18(1). 82–87. https://www.elibrary.ru/download/elibrary_9614191_42922952.pdf
9. Кудрявцев П.Г., Кудрявцев Н.П., Фиговский О.Л. (2017). Очистка промышленных и сточных вод с использованием матрично-изолированных наноконпозиционных флокулянтов-коагулянтов. *Нанотехнологии в строительстве*, 9(3), 44–61. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2017-9-3-44-61>

References:

1. Davydova, S.L., Tagasov, V.I. (2002). *Heavy metals as supertoxicants of the XXI century*. М.: RUDN (in Russ.).
2. Dietz, L.Yu., Dudina, T.N., Tsuskman, E.I., Katunkina, E.V. (2020). Geoecological problems of oil production territories. *The successes of modern natural scien.*, 3. 72–77 (in Russ.). <https://doi.org/10.17513/use.37348>
3. GOST R 53241-2008. Geological exploration offshore. Requirements for the protection of the marine environment in the exploration and development of oil and gas fields on the continental shelf, territorial sea and coastal zone. М.: Standartinform, 2009 (in Russ.).
4. Order of the Ministry of Agriculture of Russia of 13.12.2016 N 552. On approval of water quality standards for fishery water bodies, including standards for maximum permissible concentrations of harmful substances in the waters of fishery water bodies (in Russ.).
5. Petrov, S. I., Surikova, Zh.V., Drugov, S.Yu. (2001). *Electrochemical methods in environmental monitoring*. Moscow: Gubkin University (in Russ.).
6. The universal polarograph “Ecotest-VA”. Econix–Expert Ltd (in Russ.). <http://www.ecosolution.ru/catalog/page014.php>

7. Mass concentration of copper, lead, cadmium, zinc, bismuth, manganese, nickel and cobalt in soils, grounds, bottom sediments and sewage sludge. Measurement by stripping voltammetry on a voltammetric analyzer "Ecotest-VA". М.: ООО "Econix-Expert". 2004 (in Russ.).
8. Sheremet, A.A., Ermakov, S.S., Moskvina, L.N. (2008). The influence of intermetallic compounds formation in copper-cadmium and copper-zinc systems on analytical signals of these elements under their stripping voltammetry determination on the mercury film glassy carbon electrode. *Scientific instrumentation*. 18(1), 82–87 (in Russ.).
https://www.elibrary.ru/download/elibrary_9614191_42922952.pdf
9. Kudryavtsev, P.G., Kudryavtsev, N.P., Figovskiy, O.L. (2017). Purification of industrial and waste water using matrix-isolated nanocomposite flocculant-coagulants. *Nanotechnology in construction*, 9(3), 44–61. (in Russ.) <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2017-9-3-44-61>