

ИНГИБИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СОЛЕОТЛОЖЕНИЯ ЗАМЕЩЕННЫМИ 1,3-ДИОКСАЦИКЛОАЛКАНАМИ

Ю.Г. Борисова, Д.С. Султанова, В.Н. Гусаков, Г.З. Раскильдина,
Р.М. Султанова, С.С. Злотский

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», ул. Космонавтов, 1, Уфа,
Россия, 450064
E-mail: nocturne@mail.ru

Образование отложений минеральных солей на поверхностях оборудования представляет серьезную проблему в теплоэнергетике, при обессоливании морской воды и сточных вод, при работе испарительных установок и др., а также усложняет процесс добычи и транспортировки нефти, затрудняя эксплуатацию скважины и трубопроводов.

Конденсацией полиолов (этиленгликоля, 1,2-пропандиола, 1,4-бутендиола, и глицерина) с карбонильными соединениями (формальдегидом, метилэтилкетон, метилизобутилкетон, циклогексаном) в присутствии кислотных катализаторов синтезированы функционально-замещенные пяти-, шести- и семиуглеродные 1,3-диоксацикланы.

Полученные соединения были протестированы в качестве ингибиторов солеотложения (ИСО) в имитате пластовой воды хлоридно-кальциевого типа, что характерно для пластовых вод подавляющего большинства месторождений в Западно-Сибирском регионе, где их концентрация изменялась от 0 до 475 мг/л.

Установлено, что наиболее эффективными ИСО оказались 1,3-диоксаны, содержащие в 5-м положении полярную гидроксильную или карбонильную группы: 1-(5-метил-1,3-диоксан-5-ил)этан-1-он и 1-(5-изопропил-1,3-диоксан-5-ил)этан-1-ол. При использовании этих соединений в качестве ИСО степень защиты составила 75% и 33% соответственно. Было обнаружено, что гетероциклический амин, содержащий 1,3-диоксолановый фрагмент, напротив, ускоряет солеотложение (88%) и способствует выпадению в осадок солей Ca^{2+} из модельного раствора пластовой воды.

Ключевые слова: 1,3-диоксациклоалканы, ингибиторы солеотложения

INHIBITION OF SCALING PROCESSES BY SUBSTITUTED 1,3-DIOXACYCLOALKANES

Yu.G. Borisova, D.S. Sultanova, V.N. Gusakov, G.Z. Raskildina, R.M. Sultanova, S.S. Zlotsky

Ufa State Petroleum Technological University (USPTU), Kosmonavtov st 1, Ufa, Russia, 450064
E-mail: nocturne@mail.ru

The formation of deposits of mineral salts on the surfaces of equipment is a serious problem in thermal power engineering, during desalination of sea water and wastewater, during the operation of evaporation plants, etc., and also complicates the process of oil production and transportation, complicating the operation of wells and pipelines.

By condensation of polyols (ethylene glycol, 1,2-propanediol, 1,4-butanediol, and glycerol) with carbonyl compounds (formaldehyde, methyl ethyl ketone, methyl isobutyl ketone, cyclohexanone) in the presence of acid catalysts, functionally substituted five-, six-, and seven-unit 1,3-dioxacyclanes.

The resulting compounds were tested as scale inhibitors (IS) in simulated formation water of the calcium chloride type, which is typical for formation water in the vast majority of fields in the West Siberian region, where their concentration varied from 0 to 475 mg/L.

It was found that the most effective IS were 1,3-dioxanes containing polar hydroxyl or carbonyl groups in the 5th position: 1-(5-methyl-1,3-dioxan-5-yl)ethan-1-one and 1-(5-isopropyl-1,3-

dioxan-5-yl)ethan-1-ol. When these compounds were used as IS, the degree of protection was 75% and 33%, respectively. It was found that a heterocyclic amine containing a 1,3-dioxolane fragment, on the contrary, accelerates scale deposition (88%) and promotes the precipitation of Ca^{2+} salts from a model solution of formation water.

Keywords: 1,3-dioxacycloalkanes, scale inhibitors

Для цитирования:

Борисова Ю.Г., Султанова Д.С., Гусаков В.Н., Раскильдина Г.З., Султанова Р.М., Злотский С.С. Ингибирование процессов солеотложения замещенными 1,3-диоксациклоалканами. *Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва)*. 2024. Т. LXVIII. № 3. С. 68–74. DOI: 10.6060/rcj.2024683.11.

For citation:

Borisova Yu.G., Sultanova D.S., Gusakov V.N., Raskildina G.Z., Sultanova R.M., Zlotsky S.S. Inhibition of scaling processes by substituted 1,3-dioxacycloalkanes. *Ros. Khim. Zh.* 2024. V. 68. N 3. P. 68–74. DOI: 10.6060/rcj.2024683.11.

ВВЕДЕНИЕ

Образование отложений минеральных солей на поверхностях оборудования представляет серьезную инженерную проблему во многих отраслях промышленности (в теплоэнергетике, при обессоливании морской воды и сточных вод методом обратного осмоса, при работе испарительных установок и др.) [1–3]. Кроме того, солеобразование усложняет процесс добычи и транспортировки нефти, что является одной из основных проблем, осложняющих эксплуатации скважины и трубопроводов [4, 5]. В результате этого снижается эффективность извлечения нефти, увеличивается износ оборудования и др. Солеотложения способствуют образованию локальной коррозии металла, что является причиной не менее 20 % инцидентов в нефтегазовой отрасли [6, 7].

Наиболее эффективно бороться с солеобразованием в нефтедобыче позволяют два метода: удаление образовавшихся отложений и предотвращение их формирования. Исходя из экономической эффективности, в зависимости от условий и особенностей эксплуатации объекта могут использоваться разные подходы предотвращения солеобразования [8–10].

Во многих случаях, в качестве основных компонентов промышленных ингибиторов выпадения осадка применяются комплексоны – производные фосфоновых кислот и их цинковые соли – нитрилотриметиленфосфоновая (НТФ) и оксиэтилендифосфоновая (ОЭДФ) кислоты, полиалкиленполиаминополиоксиметиленфосфоновая кислота (ПАФ-13), 2-окси-1,3-диаминопропан-N,N,N'-тетраметилфосфоновая кислота (ДПФ-1) или водорастворимые полимеры – полиакриламид (ПАА), гидролизированный полиакрилонитрил, сополимер малеинового ангидрида с N-алкил-N-виниламидами или N-виниллактамами и др. [4, 9]. При этом

с вышеуказанными реагентами в композициях используют добавки: этаноламины [11], эфиры полиакриловой кислоты, полифосфаты и бензотриазол, карбоксиметилцеллюлоза (КМЦ) [12] и др.

В настоящей работе с целью расширения ассортимента действующих веществ ингибиторов солеотложения (ИСО) и создания многокомпонентных смесей различных ИСО с синергетическим ингибирующим эффектом исследовано влияние новых производных 1,3-диоксациклоанов, полученных их доступного нефтехимического сырья [13–15] на процесс солеотложения в имитате пластовой воды.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Анализ реакционных масс и запись масс-спектров соединений осуществляли на аппаратно-программном комплексе «Хроматэк-Кристалл 5000М» (ЗАО СКБ «Хроматэк», Россия) с установленной базой NIST MS Search 2020 (National Institute of Standards and Technology, США). Условия анализа: капиллярная кварцевая колонка длиной 30 м, длительность анализа – 20 мин, температура источника ионов – 260 °С, температура переходной линии – 300 °С, диапазон сканирования – 30–300 Да, давление – 37–43 мТорр, газ-носитель – гелий, скорость нагрева – 20 град/мин). Для получения масс-спектров соединений использовали метод ионизации электронным ударом. Спектры ядерного магнитного резонанса ^1H и ^{13}C (ЯМР) регистрировали на спектрометре «Bruker AM-500» (Bruker Corporation, США) с рабочими частотами 500 и 125 МГц, соответственно; растворитель – CDCl_3 . Химические сдвиги приведены по шкале δ (м.д.) относительно тетраметилсилана как внутреннего стандарта. Константы спин-спинового взаимодействия (J) приведены в Гц.

Масс-спектры сверхвысокого разрешения получали на приборе «Bruker MAXIS IMPACT

QTOF», метод APCI – химическая ионизация при атмосферном давлении.

4-[(Окси)метил]-2,2-диметил-1,3-диоксолан (1a). Смесь 0,5 моль глицерина, 5 моль ацетона и 0,22 г *n*-толуолсульфоновой кислоты перемешивали при комнатной температуре в течение 18 ч. Далее добавляли безводный K_2CO_3 и продолжали перемешивать в течение 1 ч. Затем смесь фильтровали, концентрировали, остаток перегоняли при пониженном давлении [16].

Выход 95%, бесцветная жидкость, $T_{кип.}$ 72 °C (5 мм рт. ст.). Спектр 1H ЯМР ($CDCl_3$, δ , м.д., $J/Гц$): 1.32 с (3H, CH_3), 1.40 с (3H, CH_3), 2.13 уш. с (1H, -OH), 3.55 д.д (1H, CH_a , J 10.6, J 4.0), 3.66 д.д (1H, CH_b , J 11.6, J 4.3), 3.73 т (1H, C^5H_a , J 6.7, J 14.5), 4.11 т (1H, CH_b , 2J 6.9, 3J 14.6), 4.17–4.23 м (1H, CH). Спектр ЯМР ^{13}C ($CDCl_3$, δ , м.д.): 25.17 (CH_3), 26.58 (CH_3), 62.91 (CH_2), 65.70 (CH_2), 76.18 (CH), 109.31 (C). Масс-спектр m/z ($I_{отн.}$, %): 131 (нет), 117 (45), 101 (22), 85 (2), 72 (12), 57 (20), 43 (100), 41 (15), 30 (10).

2-Метил-1,4-диоксаспиро[4.5]декан (1b). Смесь 0,5 моль диола, 0,5 моль циклогексанола, 80 мл бензола и 0,1 г серной кислоты перемешивали при температуре 80 °C в течение 8 ч до полного выделения воды (использование насадки Дина-Старка). Далее смесь охлаждали до комнатной температуры, отмывали водой, отбирали органический слой, который осушали хлоридом кальция. Затем смесь фильтровали, концентрировали, остаток перегоняли при пониженном давлении. Бесцветная жидкость. $T_{кип.}$ 198 °C. Физико-химические константы соответствуют литературным данным [17].

Бутил[2-(1,3-диоксолан-2-ил)этил]бутан-1-амин (1c). Смесь 0,03 моль бутиламина, 15 мл ДМСО, 0,01 моль 2-(β -бромэтил)-1,3-диоксолана перемешивали в течение необходимого времени при температуре 70 – 75 °C. По завершении реакции (контроль по ГЖХ) всю реакционную массу промывали 20%-ым раствором NaOH, экстрагировали эфиром. Верхний органический слой промывали водой до нейтральной среды, сушили безводным карбонатом калия. Растворитель упаривали на ротаторном испарителе, остаток перегоняли при пониженном давлении в атмосфере азота. Бесцветная жидкость с резким запахом. $T_{кип.}$ 85–86 °C (4 мм рт. ст.). Физико-химические константы соответствуют литературным данным. [18].

5,5-Диметил-1,3-диоксан (2a). Смесь 0,5 моль 2,2-диметилпропан-1,3-диола, 0,5 моль параформа, 80 мл бензола и 0,22 г *n*-толуолсульфоновой кислоты перемешивали при температуре 80 °C в течение 5 ч до полного выделения воды (исполь-

зование насадки Дина-Старка). Далее смесь охлаждали до комнатной температуры, отмывали водой, отбирали органический слой, который осушали хлоридом кальция. Затем смесь фильтровали, концентрировали, остаток перегоняли при пониженном давлении.

Выход 90%, бесцветные кристаллы, $T_{плав.}$ 51 °C. Физико-химические константы соответствуют литературным данным [19].

5-Ацил-1,3-диоксанов (общая методика). Смесь 0,1 моль диэтилкетона или метилизобутилкетона, 0,2 моль параформа, 80 мл бензола и 0,1 г серной кислоты перемешивали при температуре 80 °C в течение 5–7 ч до полного выделения воды (использование насадки Дина-Старка). Далее смесь охлаждали до комнатной температуры, отмывали водой, отбирали органический слой, который осушали хлоридом кальция. Затем смесь фильтровали, концентрировали, остаток перегоняли при пониженном давлении.

1-(5-Этил-1,3-диоксан-5-ил)этанон (2b). $T_{кип.}$ 110–112 °C (3 мм рт. ст.). Бесцветная жидкость. Масс-спектр, m/z ($I_{отн.}$, %): 158 (1) $[M^+]$, 128 (10), 99 (5), 83 (30), 71 (7), 67 (10), 57 (20), 43 (100). Спектральные характеристики соответствуют литературным данным [18].

1-(5-Изопропил-1,3-диоксан-5-ил)этанон (2c). $T_{кип.}$ 129–131 °C (3 мм рт. ст.). Бесцветная жидкость. Масс-спектр, m/z ($I_{отн.}$, %): 173 (2) $[M^+]$, 121 (50), 110 (20), 99 (30), 86 (70), 83 (80), 71 (20), 57 (40), 43 (100). Спектральные характеристики соответствуют литературным данным [18].

Гидрирования 5-ацил-1,3-диоксанов (общая методика). В проточный реактор объемом 15 см³ загружали катализатор Pd/C. Активацию катализатора проводили в токе азота или водорода при 350–450 °C. Далее при охлаждении реактора до 200 °C со скоростью 0,27 мл/мин подавали 15 мл кетона и водород со скоростью 0,230 мл/мин. Давление устанавливали на уровне 8 атм. Полученный катализат отфильтровывали и упаривали.

1-(5-Этил-1,3-диоксан-5-ил)этанол (2e). $T_{кип.}$ 122–123 °C (3 мм рт. ст.). Бесцветная жидкость. Масс-спектр, m/z ($I_{отн.}$, %): 160 (≤ 1) $[M^+]$, 98 (10), 86 (60), 72 (100), 57 (95), 43 (90). Спектральные характеристики соответствуют литературным данным [20].

1-(5-Изопропил-1,3-диоксан-5-ил)этанол (2d). $T_{кип.}$ 131–132 °C (2 мм рт. ст.). Бесцветная жидкость. Масс-спектр, m/z ($I_{отн.}$, %): 175 (2) $[M^+]$, 72 (60), 57 (50), 45 (30), 43 (70), 39 (20), 32 (100).

Спектральные характеристики соответствуют литературным данным [18].

4,7-Дигидро-1,3-диоксепин (3a). Смесь 0,5 моль 1,4-бутендиола, 0,5 моль параформа, 80 мл бензола и 0.1 г серной кислоты кислоты перемешивали при температуре 80 °С в течение 6 ч до полного выделения воды (использование насадки Дина-Старка). Далее смесь охлаждали до комнатной температуры, отмывали водой, отбирали органический слой, который осушали хлоридом кальция. Затем смесь фильтровали, концентрировали, остаток перегоняли при пониженном давлении. Бесцветная жидкость. $T_{\text{кип.}}$ 123 °С. Физико-химические константы соответствуют литературным данным [21].

8,8-Дихлор-3,5-диоксабицикло[5.1.0]октан (3b). Смесь 0,01 моль 4,7-дигидро-1,3-диоксепина, 30 мл хлороформа, 32 г. 50% р-ра гидроксида натрия и 1 масс.% ТЭБАХ перемешивали в условиях МВИ при заданной температуре (контроль за ходом реакции по данным ГЖХ). По окончании реакции реакционную смесь охлаждали до комнатной температуры, отмывали водой, экстрагировали хлороформом, осушали хлоридом кальция и упаривали. Целевые соединения выделяли вакуумной перегонкой. Бесцветная жидкость. $T_{\text{кип.}}$ 78-79 °С (5 мм рт. ст.). Физико-химические константы соответствуют литературным данным [22].

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕЙСТВИЯ ИСО

Эффективность ИС определяют при концентрациях 5, 10, 20, 30, 40 и 50 мг/дм³, что соответствует 0,1; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 и 1,0 см³ раствора ИС. В колбы емкостью 250 см³ пипеткой Мора вносят 50 мл раствора А (содержит кальция хлорида 3046 мг/дм³ и магния хлорида шестиводного 3177 мг/дм³), добавляют раствор ИС, затем приливают 50 см³ раствора Б (содержит натрия хлорида 18084 мг/дм³ и натрия гидрокарбоната 1344 мг/дм³). Колбы закрывают полимерной пленкой и термостатируют при температуре 80 °С в течение 4 ч. Затем пробы охлаждают и фильтруют через фильтр «синяя лента». Для определения содержания ионов кальция в конические колбы отбирают пипеткой Мора 10 см³ фильтрата объем фильтрата (в зависимости от содержания ионов кальция в пробе может быть скорректирован), добавляют 40 см³ дистиллированной воды, 2,5 см³ 20%-ного раствора натрия гидроксида и 10-15 мг смеси мурексида и натрия хлорида. Содержание ионов кальция рассчитывается по формуле:

$$\mathcal{E} = \frac{C_x - C_0}{\frac{1}{2}C_{\text{исх}} - C_0} \cdot 100, \quad (1)$$

где C_x – количество трилона Б, используемого для титрования ионов Ca^{2+} в фильтрате, содержащем ингибитор, см³;

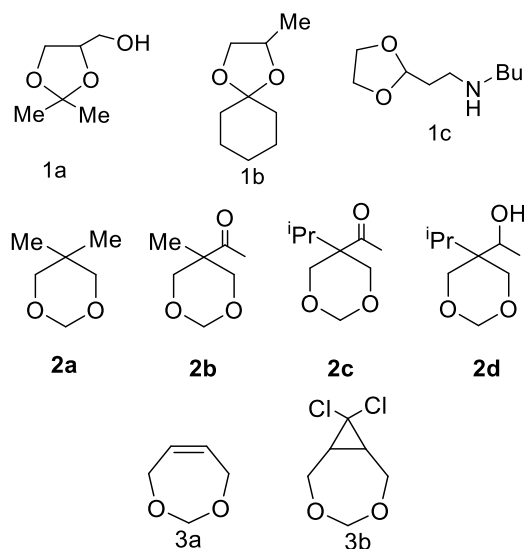
C_0 – количество трилона Б, используемого для титрования ионов Ca^{2+} в фильтрате, не содержащем ингибитор, см³;

$C_{\text{исх}}$ – количество трилона Б, используемого для титрования ионов Ca^{2+} в растворе Б модельной воды, см³.

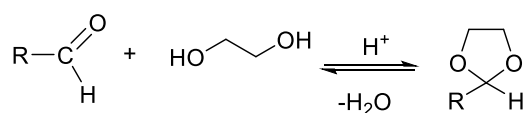
На основе полученных данных были построен график зависимости эффективности действия ИСО от концентрации (рис. 1).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В качестве ИСО в имитате пластовой воды нами испытаны замещенные пяти- шести- и семизвенные 1,3-диоксацикланы: производные 1,3-диоксолана (**1a-c**), 1,3-диоксана (**2a-d**), и 1,3-диоксепана (**3a,b**). Как было показано ранее некоторые соединения класса ацеталей и их гетероаналогов, полученные на основе нефтехимического сырья, проявляют высокую антикоррозионную активность [23].

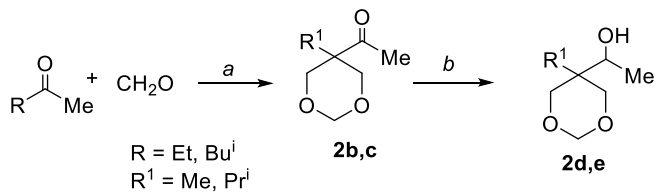


Соединения **1a,b,2a,3a** получали с количественными выходами конденсацией соответствующих карбонильных соединений с полиолами в присутствии кислотного катализатора КУ-2 по общей схеме.



Гетероциклы **2b,c** получали конденсацией *изо*-BuCOMe и EtCOMe с параформом в присут-

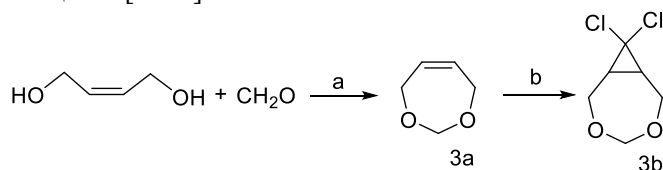
ствии серной кислоты (C_6H_6 , 80°C). Каталитическое гидрирование полученных ацилдиоксанов **2b,c** на металлосодержащих катализаторах (Pt/Re, Pd/C, Ni/кизельгур или Ni/Mo) приводило с выходом 85 и 90% к получению вторичных спиртов, содержащих 1,3-диоксаовый фрагмент **2d,e** соответственно.



Условия и реагенты: а) бензол, 80°C , H_2SO_4 , 5 – 7 ч;
 б) H_2 , Pd/C, 8 атм, 200°C

Диоксипин **3a** получен взаимодействием 1,4-бутендиола и пароформа при кипячении в бензоле в течении 6 ч в присутствии серной кислоты. Далее дихлоркарбенированием по методу Макоши

с выходом 98% был получен 8,8-дихлор-3,5-диокса-абицикло[5.1.0]октан **3b**.



Условия и реагенты: а) бензол, 80°C , H_2SO_4 , 6 ч; б) CHCl_3 , 50% NaOH, ТЭБАХ, $30-55^\circ\text{C}$, 5 ч

Полученные соединения **1a-c**, **2a-d**, **3a,b** были протестированы в качестве ингибиторов солеотложения (ИСО) в имитате пластовой воды, где их концентрация изменялась от 0 до 475 мг/л. Испытания проводились на имитате пластовой воды хлоридно-кальциевого типа, что характерно для пластовых вод подавляющего большинства месторождений в Западно-Сибирском регионе.

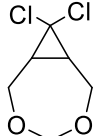
Из полученных данных (таблица) следует, что замещенные 1,3-диоксациклоалканы в имитате пластовой воды проявляют ингибирующий эффект солеотложения в различной степени.

Таблица

Ингибирование солеотложения замещенными 1,3-диоксациклоалканами в имитате пластовой воды

№	Соединение	Содержание Ca^{2+} , ppm		Степень защиты, %
		Без ингибитора	С ингибитором	
1	2	3	4	5
1	 1a	501	454	22
2	 1b	501	454	11
3	 1c	501	387	-88
4	 2a	524	442	2
5	 2b	508	427	75
6	 2c	Не растворяется		-
7	 2d	501	461	33

Продолжение таблицы

1	2	3	4	5
8	 3a	501	447	0
9	 3b	501	450	0

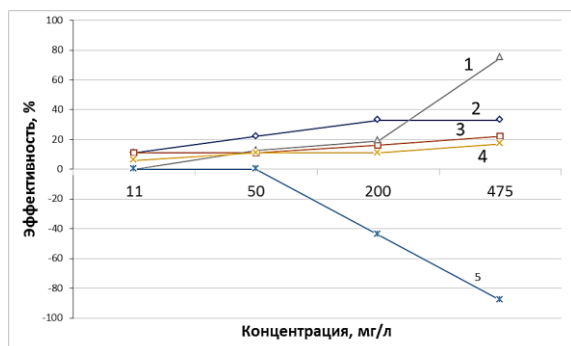


Рис. Зависимость эффективности солеотложения полученных соединений от концентрации:

1 – 1-(5-метил-1,3-диоксан-5-ил)этан-1-он (**2b**); 2 – 1-(5-изопропил-1,3-диоксан-5-ил)этан-1-ол (**2d**); 3 – золькеталь (**1a**); 4 – 2-метил-1,4-диоксоспиро[4.5]декан (**1b**); 5 – *N*-(2-(1,3-диоксолан-2-ил)этил)бутиламин (**1c**)

Эффективность ингибирования солеотложения исследуемых реагентов различается, но прямо пропорционально зависит от концентрации. Так, наиболее эффективными оказались 1,3-диоксаны **2b** и **2d**, содержащие в 5-ом положении полярную гидроксильную или карбонильную группы (рисунок). При использовании этих соединений в качестве ИСО степень защиты составила 75% и 33% соответственно. Степень защиты при исполь-

зовании 1,3-диоксоланового спирта **1a** не превышала 22%. Соединения **1a-b**, **2b,d** начинают проявлять активность при малых и средних концентрациях (11–50 ppm). Не ингибировали процесс солеотложения 1,3-диоксацикланы **2a,3a,b**, содержащие алкильные группы или гем-дигалопропановый фрагмент. В то же время было обнаружено, что гетероциклический амин **1c**, ускоряет солеотложение (88%) и способствует выпадению в осадок солей Ca^{2+} из модельного раствора пластовой воды.

Таким образом, установлено, что введение в молекулу 1,3-диоксацикланов спиртовой или карбонильной группы обуславливает способность ингибировать отложение кальциевых солей в имитате пластовой воды, в то время как аминогруппа ускоряет процессы солеотложения.

«Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России в сфере научной деятельности, номер для публикаций FEUR — 2022-0007 «Нефтехимические реагенты, масла и материалы для теплоэнергетики».

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Matin A., Rahman F., Shafi H. Z., Zubair S. M.* Desalination. 2019. V. 455. P. 135–157. DOI: 10.1016/j.desal.2018.12.009.
2. *Kang W., Wang T., Zhang H., Hou X., Zhang X., Zhu T., Chen C., Yang H. J.* Pet. Sci. Eng. 2020. V. 191. P. 107168. DOI: 10.1016/j.petrol.2020.107168.
3. Балабан-Ирменин Ю.В., Рудакова Г.Я., Маркович Л.М. Применение антинакипинов в энергетике низких параметров. М.: Новости теплоснабжения, 2011.
4. *Kamal M.S., Hussein I., Mahmoud M., Sultan A.S., Saad M.A.S.* Oil-field scale formation and chemical removal: A review. *J. Pet. Sci. Eng.* 2018. 171. P. 127–139. DOI: 10.1016/j.petrol.2018.07.037.
5. *Kuletsan A., Marchuk N.* Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва). 2022. Т. 66(1). С. 71–75. DOI: 10.6060/rcj.2022661.10.

REFERENCES

1. *Matin A., Rahman F., Shafi H. Z., Zubair S. M.* Desalination. 2019. V. 455. P. 135–157. DOI: 10.1016/j.desal.2018.12.009.
2. *Kang W., Wang T., Zhang H., Hou X., Zhang X., Zhu T., Chen C., Yang H. J.* Pet. Sci. Eng. 2020. V. 191. P. 107168. DOI: 10.1016/j.petrol.2020.107168.
3. Balaban-Irmenin YU.V., Rudakova G.YA., Markovich L.M. *Primenenie antinakupinov v energetike nizkih parametrov.* M.: Novosti teplosnabzheniya, 2011(in Rus.).
4. *Kamal M.S., Hussein I., Mahmoud M., Sultan A.S., Saad M.A.S.* Oil-field scale formation and chemical removal: A review. *J. Pet. Sci. Eng.* 2018. 171. P. 127–139. DOI: 10.1016/j.petrol.2018.07.037.
5. *Kuletsan A.L., Marchuk N.A.* Ros. Khim. Zh. 2022. V. LXVI. N 1. P. 71–75. DOI: 10.6060/rcj.2022661.10.
6. *Hajdarova G.R., Tyusenkov A.S., Bugaj D.E., Raskil'dina G.Z., Islamutdinova A.A., Sidorov G.M.* Izv. Vyssh. Uchebn.

6. Хайдарова Г.Р., Тюсенков А.С., Бугай Д.Е., Раскильдина Г.З., Исламудинова А.А., Сидоров Г.М. Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2018. Т. 61. № 7. С. 130–136. DOI: 10.6060/ivkkt.20186107.5710.
7. Sliem M.H., Fayyad E.M., Abdullah A.M., Younan N.A., Al-Qahtani N., Nabhan F.F., Ramesh A., Laycock N., Ryan M.P., Maqbool M., Arora D. J. Pet. Sci. Eng. 2021. V. 204. Article No. 108752. DOI: 10.1016/j.petrol.2021.108752.
8. Гусаков В. Н., Катермин А. В., Палагута А. А., Михайлова Л. Р., Еникеев Р.М. Нефтяное хозяйство. 2021. № 9. С. 96–99.
9. Тептерева Г.А., Пахомов С.И., Четвертнева И.А., Каримов Э.Х., Егоров М.П., Мовсумзаде Э.М., Евстигнеев Э.И., Васильев А.В., Севастьянова М.В., Волошин А.И., Нифантьев Н.Э., Носов В.В., Докичев В.А., Бабаев Э.Р., Розовина С.З., Берлин А.А., Фахреева А.В., Баулин О.А., Колчина Г.Ю., Воронцов М.С., Староверов Д.В., Козловский И.А., Козловский Р.А., Тарасова Н.П., Занин А.А., Кривобородов Е.Г., Каримов О.Х., Флид В.Р., Логинова М.Е. Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2021. Т. 64. Вып. 9. С. 4–121.
10. Пучина Г. Р., Рагулин В. В., Телин А. Г., Алимбекова С. Р., Бахтизин Р. Н., Волошин А. И., Докичев В. А. Нефтегазовое дело. 2020. Т. 18. № 2. С. 72–80. DOI: 10.17122/ngdelo-2020-2-72-80.
11. Каипберенова Г.Р., Халикова С.Д., Кадиров Х.И. Universum: Технические науки : электрон. научн. журн. 2020. № 2(71). URL: <http://7universum.com/ru/tech/archive/item/8883>.
12. Rajendran S., Joany R.M. et al. Bull. Electrochemistry. 2002. V. 18. N 1. P. 25–28.
13. Мусин А.И., Борисова Ю.Г., Раскильдина Г.З., Спирихин Л.В., Султанова Р.М., Злотский С.С. Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2023. Т. 66. № 9. С. 20–27.
14. Султанова Р.М., Борисова Ю.Г., Хуснутдинова Н.С., Раскильдина Г.З., Злотский С.С. Изв. АН Сер. хим. 2023. Т. 72. № 10. С. 2297–2318. DOI: 10.1007/s11172-023-4027-3.
15. Борисова Ю.Г., Мусин А.И., Раскильдина Г.З., Спирихин Л.В., Злотский С.С., Кузнецов В.В. Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва). 2024. Т. LXVIII. № 2. С. 67–75. DOI: 10.6060/R CJ.2024682.9.
16. Clarkson J.S., Walker A.J., Wood M.A. Continuous Reactor Technology for Ketal Formation: An Improved Synthesis of Solketal. Org. Proc.Res. Devel. 2001. V. 5. N 6. P. 630–635. DOI: 10.1021/op000135p.
17. Csunderlik C., Chiril T., Bacaloglu R. Org. Magn. Reson. 1983. V. 18. N 3. P. 153–156. DOI: 10.1002/mrc.1270180308.
18. Мусин А.И., Султанова Д.С., Борисова Ю.Г., Мудрик Т.П., Даминев Р.Р. Тонкие хим. технологии. 2023. Т. 18. № 1. С. 21–28.
19. Eliel E.L., Knoeber S.M. J. Am. Chem. Soc. 1968. V. 90. N 13. P. 3444–3458. DOI: 10.1021/ja01015a029.
20. Мусин А.И., Борисова Ю.Г., Раскильдина Г.З., Даминев Р.Р., Давлетишин А.Р., Злотский С.С. Тонкие хим. технологии. 2022. Т. 17. № 3. С. 201–209. DOI: 10.32362/2410-6593-2022-17-3-201-209.
21. Baryshnikov R.N., Vafina R.M., Fedorenko V.Y., Shtyrilin Y.G., Klimovitskii E.N. Russ. J. Org. Chem. 2003. V. 39. N 7. P. 1029–1033. DOI: 10.1023/b:rujo.0000003198.646.
22. Mohammed H. Kailania, Amal G. Al-Bakrib, Haitham Saadeha, Yusuf M. Al-Hiari. Jordan J. Chem. 2012. V. 7. N 3. P. 239.
23. Габитов А. И., Бугай Д. Е., Рольник Л. З., Кузнецов Л. К. Баш. хим. журнал. 2009. Т. 16. № 2. С. 190–192.
- Zaved. Khim. Khim. Tekhnol. 2018. V. 61. N 7. P. 130–136 (in Rus.). DOI: 10.6060/ivkkt.20186107.5710.
7. Sliem M.H., Fayyad E.M., Abdullah A.M., Younan N.A., Al-Qahtani N., Nabhan F.F., Ramesh A., Laycock N., Ryan M.P., Maqbool M., Arora D. J. Pet. Sci. Eng. 2021. V. 204. Article N 108752. DOI: 10.1016/j.petrol.2021.108752.
8. Gusakov V. N., Katermin A. V., Palaguta A. A., Mihajlova L. R., Enikeev R.M. Neftyanoe hozyajstvo. 2021. N 9. P. 96–99 (in Rus.).
9. Tepтерева G.A., Pakhomov S.I., Chetvertneva I.A., Karimov E.H., Egorov M.P., Movsumzade E.M., Evstigneev E.I., Vasiliev A.V., Sevastyanova M.V., Voloshin A.I., Nifantsev N.E., Nosov V.V., Dokichev V.A., Babaev E.R., Rogovina S.Z., Berlin A.A., Fakhreeva A.V., Baulin O.A., Kolchina G.Yu., Voronov M.S., Staroverov D.V., Kozlovsky I.A., Kozlovsky R.A., Tarasova N.P., 121–Zanin A.A., Krivoborodov E.G., Karimov O.Kh., Flid V.R., Loginova M.E. ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]. 2021. V. 64. N 9. P. 4–121.
10. Puchina G. R., Ragulin V. V., Telin A. G., Alimbekova S. R., Bahtizin R. N., Voloshin A. I., Dokichev V. A. Neftgazovoe delo. 2020. V. 18. N 2. P. 72–80 (in Rus.). DOI: 10.17122/ngdelo-2020-2-72-80.
11. Kaipbergenova G.R., Halikova S.D., Kadirov H.I. Universum: Tekhnicheskie nauki : elektron. nauchn. zhurn. 2020. N 2(71). URL: <http://7universum.com/ru/tech/archive/item/8883>.
12. Rajendran S., Joany R.M. et al. Bull. Electrochemistry. 2002. V. 18. N 1. P. 25–28.
13. Musin A.I., Borisova Yu.G., Raskildina G.Z., Spirikhin L.V., Sultanova R.M., Zlotsky S.S. ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]. 2023. V. 66. N 9. P. 20–27. DOI: 10.6060/ivkkt.20236609.6829.
14. Sultanova R.M., Borisova Yu.G., Khusnutdinova N.S., Raskil'dina G.Z., Zlotskii S.S. Russ. Chem. Bull. V. 72. N 10. P. 2297–2318. DOI: 10.1007/s11172-023-4027-3.
15. Borisova Yu.G., Musin A.I., Raskildina G.Z., Spirikhin L.V., Zlotsky S.S., Kuznetsov V.V. Ros. Khim. Zh. 2024. V. 68. N 2. P. 67–75. DOI: 10.6060/R CJ.2024682.9.
16. Clarkson J.S., Walker A.J., Wood M.A. Continuous Reactor Technology for Ketal Formation: An Improved Synthesis of Solketal. Org. Proc.Res. Devel. 2001. V. 5. N 6. P. 630–635. DOI: 10.1021/op000135p.
17. Csunderlik C., Chiril T., Bacaloglu R. Org. Magn. Reson. 1983. V. 18. N 3. P. 153–156. DOI: 10.1002/mrc.1270180308.
18. Musin A.I., Sultanova D.S., Borisova YU.G., Mudrik T.P., Daminev R.R. Fine Chem. Technol. 2023. V. 18. N 1. P. 21–28 (in Rus.).
19. Eliel E.L., Knoeber S.M. J. Am. Chem. Soc. 1968. V. 90. N 13. P. 3444–3458. DOI: 10.1021/ja01015a029.
20. Musin A.I., Borisova YU.G., Raskil'dina G.Z., Daminev R.R., Davletshin A.R., Zlotskij S.S. Fine Chem. Technol. 2022. V. 17. N 3. P. 201–209 (in Rus.). DOI: 10.32362/2410-6593-2022-17-3-201-209.
21. Baryshnikov R.N., Vafina R.M., Fedorenko V.Y., Shtyrilin Y.G., Klimovitskii E.N. Russ. J. Org. Chem. 2003. V. 39. N 7. P. 1029–1033. DOI: 10.1023/b:rujo.0000003198.646.
22. Mohammed H. Kailania, Amal G. Al-Bakrib, Haitham Saadeha, Yusuf M. Al-Hiari. Jordan J. Chem. 2012. V. 7. N 3. P. 239.
23. Gabitov A. I., Bugaj D. E., Rol'nik L. Z., Kuznecov L. K. Bashkirskij himicheskij zhurnal. 2009. V. 16. N 2. P. 190–192.

Поступила в редакцию (Received) 12.02.2024

Принята к опубликованию (Accepted) 18.04.2024