

УДК 620.193.2

Коррозионное поведение низкоуглеродистой стали в средах сульфата аммония в зависимости от температуры

Г.Е. Горностаева и Г.В. Редькина

ФГБУН Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН,
119071, Россия, Москва, Ленинский проспект, 31, корп. 4

E-mail: 444658703z@gmail.com

Аннотация

В настоящей статье изучено коррозионное поведение низкоуглеродистой стали Ст3 в жидком минеральном удобрении (ЖМУ) – водном растворе сульфата аммония $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ при различных концентрациях (5, 10, 25, 40% и в опытном образце жидкого удобрения ЛиквиФорс марки NS 8:9) и температурах $t = 20, 35, 50$ и 65°C). Оценка коррозивности ЖМУ включала исследование коррозии стали в трех областях: в объеме жидкости, в насыщенных парах над раствором и по ватерлинии. Для всех исследованных растворов $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ при 20°C характерно снижение скорости коррозии стали во времени. Повышение температуры ЖМУ приводит к ускорению коррозии низкоуглеродистой стали, особенно по ватерлинии и в парогазовой фазе.

Ключевые слова: низкоуглеродистая сталь, коррозия, жидкие минеральные удобрения, сульфат аммония.

Поступила в редакцию 14.07.2023 г.; После доработки 14.07.2023 г.; Принята к публикации 14.07.2023 г.

Введение

В мировой практике одним из основных рычагов повышения урожайности сельскохозяйственных культур используются минеральные удобрения. За счет их применения обеспечивается не менее 50% прироста урожая [1]. Основные требования, предъявляемые к минеральным удобрениям, следующие: повышение концентрации питательных веществ, внесение необходимых микро- и макроэлементов за один прием, равномерное распределение по обрабатываемой площади [2, 3]. Применение твердых минеральных удобрений не обеспечивает равномерного поступления их в почву, что приводит к перерасходу удобрений, снижению урожая и загрязнению окружающей среды [3]. Этого недостатка лишены жидкие минеральные удобрения (ЖМУ), эффективность которых подтверждена многолетним научным и практическим опытом в сельском хозяйстве [3]. Важным преимуществом ЖМУ перед твердыми удобрениями также является отсутствие энергоемких стадий гранулирования и сушки при их производстве, кроме того в отличие от твердых удобрений ЖМУ не пылят, не слеживаются, имеют свободную текучесть, сырая погода и даже дождь не

оказывают на них никакого влияния [1, 2, 4]. Использование ЖМУ позволяет механизировать все погрузочно-разгрузочные работы, устранить потери при транспортировке, хранении и внесении в почву, снизить капитальные затраты на строительство цехов на 20–30 %, а их доставка и внесение в почву в 2,0–2,5 раза дешевле в сравнении с твердыми удобрениями [2]. Все вышеперечисленные преимущества ЖМУ делают их одним из самых перспективных видов удобрений. Вместе с тем серьёзным недостатком ЖМУ является их коррозивность по отношению к металлам и сплавам [2, 4, 5], что повреждает оборудование при производстве, транспортировке, хранении и внесении ЖМУ в почву. Загрязняются также сами удобрения продуктами коррозии, в результате чего изменяются их реологические свойства и соотношение питательных элементов.

Одним из самых известных и давно используемых азотных минеральных удобрений является сульфат аммония [2, 6]. При хорошем азотном питании растений повышается синтез белковых веществ [1], причем, аммонийная форма азота при поступлении в растения сразу и непосредственно может быть использована для синтеза аминокислот, в то время, как нитратный азот должен еще пройти процесс восстановления до аммиака [1]. При недостатке азота рост растений сильно ухудшается, урожай резко снижается [2]. Помимо необходимого растениям азота сульфат аммония содержит и мезоэлемент – серу, недостаток которой негативно отражается на процессах фотосинтеза, азотного и углеводного обмена [1]. При недостатке серы уменьшается накопление белка в выращиваемых культурах, что приводит к снижению качества урожая. Потребность растений в сере сопоставима с потребностью в фосфоре [7].

Сульфат аммония является коррозивным минеральным удобрением, а коррозивность его растворов зависит не только от величины pH и концентрации NH_4^+ и SO_4^{2-} в его водном растворе [6], но и от наличия и концентрации примесных элементов, а также температуры [6, 8, 10].

В литературе имеются противоречивые данные о коррозивности растворов $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ с разной концентрацией по отношению к углеродистым и низкоуглеродистым сталям. Эти стали являются наиболее часто используемыми конструкционными материалами в сельском хозяйстве, что объясняется их механическими характеристиками, доступностью и относительно низкой стоимостью [5]. Например, согласно [6, 8] минимальная скорость коррозии таких сталей наблюдается в разбавленных растворах $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ (1–5%), а максимальная – в насыщенных растворах. Напротив, согласно [9] скорость коррозии углеродистых сталей минимальна в концентрированных растворах $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ (30–50%), а максимальная скорость коррозии наблюдается в растворе, содержащем 5% сульфата аммония.

Известно [8–10], что скорость коррозии металлов зависит от времени их контакта с агрессивной средой. Коррозионное поведение низкоуглеродистых сталей в зависимости от времени выдержки образцов в насыщенном растворе $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ изучали Попович с соавт. [11, 12]. Они показали, что скорости коррозии сталей в этом электролите сначала снижаются, а через 7–12 сут устанавливаются

на практически одинаковых значениях. Авторами [12] показано также снижение коррозионной устойчивости низкоуглеродистых сталей в насыщенном растворе $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ в ряду: сталь 25 > сталь 20 > сталь 15 > сталь 10 > сталь Ст5 > сталь Ст3.

Существенное влияние на скорость коррозии оказывает температура раствора [6, 8–10], которая при перевозке и хранении ЖМУ может варьироваться в широком диапазоне. Для растворов $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ характерно ускорение коррозионного процесса при повышении температуры [6, 8, 9]. Например, согласно [8] углеродистую сталь можно применять в разбавленных (до 10%) растворах $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ только при $t \leq 30^\circ\text{C}$, в концентрированных растворах при $t \geq 100^\circ\text{C}$ углеродистые стали не стойки [8, 9]. Авторами работы [6] показано резкое увеличение скоростей коррозии низкоуглеродистых сталей КВС-290 и Ст3 в растворах $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ различной концентрации при повышении температуры до 40°C и, особенно, до 60°C .

Таким образом, литературные данные о коррозионном поведении углеродистых и низкоуглеродистых сталей в растворах $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ различной концентрации весьма противоречивы. Кроме того, в литературе не найдена информация о скорости коррозии этих сталей в насыщенных парах над растворами $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ и на границе раздела жидкой и парогазовой фаз (т.е. по ватерлинии), что является важным аспектом при перевозке и, особенно, хранении ЖМУ.

В связи с этим целью настоящей работы является оценка коррозионного поведения низкоуглеродистой стали Ст3 в растворах $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ различной концентрации, в зависимости от температуры в трех областях (в объеме жидкости, в насыщенных парах над раствором, по ватерлинии).

Методика эксперимента

Все исследования проводили на низкоуглеродистой стали Ст3 со следующим составом: Fe > 98%; C 0,14–0,22%; Mn 0,4–0,65%; Ni < 0,3%; Cr < 0,3%; Cu < 0,3%; Si 0,05–0,15%; As < 0,08%; S < 0,05%; P < 0,04%; N < 0,008%.

Коррозионное поведение стали Ст3 изучали в растворах $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ с концентрацией 5; 10; 25 и 40 масс.%, которые готовили из $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, производства компании BASF (Германия) со следующим составом: $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 \geq 99,0\%$; N $\geq 21,0\%$; свободная кислота $\leq 0,01\%$; $\text{H}_2\text{O} \leq 0,2\%$; Fe $\leq 0,0020\%$; $\text{Cl}^- \leq 0,0010\%$; тяжелые металлы $\leq 0,0005\%$. Для приготовления растворов использовали дистиллированную воду, соответствующую ГОСТ Р 58144-2018. Коррозионную стойкость стали также изучали в опытном образце жидкого удобрения ЛиквиФорс марки NS 8:9 производства ООО “Ликвифорс” составом: N $\geq 8,0\%$; S $\geq 9,0\%$; $\text{H}_2\text{O} \leq 62\%$; Hg $\leq 0,00021\%$; Pb $\leq 0,0032\%$; As $\leq 0,0002\%$; Cd $\leq 0,00005\%$.

Коррозионные испытания проводили на плоских прямоугольных образцах (30×25×1,5 мм). Перед испытаниями образцы зачищали наждачными бумагами различной зернистости (от 120 до 1500) и обезжиривали ацетоном.

Подготовленные стальные образцы выдерживали 24 ч в эксикаторе, а затем

взвешивали на аналитических весах с точностью до 0,0001 г. Взвешенные образцы подвешивали в герметично закрытой колбе с исследуемым раствором так, чтобы одна часть из них погружалась в раствор полностью, другая – наполовину, для оценки характера и скорости коррозии по ватерлинии, а третьи – над раствором в парогазовой среде. Перед коррозионными испытаниями и после них измеряли показатели pH растворов с помощью прибора ЭКСПЕРТ-pH. Все испытания проводили в статических условиях. Продолжительность выдержки образцов в растворах составляла 140 и 1000 ч при $t \approx 20^\circ\text{C}$. Испытания при повышенных температурах (35, 50 и 65°C) проводили в течение 140 ч в сушильном шкафу SNOL 67/350. После испытаний образцы осматривали, удаляли продукты коррозии, обезжиривали и взвешивали.

Скорость коррозии (K , г/м²·ч) стали Ст3 рассчитывали по потере массы образцов до и после коррозионных испытаний по формуле:

$$K = (m_1 - m_2) / S \cdot \tau, \quad (1)$$

где m_1 – масса образца до испытания, г; m_2 – масса образца после испытания, г; S – площадь поверхности образца, м²; τ – продолжительность испытания, ч. Глубинный показатель коррозии (Π , мм/год) рассчитывали по формуле:

$$\Pi = 8,76 \cdot K / \rho, \quad (2)$$

где K – скорость коррозии, г/м²·ч; ρ – плотность металла, г/см³.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

При коррозии металлов в электролитах устанавливаются неравновесные электродные потенциалы. Хотя они не являются абсолютным показателем стойкости металла в коррозионной среде, по их установившемуся значению и изменению со временем можно получить ценную информацию о характере коррозионного процесса и поведении металла в реальных условиях [5]. Изменение E стали Ст3 во времени при различной концентрации растворов $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ (5, 10, 25 и 40%) исследовано нами в работе [13]. Для всех исследованных электролитов величина E уменьшается и достигает почти постоянного значения через ≈ 30 мин. Увеличение концентрации $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ повышает величину $E_{\text{кор}}$, что может свидетельствовать об увеличении термодинамической стабильности стали.

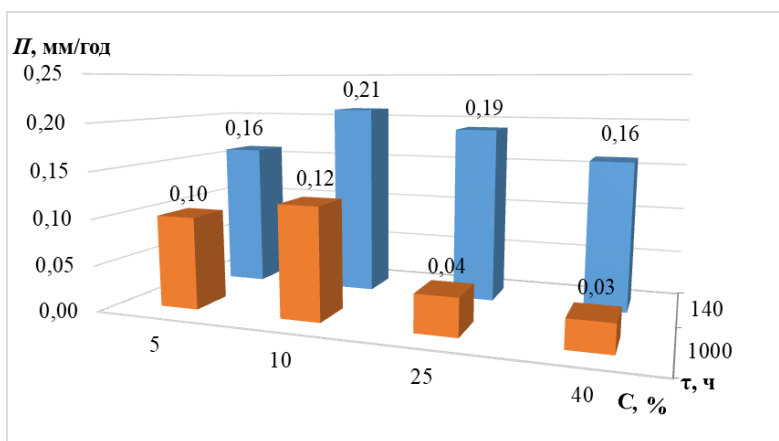
Однако потенциодинамические поляризационные измерения показали [13], что коррозивность растворов $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ имеет экстремальную зависимость от концентрации. Так, при 20 и 50°C скорости анодной и катодной реакций на стали Ст3 уменьшаются в ряду концентраций раствора $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$: 10% > 5% > 25% > 40%. Повышение температуры растворов от 20 до 50°C (наиболее вероятная температура нагревания ЖМУ при перевозке и хранении в летнее время года) приводит к смещению $E_{\text{кор}}$ в сторону более отрицательных значений и уменьшению поляризуемости электрода для каждого исследованного электролита, что свидетельствует об ускорении анодного и катодного процессов.

Аналогичная экстремальная зависимость скорости коррозии стали Ст3 от концентрации растворов $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ при 20°C также подтверждена нами в работе [13] методом линейного поляризационного сопротивления. Отметим, что для всех исследованных растворов наблюдается торможение коррозии во времени. При этом в наиболее коррозивном растворе 10% $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ скорость коррозии стали во времени снижается значительно медленнее, чем в других растворах.

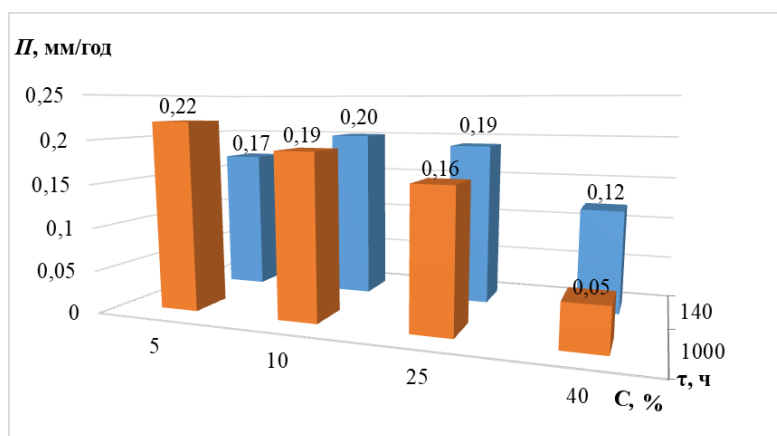
Известно [8, 9], что с увеличением концентрации соли в неподвижном электролите скорость коррозии большинства металлов вначале растёт, а затем уменьшается. Это объясняется тем, что повышение концентрации соли увеличивает электропроводность электролита и часто облегчает протекание анодной реакции, что способствует ускорению коррозии, но согласно закону И.М. Сеченова, уменьшает растворимость деполаризатора – кислорода, что может замедлить коррозию. Коррозионные испытания показали, что самой коррозивной средой для стали Ст3 в объёме жидкости (т.е. при полном погружении образцов в раствор) является раствор 10% $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, а наименее коррозивной – 40% (Рисунок 1а). Для всех исследованных растворов характерно снижение скорости коррозии стали во времени, что согласуется с результатами других исследователей [11, 12]. Коррозия металла при этом носит равномерный характер во всем исследованном диапазоне концентраций $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$.

При частичном погружении образцов стали Ст3 в растворы $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ различной концентрации по ватерлинии наблюдали более глубокие коррозионные поражения. Кроме того, в области ватерлинии отмечали небольшое количество коррозионных язв, глубина которых увеличивалась с ростом концентрации растворов и продолжительности контакта металла с коррозивной средой. Однако количество язв уменьшалось с ростом концентрации растворов. Половина поверхности стальных образцов, находившаяся над ватерлинией, покрывалась черно-коричневыми продуктами коррозии, после удаления которых обнаруживались отдельные очаги язвенной коррозии, а в случае раствора 40% $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ – нитевидной коррозии.

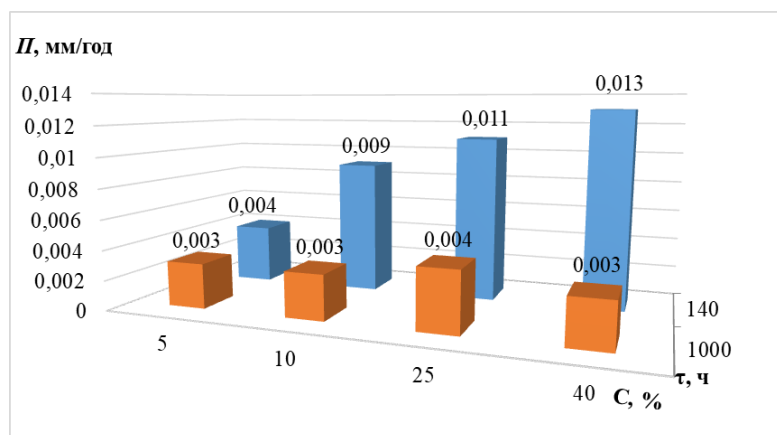
Скорость коррозии при частичном погружении образцов стали Ст3 в растворы $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ различной концентрации и длительности испытаний 140 ч практически не отличается от скорости коррозии в объёме раствора, за исключением её небольшого уменьшения в растворе 40% $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ (Рисунок 1б). При увеличении продолжительности контакта с коррозионной средой до 1000 ч скорость растворения образцов, частично погруженных в раствор, выше, чем образцов полностью находящихся в растворе. При этом коррозия стали в растворе 5% $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ со временем ускоряется, в растворе 10% её скорость почти не изменяется, а в растворах 25 и 40% $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ – заметно снижается. Таким образом, за первые 140 ч контакта стали с исследуемыми растворами ЖМУ наибольшая скорость коррозии, как и для полностью погруженных образцов, наблюдается в растворе 10% $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$. При увеличении времени испытаний самой коррозивной средой становится раствор 5%, а наименее коррозивным независимо от длительности испытаний является раствор 40% $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$.



а



б



в

Рисунок 1. Зависимость скорости коррозии стали Ст3 при 20°C от концентрации растворов $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ и продолжительности контакта с коррозионной средой при полном погружении образцов в раствор (а), погружении наполовину (б) и в парогазовой фазе (в).

Коррозия низкоуглеродистой стали в парогазовой фазе над растворами 5, 10 и 25% $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ при 140 ч испытаниях питтинговая, а при увеличении продолжительности экспозиции образцов до 1000 ч – нитевидная. В растворе 40% $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ нитевидная коррозия преобладала уже при 140 ч испытаний. Ускорение

коррозии стали в парогазовой фазе при увеличении концентрации $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ может быть связано с уменьшением давления паров над растворами [14], что сопровождается утончением водной пленки на поверхности металла. Утончение водной пленки приводит к облегчению диффузии кислорода к стали, и, соответственно, интенсификации коррозии [10]. С увеличением времени выдержки образцов до 1000 ч коррозия стали в парогазовой фазе замедляется для всех исследованных растворов.

Известно [6, 8, 9], что увеличение температуры растворов $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ускоряет коррозию сталей. Это наблюдается как в объёме раствора, так и по ватерлинии или в парогазовой фазе (Рисунок 2). Наибольшая интенсификация коррозии стали происходила в парогазовой фазе, а наименьшая – в объёме раствора. Как и при $t=20^\circ\text{C}$ самой коррозионной средой в случае полного погружения образцов оказался раствор 10%, а наименее коррозионной – 40% $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$. При частичном погружении образцов стали наблюдалось снижение скорости коррозии при увеличении концентрации раствора. В парогазовой фазе наибольшая скорость коррозии стали была в растворе 40%, а наименьшая – в 5% $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$. В объёме растворов 5, 10 и 25% $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ коррозия стали была равномерной, а в 40 % – пятнами. Повышение скорости коррозии при 50°C на образцах, частично погруженных в раствор, приводило к большей площади коррозионного поражения и образованию более глубоких язв. В парогазовой фазе для всех исследованных растворов характерна нитевидная коррозия стали.

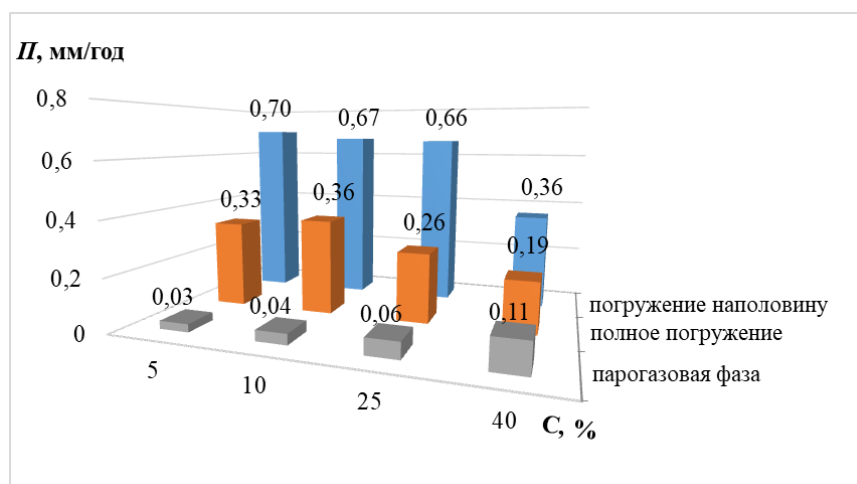


Рисунок 2. Зависимость скорости коррозии стали Ст3 от концентрации растворов $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ при 50°C . Продолжительность испытаний – 140 ч.

Наиболее экономически целесообразно производить, транспортировать и хранить ЖМУ с максимальной концентрацией питательных веществ и минимальной температурой кристаллизации. В связи с этим для более подробного изучения зависимости скорости коррозии от температуры нами выбран раствор 40% $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, опытный образец ЖМУ ЛиквиФорс марки NS 8:9, и наиболее коррозионный по результатам коррозионных испытаний раствор 10% $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ (так как в полевых условиях могут быть приготовлены растворы этого ЖМУ

различной концентрации, которые по тем или иным причинам могут храниться достаточно длительное время).

Увеличение температуры исследуемых электролитов от 20 до 65°C приводит к заметному росту скорости коррозии стали Ст3 во всех исследованных областях: в объёме раствора, по ватерлинии и в парогазовой фазе (Рисунок 3).

При $t=20^\circ\text{C}$ и полном погружении образцов (Рисунок 3а) наиболее коррозионным является раствор 10% $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, наименее коррозионным – 40%. При температуре $t=35^\circ\text{C}$ и выше наиболее коррозионным становится раствор удобрения ЛиквиФорс марки NS 8:9, что может быть связано с наличием примесей в данном удобрении. Наименее коррозионным во всём исследованном интервале температур является раствор 40% $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$. При этом температурные зависимости скорости коррозии для 10% $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ и NS 8:9 практически линейные, а для раствора 40% $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ линейность зависимости наблюдается только до 50°C, после чего следует выраженное увеличение скорости коррозии.

При частичном погружении образцов стали Ст3 в исследуемые растворы (Рисунок 3б) при 20°C наиболее коррозионным также как и при полном погружении является раствор 10% $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, наименьшая скорость коррозии в этом случае наблюдается в NS 8:9. При увеличении t до 35°C наиболее коррозионным по-прежнему остаётся 10% раствор, а наименее коррозионным становится раствор 40% $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$. Дальнейшее увеличение температуры приводит к тому, что, как и при полном погружении образцов, наибольшая скорость коррозии наблюдается в растворе NS 8:9, а наименьшая – в 40% $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$.

При частичном погружении образцов стали в растворы зависимости скорости её коррозии от температуры не имеют линейного характера во всех исследуемых электролитах. Наибольшие отклонения от линейности наблюдаются при $t = 50^\circ\text{C}$ для NS 8:9 и для 40% $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ при 65°C (выраженный скачок скорости коррозии относительно более низких температур).

В парогазовой фазе при $t=20^\circ\text{C}$ наиболее коррозионным раствором является 40% $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, а наименее коррозионным – NS 8:9. Это может быть связано как с увеличением концентрации раствора $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, что приводит к утончению водной пленки на поверхности металла, так и с более высоким pH NS 8:9. Увеличение pH растворов сульфата аммония приводит к выделению газообразного аммиака (о чем свидетельствует запах удобрения NS 8:9), который способствует замедлению коррозии стали в парогазовой фазе [15]. Увеличение температуры растворов приводит к резкой интенсификации коррозии в NS 8:9, что может быть связано с наличием примесей в данном электролите. В растворе 10% $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ увеличение температуры также приводит к ускорению скорости коррозии стали Ст3, но менее выражено, чем в NS 8:9 и 40% $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$.

В целом даже по внешнему виду растворов после коррозионных испытаний можно судить об их коррозионности по отношению к низкоуглеродистой стали. Растворы $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ приобретали оранжевый цвет, из них выпадали осадки. На ватерлинии скапливалась коричнево-черная твердая фаза продуктов коррозии.

Наибольшее количество осадков наблюдалось в растворе 10% $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ и в NS 8:9, наименьшее – в 40% растворе. Все растворы после испытаний заметно подщелачивались (Таблица 1).

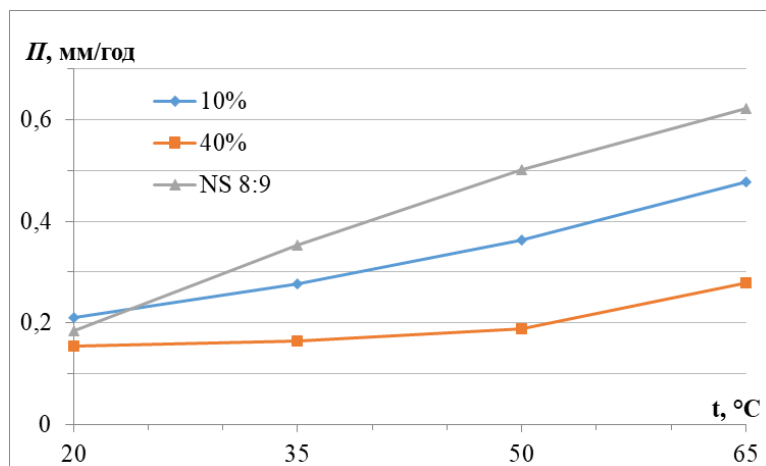
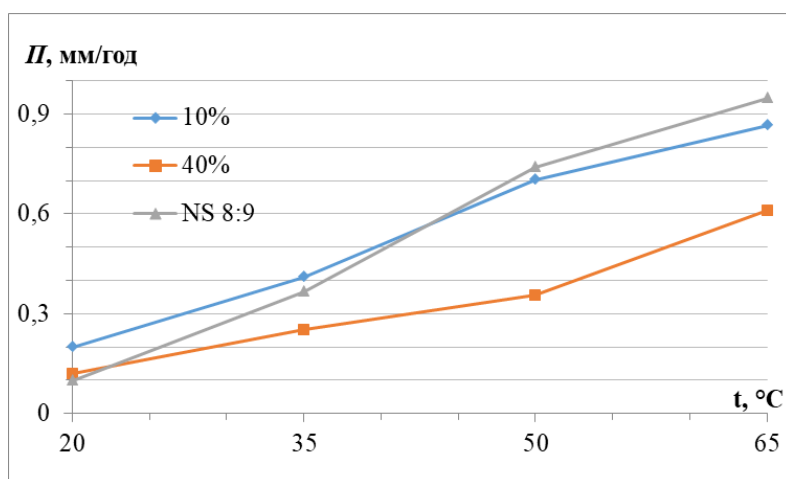
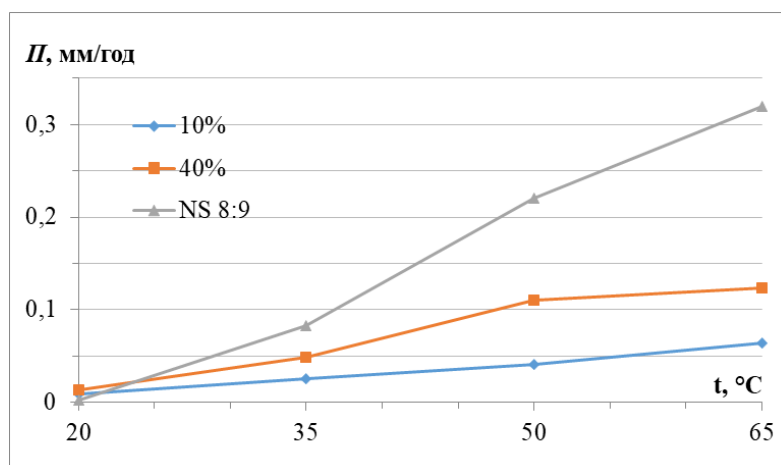
**а****б****в**

Рисунок 3. Зависимость скорости коррозии стали Ст3 от концентрации и температуры растворов $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ при полном погружении образцов в раствор (**а**), погружении наполовину (**б**) и в парогазовой фазе (**в**).

Таблица 1. Изменение pH растворов $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ концентрации 10 и 40% и NS 8:9 до и после коррозионных испытаний при в зависимости от температуры.

Температура, °C	Концентрация $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, %	Тип погружения образцов в раствор	pH	
			До опыта	После опыта
20	10	Полностью	5,02	7,44
		Наполовину		7,43
	NS 8:9	Полностью	6,1	7,2
		Наполовину		7,2
	40	Полностью	4,88	7,36
		Наполовину		7,36
35	10	Полностью	4,97	7,48
		Наполовину		7,25
	NS 8:9	Полностью	6,45	7,48
		Наполовину		7,39
	40	Полностью	4,98	7,67
		Наполовину		7,43
50	10	Полностью	4,96	7,08
		Наполовину		7,20
	NS 8:9	Полностью	6,6	7,1
		Наполовину		7,1
	40	Полностью	4,62	6,84
		Наполовину		6,87
65	10	Полностью	4,96	7,48
		Наполовину		7,26
	NS 8:9	Полностью	6,51	7,51
		Наполовину		7,56
	40	Полностью	4,5	6,97
		Наполовину		7,03

Выводы

1. Согласно результатам коррозионных испытаний среди растворов $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ различной концентрации (5, 10, 25 и 40%) наиболее коррозивным по отношению к низкоуглеродистой стали Ст3 при 20°C является раствор 10%, а

наименее – 40% $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$.

2. Для всех исследованных растворов $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ при 20°C характерно снижение скорости коррозии стали во времени.
3. Повышение температуры раствора $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ независимо от его концентрации и наличия примесных элементов ускоряет коррозию стали Ст3 во всех исследованных областях: в объёме раствора, по ватерлинии и в парогазовой фазе, но особенно в двух последних.
4. Увеличение температуры растворов выше 20°C ускоряет коррозию в NS 8:9 сильнее, чем в 10 и 40% $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, поэтому при повышенной температуре, в целом, коррозия в NS 8:9, выше, чем в растворах 10 и 40% $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$.
5. Независимо от концентрации раствора $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ и его температуры наибольшая скорость коррозии стали Ст3 наблюдается при её частичном погружении вследствие интенсификации растворения металла в области ватерлинии.

Литература

1. А.Х. Шеуджен, В.Т. Куркаев и Н.С. Котляров, *Агрохимия: Учебное пособие*, Под ред. А.Х. Шеуджена. 2-е изд., перераб. и доп., Майкоп, Афиша, 2006, 1075 с.
2. Б.А. Ягодин, Ю.П. Жуков и В.И. Кобзаренко, *Агрохимия*, М.: Колос, 2002, 584 с.
3. F. F. Mozheiko, T.N. Potkina and I.I. Goncharik, Effect of inhibitors on corrosion resistance of carbon steel in suspended liquid combined fertilizer, *Russ. J. Appl. Chem*, 2008, 81(9), 1705–1709. doi: [10.1134/S1070427208090437](https://doi.org/10.1134/S1070427208090437)
4. С.Д. Эвенчик и А.А. Бродский, *Технология фосфорных и комплексных удобрений*. М.: Химия, 1987, 464 с.
5. D. Ivanova, K. Kamburova, P. Kirilov and L. Fachikov, Mild steel corrosion resistance in liquid fertilizer solutions, *J. Chem. Technol. Metall.*, 2010, 45, 53–58. url: <https://journal.uctm.edu>
6. L. Fachikov, D. Ionova and B. Tzaneva, Corrosion of low-carbon steels in aqueous solutions of ammonium sulfate mineral fertilizer, *J. Chem. Technol. Metall.*, 2006, 41, 21–24. url: <https://journal.uctm.edu>
7. В.А. Милюткин и С.А. Толпекин, Жидкие азотные и азотосеросодержащие удобрения на базе КАС – эффективная альтернатива твердым минеральным удобрениям, *Проблемы современной аграрной науки*, 2020, 71–74.
8. В.С. Пахомов, *Коррозия металлов и сплавов: Справочник: в 2 кн. Книга 2*, М.: Наука и технология, 2013, 544 с.
9. Г.Я. Воробьева. *Коррозионная стойкость материалов в агрессивных средах химических производств: Справочное пособие*, М.: Химия. 1975. 816 с.
10. И.Я. Клинов, *Коррозия химической аппаратуры и коррозионностойкие материалы: Учебное пособие*. М.: Машгиз, 1960. 511 с.

-
11. P.V. Popovych and Z.B. Slobodyan, Corrosion and electrochemical behaviors of 20 steel and st. 3 steel in ammonium sulfate and nitrophoska. *Mater. Sci.*, 2014, 49(6), 819–826. doi: [10.1007/s11003-014-9679-6](https://doi.org/10.1007/s11003-014-9679-6)
 12. P. Popovych, O. Shevchuk, L. Poberezhna and M. Mazur, Performance of bearing steel structures of vehicle used in transportation of aggressive agricultural materials, *J. Taibah Univ. Sci.*, 2019, 13(1), 563–569. doi: [10.1080/16583655.2019.1607811](https://doi.org/10.1080/16583655.2019.1607811)
 13. G.E. Gornostaeva, G.V. Redkina and Yu.I. Kuznetsov, Corrosion of mild steel and protection against it in environments of a liquid mineral fertilizer–ammonium sulphate, *Int. J. Corros. Scale Inhib.*, 2022, 11, 1802–1818. doi: [10.17675/2305-6894-2022-11-4-25](https://doi.org/10.17675/2305-6894-2022-11-4-25)
 14. А.Л. Коуль и Ф.С. Ризенфельд, *Очистка газа*, М.: Недра, 1968, 392 с.
 15. Г.Е. Горностаева, Г.В. Редькина и Ю.И. Кузнецов, Ингибирование коррозии низкоуглеродистой стали в растворах сульфата аммония, *Успехи химии в химии и химической технологии*. Сб. науч. тр., М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2023, 37, 33–35.

Corrosion behavior of mild steel in ammonium sulfate environments depending on temperature

G.E. Gornostaeva* and G.V. Redkina

A.N. Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry, Russian Academy of Sciences, Leninskii pr. 31, 119071 Moscow, Russian Federation

**e-mail: 444658703z@gmail.com*

Abstract

In the present article the corrosion behavior of St3 mild steel in a liquid mineral fertilizer (LMF), namely in $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ at different concentrations (5, 10, 25, 40% and in a prototype liquid fertilizer LikviFors brand NS 8:9) and temperatures (20, 35, 50 and 65°C) was studied. The evaluation of the corrosiveness of the liquid metallurgy included the study of corrosion of steel in three areas: in the bulk of the liquid, in saturated vapors above the solution, and along the waterline. All investigated solutions of $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ at 20°C are characterized by a decrease in the steel corrosion rate with time. Increasing the temperature of the LMC leads to an acceleration of corrosion of mild steel, especially along the waterline and in the vapor-gas phase.

Key words: *mild steel, corrosion, liquid mineral fertilizers, ammonium sulfate.*