

ВЯЗКОСТЬ КРИОЛИТОГЛИНОЗЕМНЫХ РАСПЛАВОВ ПРОМЫШЛЕННОГО СОСТАВА

© 2021 г. А.В. Руденко¹, А.А. Катаев¹, О.Ю. Ткачева^{1,2}, Ю.П. Зайков^{1,2},
А.А. Пьяных³, Г.В. Архипов³

¹ Институт высокотемпературной электрохимии (ИВТЭ) УрО РАН,
г. Екатеринбург, Россия

² Уральский федеральный университет (УрФУ) имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
г. Екатеринбург, Россия

³ ООО «Объединенная компания РУСАЛ. Инженерно-технологический центр»,
г. Красноярск, Россия

Статья поступила в редакцию 25.05.21 г., доработана 02.07.21 г., подписана в печать 06.07.21 г.

Аннотация: Проведены исследования вязкости криолитоглиноземных расплавов промышленного состава $\text{NaF-AlF}_3\text{-CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ с криолитовым отношением $\text{KO} = 2,3$ в зависимости от содержания CaF_2 , Al_2O_3 и температуры. Вязкость образцов криолитоглиноземных электролитов, приготовленных в лабораторных условиях, и образцов электролитов промышленных электролизных ванн измеряли ротационным методом с использованием реометра FRS 1600 («Anton Paar», Австрия). Область ламинарного течения расплава, определенная по зависимости вязкости от скорости сдвига при постоянной температуре, составила $10\text{--}15\text{ с}^{-1}$ для всех исследованных образцов. Измерения температурной зависимости вязкости криолитоглиноземных расплавов проводили при скорости сдвига $12 \pm 1\text{ с}^{-1}$ в температурном интервале от ликвидуса до $1020\text{ }^\circ\text{C}$. Показано, что изменение вязкости всех образцов в исследуемом температурном интервале ($50\text{--}80\text{ }^\circ\text{C}$) можно описать линейным уравнением. Средний температурный коэффициент линейных уравнений, описывающих вязкость криолитоглиноземных электролитов, приготовленных в лабораторных условиях, составил $0,005\text{ мПа}\cdot\text{с}/^\circ\text{C}$, что в 2 раза меньше, чем у электролитов промышленных ванн. Таким образом, изменение вязкости электролитов промышленных ванн с повышением температуры – более существенное. Добавки как глинозема, так и фторида кальция повышают вязкость криолитового расплава. Вязкость приготовленных образцов промышленного состава $\text{NaF-AlF}_3\text{-}5\%\text{CaF}_2\text{-}4\%\text{Al}_2\text{O}_3$ ($\text{KO} = 2,3$) равна $3,11 \pm 0,04\text{ мПа}\cdot\text{с}$ при рабочей температуре электролиза $960\text{ }^\circ\text{C}$, а вязкость электролитов промышленных ванн с таким же криолитовым отношением выше на $10\text{--}15\%$ и лежит в интервале $3,0\text{--}3,7\text{ мПа}\cdot\text{с}$ в зависимости от состава.

Ключевые слова: вязкость, ротационный метод, криолитглиноземный расплав, глинозем, фторид кальция, производство алюминия.

Руденко А.В. – науч. сотрудник ИВТЭ УрО РАН (620066 г. Екатеринбург, ул. Академическая, 20).
E-mail: lrizonl@gmail.com.

Катаев А.А. – канд. хим. наук, науч. сотрудник ИВТЭ УрО РАН. E-mail: aleksandr_kataev@mail.ru.

Ткачева О.Ю. – докт. хим. наук, вед. науч. сотрудник ИВТЭ УрО РАН, профессор кафедры технологии электрохимических производств (ТЭХП) УрФУ (620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19).
E-mail: o.tkacheva@ihte.uran.ru.

Зайков Ю.П. – докт. хим. наук, науч. руководитель ИВТЭ УрО РАН, зав. кафедрой ТЭХП УрФУ.
E-mail: dir@ihte.uran.ru.

Пьяных А.А. – канд. техн. наук, менеджер отдела математического моделирования и измерений ООО «РУСАЛ ИТЦ» (660111, г. Красноярск, ул. Пограничников, 37).
E-mail: pianykhaa@gmail.com.

Архипов Г.В. – канд. техн. наук, директор проекта «Энергосберегающие конструкции электролизеров», ООО «РУСАЛ ИТЦ». E-mail: Gennadiy.Arhipov@rusal.com.

Для цитирования: Руденко А.В., Катаев А.А., Ткачева О.Ю., Зайков Ю.П., Пьяных А.А., Архипов Г.В. Вязкость криолитоглиноземных расплавов промышленного состава. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2021. Т. 27. № 6. С. 4–11.
DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2021-6-4-11.

Viscosity of conventional cryolite-alumina melts

A.V. Rudenko¹, A.A. Kataev¹, O.Yu. Tkacheva^{1,2}, Yu.P. Zaykov^{1,2}, A.A. Pyanykh³, G.V. Arkhipov³

¹ Institute of High Temperature Electrochemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (IHTE UB RAS), Ekaterinburg, Russia

² Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin (UrFU), Ekaterinburg, Russia

³ «RUSAL ETC» LLC, Krasnoyarsk, Russia

Received 25.05.2021, revised 02.07.2021, accepted for publication 06.07.2021

Abstract: The study covers the viscosity of NaF–AlF₃–CaF₂–Al₂O₃ conventional cryolite-alumina melts with a cryolite ratio CR = 2.3 depending on the CaF₂, Al₂O₃ content and temperature. The viscosity of cryolite-alumina electrolyte samples prepared under laboratory conditions and electrolyte samples of industrial electrolytic cells was measured by the rotary method using the FRS 1600 rheometer («Anton Paar», Austria). The laminar flow region of the melt determined according to the dependence of viscosity on shear rate at a constant temperature was 10–15 s^{–1} for all the studied samples. The temperature dependence of cryolite-alumina melt viscosity was measured at a shear rate of 12 ± 1 s^{–1} in the temperature range from liquidus to 1020 °C. It was shown that the change in the viscosity of all samples in the investigated temperature range (50–80 °C) can be described by a linear equation. The average temperature coefficient of linear equations describing the viscosity of cryolite-alumina electrolytes prepared in laboratory conditions was 0.005 mPa·s/°C, which is 2 times less compared to industrial cell electrolytes. Thus, the change in the viscosity of industrial cell electrolytes with increasing temperature is more significant. Both alumina and calcium fluoride additives increase the cryolite melt viscosity. The viscosity of samples prepared with the conventional composition NaF–AlF₃–5%CaF₂–4%Al₂O₃ (CR = 2.3) is equal to 3.11 ± 0.04 mPa·s at an electrolysis operating temperature of 960 °C, while the viscosity of industrial cell electrolytes with the same cryolite ratio is 10–15 % higher and falls in the range of 3.0–3.7 mPa·s depending on the electrolyte composition.

Keywords: viscosity, rotary method, cryolite-alumina melt, alumina, calcium fluoride, aluminum production.

Rudenko A.V. — Researcher, Institute of High Temperature Electrochemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (IHTE UB RAS) (620066, Russia, Ekaterinburg, Akademicheskaya str., 20).
E-mail: Irizonl@gmail.com.

Kataev A.A. — Dr. Sci. (Chem.), Researcher, IHTE UB RAS. E-mail: aleksandr_kataev@mail.ru.

Tkacheva O.Yu. — Dr. Sci. (Chem.), Leading researcher, IHTE UB RAS; Professor, Department of electrochemical production technology (EPT), Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin (UrFU) (620002, Russia, Ekaterinburg, Mira str., 19). E-mail: o.tkacheva@ihite.uran.ru.

Zaykov Yu.P. — Dr. Sci. (Chem.), Scientific supervisor, IHTE UB RAS; Head of the Department of EPT, UrFU.
E-mail: dir@ihite.uran.ru.

Pyanykh A.A. — Cand. Sci. (Tech.), Manager, Department of mathematical modelling and measurement, «RUSAL ETC» LLC (660111, Russia, Krasnoyarsk, Pogranichnikov str., 37). E-mail: pianykhaa@gmail.com.

Arkhipov G.V. — Cand. Sci. (Tech.), Project Director «Energy-Saving Cell Designs», «RUSAL ETC» LLC.
E-mail: Gennadiy.Arkhipov@rusal.com.

For citation: Rudenko A.V., Kataev A.A., Tkacheva O.Yu., Zaykov Yu.P., Pyanykh A.A., Arkhipov G.V. Viscosity of conventional cryolite-alumina melts. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya (Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy)*. 2021. Vol. 27. No. 6. P. 4–11 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2021-6-4-11.

Введение

Мировые тенденции развития алюминиевой промышленности в направлении создания высокоамперных электролизеров, преимущества которых неоспоримы, требуют новых решений по организации более энергоэффективной и ресурсосберегающей технологии. Увеличение мощности электролизера и, соответственно, площади анода приводит к уменьшению межполюсного расстояния в электролизерах как с обожженными, так и с самообжигающимися анодами и создает

проблему неравномерной концентрации глинозема в рабочем пространстве. Повышенная концентрация глинозема в электролите в местах загрузки приводит к нарушению технологических режимов (колебания плотности тока, температуры, локальные анодные эффекты), как следствие, снижается выход по току, увеличивается толщина настыва и гарнисажа. Уменьшение объема электролита создает проблему качественного питания ванны.

Для создания правильной стратегии питания электролизера глиноземом должны быть известны закономерности изменения физико-химических свойств электролита в процессе загрузки глинозема различного качества. Измерение большинства параметров работы алюминиевого электролизера при температурах порядка 1000 °С затруднительно или невозможно, не все протекающие в нем физико-химические процессы понятны. Для усовершенствования работы электролизеров и автоматизации производства при одновременном увеличении энергоэффективности разрабатываются новые алгоритмы управления, построенные на моделировании сложного технологического процесса, включая разработку математической модели растворения и распределения глинозема. Начиная с 1980-х годов работы по исследованию и разработке математических моделей растворения глинозема проводятся многими ведущими алюминиевыми компаниями и исследовательскими центрами [1–9].

Существующие математические модели, учитывающие процесс питания ванны, основаны на справочных данных по физико-химическим свойствам криолитоглиноземных расплавов, среди которых одним из основных параметров является вязкость. Она влияет на гидродинамические процессы в алюминиевом электролизере: природу циркуляции электролита, скорость растворения глинозема, седиментацию его частиц, перенос растворенного и нерастворенного глинозема в объеме электролита, перенос и выделение анодного газа [10–12]. Кроме того, формирование рабочего пространства электролизера, в том числе образование гарнисажа, определяется тепловым потоком, зависящим от режима движения и вязкости расплавленного электролита [13–17].

Тем не менее величина вязкости криолитовых и криолитоглиноземных расплавов точно не определена, зависимости ее изменения от различных параметров противоречивы, а ее влияние на гидродинамические процессы в алюминиевом электролизере практически никем не изучалось.

По данным разных авторов, величина вязкости криолитоглиноземных электролитов промышленного состава $\text{NaF—AlF}_3\text{—CaF}_2\text{—Al}_2\text{O}_3$ с криолитовым отношением $\text{КО} = 1,8\div 2,6$ в интервале температур $t = 945\div 970$ °С изменяется от 1 до 5 мПа·с [11, 18–23]. В работе [11] проведен сравнительный анализ имеющихся в литературе экспериментальных данных по вязкости расплавленного криолита

Na_3AlF_6 ($\text{КО} = 3$) и термодинамических расчетов, выполненных авторами. Вязкость моделируется с использованием уравнения Эйринга, в которое входит энергия активации вязкого потока как полином первого порядка. Предложены наиболее надежные значения вязкости: вблизи температуры плавления криолита Na_3AlF_6 (1008 °С [24]) она составляет 2,3 мПа·с.

Авторы [25] измерили осцилляционным методом вязкость тройной системы $\text{NaF—AlF}_3\text{—Al}_2\text{O}_3$ в зависимости от КО и концентрации Al_2O_3 в интервале $t = 950\div 1140$ °С. Было выявлено, что вязкость криолитовых расплавов увеличивается непропорционально с ростом концентрации Al_2O_3 (в области растворимости Al_2O_3), а максимальное ее значение имеют криолитовые расплавы с $\text{КО} \sim 3$ (содержание $\text{AlF}_3 = 23$ мол.%).

Целью настоящей работы являлось исследование вязкости криолитоглиноземных электролитов промышленного состава $\text{NaF—AlF}_3\text{—CaF}_2\text{—Al}_2\text{O}_3$ с $\text{КО} = 2,3$ в зависимости от температуры и концентраций компонентов CaF_2 и Al_2O_3 .

Экспериментальная часть

Для исследования влияния содержания CaF_2 и Al_2O_3 на вязкость криолитоглиноземных электролитов готовили образцы различного состава $\text{NaF—AlF}_3\text{—CaF}_2\text{—Al}_2\text{O}_3$ с $\text{КО} = 2,3$ ($\text{КО} = x_{\text{NaF}}/x_{\text{AlF}_3}$, моль/моль) из индивидуальных солей NaF , AlF_3 , CaF_2 (квалификации Ч) производства АО «БЕКТОН» (Россия). Использовали глинозем марки ЧДА (ООО «Гранхим», Россия), содержание основного вещества в котором составляло не менее 98,2 мас.%. Рентгенографическое исследование его фазового состава осуществляли на дифрактометре Mini Flex 600 («Rigaku», Япония). Количественный анализ содержания различных фаз глинозема проводили при помощи соответствующего программного обеспечения. Выявлено, что глинозем содержит 3 модификации: тригональную $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (корунд) (27,3 %) и кубические $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ (60,6 %) и $\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$ (12,1 %).

Кроме того, была измерена вязкость образцов электролитов промышленных ванн Красноярского алюминиевого завода (ПЭ) и приготовленных в лаборатории (ЛЭ). Все они имели значение КО , близкое к 2,3.

Состав исследуемых электролитов приведен в табл. 1. Концентрацию глинозема в образцах определяли методом карботермического восстановления

Таблица 1. Состав исследуемых криолитоглиноземных электролитов

Table 1. Composition of cryolite-alumina electrolytes studied

Электролит	КО	Al ₂ O ₃ , мас.%	CaF ₂ , мас.%	t _{ликв} , °C [26]
ЛЭ1	2,30	2,0	0	975
ЛЭ2	2,30	2,0	5,0	960
ЛЭ3	2,30	4,0	5,0	949
ПЭ1	2,32	3,61	7,16	941
ПЭ2	2,44	1,57	9,41	952
ПЭ3	2,30	5,44	5,97	933
ПЭ4	2,37	2,02	2,34	951

ния кислорода с помощью прибора МЕТАВАК-К (НПО «ЭКРАН», Россия). Содержание CaF₂ анализировали оптическим эмиссионным спектрометром с индуктивно-связанной плазмой iCAP 6300 Duo («Thermo Fisher Scientific», США).

В табл. 1 также представлены температуры ликвидуса криолитоглиноземных электролитов, рассчитанные по уравнению, приведенному в [26]. При расчете температуры ликвидуса промышленных электролитов учитывали содержание в них Al₂O₃, CaF₂ и 2 мас.% MgF₂.

Вязкость (η) электролитов определяли ротационным методом с использованием реометра FRS 1600 («Anton Paar», Австрия), который работает в широком температурном диапазоне (600–1500 °C) и соответствует международному стандарту ISO 7884-2. Принципиальная схема экспериментальной установки для измерения вязкости расплавленных криолитов показана на рис. 1.

Ротационный метод заключается в том, что исследуемый расплав помещается в малый зазор между двумя графитовыми цилиндрами. Внешний цилиндр-контейнер — неподвижен, а внутренний (ротор) совершает вращение с постоянной скоростью. Внешний вид обоих цилиндров перед началом измерений показан на рис. 2. Вращательное движение ротора передается к неподвижной поверхности внешнего цилиндра посредством движения вязкой среды.

Сопротивление расплава, находящегося внутри измерительной ячейки, крутящему моменту (или напряжению сдвига τ) позволяет ротору вращаться только при такой скорости (скорости сдвига $\dot{\gamma}$), которая обратно пропорциональна вязкости исследуемого образца. Крутящий момент передается непосредственно на вал ротора, скорость

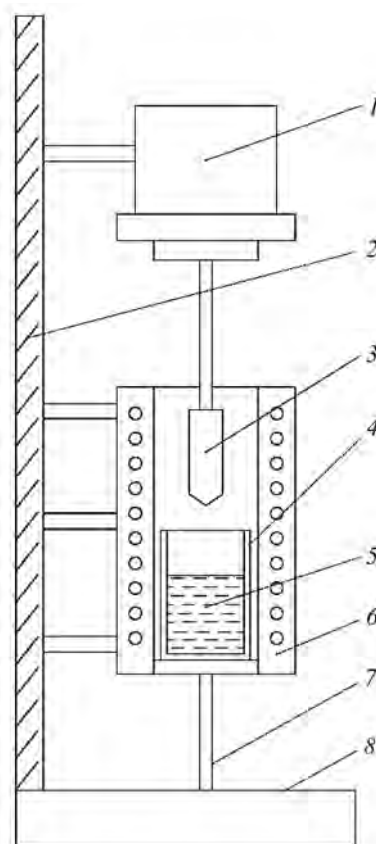


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки для измерения вязкости расплавленных солей

1 — измерительная головная система DSR 502; 2 — подъемный механизм; 3 — внешний цилиндр-контейнер; 4 — внутренний цилиндр (ротор); 5 — расплав; 6 — шахтная печь сопротивления; 7 — алундовый стержень; 8 — неподвижное основание

Fig. 1. Schematic diagram of the unit for molten salt measurements

1 — DSR 502 measuring head system; 2 — lifting mechanism; 3 — external container cylinder; 4 — internal cylinder (rotor); 5 — melt; 6 — shaft-type resistance furnace; 7 — alundum rod; 8 — fixed base

вращения которого подлежит измерению. Измерительная система реометра пересчитывает крутящий момент в напряжение сдвига, а частоту вращения ротора — в скорость сдвига. Методология



Рис. 2. Фотография внутреннего и внешнего цилиндров перед началом измерений

Fig. 2. Photo of internal and external cylinders before measurements

реометрических исследований подробно описана в монографии [27].

Чтобы оценить область ламинарного течения расплава, определяли зависимость вязкости от скорости сдвига при постоянной температуре. В качестве примера на рис. 3 показана подобная зависимость для образцов ЛЭ1, ПЭ3 и ПЭ4 от скорости сдвига при $t = 1020^\circ\text{C}$. Из его данных следует, что при малых значениях $\dot{\gamma} < 10\text{ c}^{-1}$ наблюдается большой разброс точек, что связано с тем, что ламинарное течение еще не установилось. Оно реализуется, когда вязкость не зависит от скорости сдвига, т.е. на горизонтальном участке в интервале $\dot{\gamma} = 10\div 15\text{ c}^{-1}$. При увеличении скорости сдвига выше 15 c^{-1} вязкость резко возрастает, что связано с начинающейся турбулентностью.

Для исследований температурной зависимости вязкости была выбрана скорость сдвига $12 \pm 1\text{ c}^{-1}$. Измерения проводили при скорости охлаждения $2^\circ\text{C}/\text{мин}$ от 1020°C до температуры, близкой к температуре ликвидуса измеряемого образца.

Результаты и их обсуждение

Температурные зависимости вязкости приготовленных в лабораторных условиях электролитов $\text{NaF}-\text{AlF}_3$ ($\text{KO} = 2,3$) с различным содержанием CaF_2 и Al_2O_3 (обр. ЛЭ) и электролитов промышленных ванн (обр. ПЭ) показаны на рис. 4.

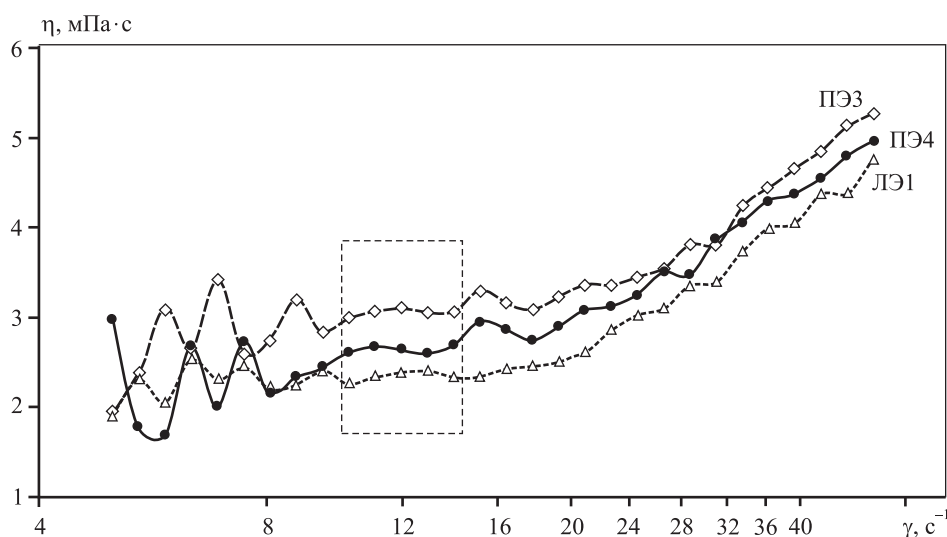


Рис. 3. Зависимость вязкости образцов ЛЭ1, ПЭ3 и ПЭ4 от скорости сдвига при $t = 1020^\circ\text{C}$

Fig. 3. Dependence of viscosity on shear rate for ЛЭ1, ПЭ3 and ПЭ4 samples at $t = 1020^\circ\text{C}$

Вязкость всех образцов в небольшом температурном интервале (50–80 °С) можно описать линейным уравнением вида

$$\eta = a + bt. \quad (1)$$

Коэффициенты a и b , а также рассчитанные значения вязкости исследованных образцов при $t = 950$ и 1000 °С приведены в табл. 2.

Погрешность измерения вязкости (R^2) была рассчитана в соответствии с рекомендациями ГОСТ 8.207-76. Суммарная относительная погрешность составила не более 1,5 %.

Анализируя полученные результаты для образцов ЛЭ (рис. 4, а), можно отметить, что добавки как глинозема, так и фторида кальция повышают вязкость криолитового расплава. Так, введение 5 мас.% CaF_2 в электролит $\text{NaF}-\text{AlF}_3-2\text{мас.}\%\text{Al}_2\text{O}_3$ увеличивает его вязкость в среднем на 10 %, т.е. 1 мас.% CaF_2 повышает величину η на ~2 %. Такое же действие оказывает добавка глинозема: при введении 1 мас.% Al_2O_3 вязкость криолитового электролита возрастает в среднем на 2 %. Учитывая то, что CaF_2 повышает теплопроводность криолитовых расплавов, входит в состав гарнисажа электролизной ванны, т.е. играет важную роль в тепловом балансе электролизера, его концентрация в промышленных электролитах является значимой величиной и требует особого контроля.

В исследованном температурном интервале вязкость образцов, полученных в лабораторных условиях, уменьшается примерно на 2,0–2,5 % при увеличении температуры на каждые 10 °С. Средний температурный коэффициент в уравнении (1) составляет 0,005 мПа·с/°С. Изменение вязкости электролитов промышленных ванн с повышением

температуры — более существенное. Температурный коэффициент равен 0,01 мПа·с/°С.

Вязкость образца ЛЭ3 состава $\text{NaF}-\text{AlF}_3-5\text{мас.}\%\text{CaF}_2-4\text{ мас.}\%\text{Al}_2\text{O}_3$ ($\text{КО} = 2,3$), наиболее близкого к промышленному, составляет 3,11 мПа·с

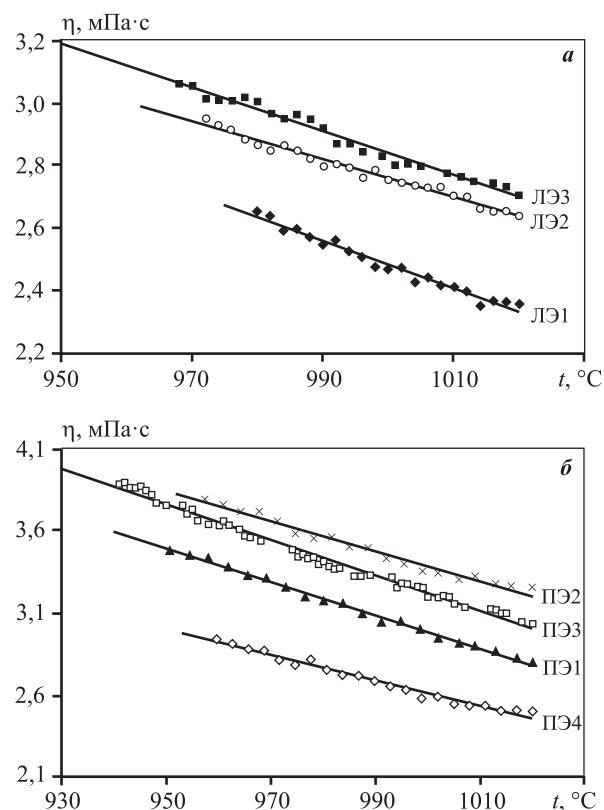


Рис. 4. Температурные зависимости вязкости образцов ЛЭ (а) и ПЭ (б)

Fig. 4. Temperature dependences of viscosity for ЛЭ (а) and ПЭ (б) samples

Таблица 2. Вязкость исследованных криолитоглиноземных расплавов

Table 2. Viscosity of cryolite-alumina melts studied

Образец электролита	Коэффициенты уравнения (1)		R^2	η , мПа·с	
	a	$-b$		$t = 960$ °С	1000 °С
ЛЭ1	6,76	0,004	0,97	—	$2,52 \pm 0,03$
ЛЭ2	7,99	0,005	0,97	—	$2,71 \pm 0,03$
ЛЭ3	9,83	0,007	0,98	$3,11 \pm 0,04$	$2,83 \pm 0,03$
ПЭ1	13,12	0,010	0,99	$3,42 \pm 0,04$	$3,02 \pm 0,04$
ПЭ2	12,54	0,009	0,98	$3,70 \pm 0,05$	$3,34 \pm 0,04$
ПЭ3	14,03	0,011	0,99	$3,66 \pm 0,04$	$3,23 \pm 0,04$
ПЭ4	10,91	0,008	0,98	$2,94 \pm 0,04$	$2,61 \pm 0,03$

при рабочей температуре электролиза 960 °С. Вязкость образцов ПЭ1 и ПЭ3 больше, чем у лабораторных электролитов с таким же КО, на 10–15 %, что объясняется более высоким содержанием в них CaF_2 и Al_2O_3 , а также наличием в промышленных электролитах других компонентов (например, MgF_2), повышающих этот показатель.

Выводы

1. Исследованы закономерности изменения вязкости криолитоглиноземных расплавов $\text{NaF}-\text{AlF}_3-\text{CaF}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$ с КО = 2,3 в зависимости от состава (содержания CaF_2 и Al_2O_3) и температуры ротационным методом с помощью реометра FRS 1600.

2. Показано, что введение как Al_2O_3 , так и CaF_2 способствует увеличению вязкости криолитового расплава: 1 мас.% любой из этих добавок повышает вязкость в среднем на 2 %.

3. Выявлено, что вязкость электролитов промышленных ванн превышает этот показатель электролитов промышленного состава с таким же КО, приготовленных в лабораторных условиях, на 10–15 % и в зависимости от состава составляет 3,0–3,7 мПа·с при рабочих температурах электролиза.

Литература/References

1. Oye H.A., Mason N., Peterson R.D., Richards N.E. Aluminium: Approaching the new millennium. *J. Metals*. 1999. Vol. 51. P. 29–42.
2. Hua J., Rudshaug M., Droste C., Jorgensen R., Giskeodegard N.-H. Modelling of metal flow and metal pad heaving in a realistic reference aluminum reduction cell. *Light Metals*. 2016. P. 339–344.
3. Arkhipov A., Alzarooni A., Al Jasmi A., Potocnik V. Improving the understanding of busbar design and cell MHD performance. *Light Metals 2017: The Minerals, Metals & Materials Series* (Ed. A.P. Ratvik). 2017. P. 671–677.
4. Bardet B., Foetisch T., Renaudier S., Rappaz J., Flueck M., Picasso M. Alumina dissolution modelling in aluminium electrolysis cell considering MHD driven convection and thermal impact. *Light Metals 2016: The Minerals, Metals & Materials Series* (Ed. E. Williams). 2016. P. 315–319.
5. Zhan S., Li M., Zhou J., Yang J., Zhou Y. CFD simulation of dissolution process of alumina in an aluminum reduction cell with two-particle phase population balance model. *Appl. Thermal. Eng.* 2014. Vol. 73. P. 805–818.
6. Bojarevics V. Dynamic modelling of alumina feeding in an aluminium electrolysis cell. *Light Metals 2019: The Minerals, Metals & Materials Series* (Ed. C. Chesonis). 2019. P. 675–682.
7. Пьяных А., Архипов Г., Третьяков Я. Математическая модель магнитной гидродинамики и теплообмена в алюминиевом электролизере. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2019. No. 6. С. 23–33.
Pianykh A., Arkhipov G., Tretyakov Ya. Mathematical model of magnetic hydrodynamics and heat transfer in an aluminum reduction cell. *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 2020. Vol. 61. No. 1. P. 65–73.
8. Zhang H., Ran L., Liang J., Li T., Sun K., Li J. Study on 3D full cell ledge shape calculation and optimal design criteria by coupled thermos-flow model. *Light Metals 2018: The Minerals, Metals & Materials Series* (Ed. O. Martin). 2018. P. 587–596.
9. Pianykh A.A., Bogovalov S.V., Tronin I.V., Tkacheva O.Y., Radzyuk A.Y. 3-D numerical modeling of MHD flows in an aluminum reduction cell. *IOP. Conf. Ser.: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 537. No. 6. Art. 62071.
10. Silny A., Chrenkova M., Danek V., Vasiljev R., Nguyen D.K., Thonstad J. Density, viscosity, surface tension, and interfacial tension in the systems $\text{NaF(KF)} + \text{AlF}_3$. *J. Chem. Eng. Data*. 2004. Vol. 49. P. 1542–1545.
11. Robelin C., Chartrand P. A viscosity model for the ($\text{NaF} + \text{AlF}_3 + \text{CaF}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$) electrolyte. *J. Chem. Thermodynam.* 2011. Vol. 43. P. 764–774.
12. Korenko M. Density, viscosity and electrical conductivity of the molten cryolite electrolytes ($\text{Na}_3\text{AlF}_6-\text{SiO}_2$) for Solar grade silicon (Si–SoG) electrowinning. *Silicon*. 2015. Vol. 7. P. 261–267.
13. Solheim A. Some aspects of heat transfer between bath and sideledge in aluminum reduction cells. *Light Metals*. 2011. P. 381–386.
14. Severo D., Gusberti V. A modeling approach to estimate bath and metal heat transfer coefficient. *Light Metals*. 2009. P. 557–562.
15. Иванова А.М., Архипов П.А., Руденко А.В., Ткачева О.Ю., Зайков Ю.П. Формирование гарнисажа и настывы в алюминиевом электролизере. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2019. No. 5. С. 23–31.
Ivanova A.M., Arkhipov P.A., Rudenko A.V., Tkacheva O.Yu., Zaikov Yu.P. Formation of side ledge and bottom ledge in an aluminum electrolyzer. *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 2019. Vol. 60. No. 6. P. 624–631. DOI: 10.3103/S1067821219060075.
16. Tkacheva O., Arkhipov P., Zaykov Yu. Solid phase formation during aluminium electrolysis. *Electrochem. Commun.* 2020. Vol. 110. Art. 106624.

17. Jianfei Z., Dupuis M., Feiya Y., Xiaobing Y., Jun H. Depth analysis and potentiality exploitation on energy-saving and consumption-reduction of aluminum reduction pot. *Light Metals*. 2012. P. 601–606.
18. Абрамов Г.А., Ветюков М.М., Гупало И.П. Теоретические основы электрометаллургии алюминия. М.: Metallurgizdat, 1953.
Abramov G.A., Vetyukov M.M., Gupalo I.P. Theoretical foundations of aluminum electrometallurgy. Moscow: Metallurgizdat, 1953 (In Russ.).
19. Беляев А.И. Metallurgy of light metals. Moscow: Metallurgiya, 1970 (In Russ.).
Belyaev A.I. Metallurgy of light metals. Moscow: Metallurgiya, 1970 (In Russ.).
20. Votava I., Matiasovsky K. Measurement of viscosity of fused salts. I. Method of measurement. Viscosity of Li_3AlF_6 and Na_3AlF_6 . *Chem. Zvesti.* 1973. Vol. 27. No. 2. P. 172–182.
21. Watanabe K. Viscosity and dissociation mechanism of a cryolite flux, Na_3AlF_6 , during the growth of corundum single crystals. *Bull. Chem. Soc. Japan*. 1993. Vol. 66. No. 4. P. 1098–1103.
22. Tkacheva O., Arkhipov P., Kataev A., Rudenko A., Zaykov Yu. Electrolyte viscosity and solid phase formation during aluminium electrolysis. *Electrochem. Commun.* 2021. Vol. 122. Art. 106893.
23. Ly X., Chen C., Han Z. Shear viscosities and thermal conductivity of $\text{NaF}-\text{AlF}_3$ molten salts: A non-equilibrium molecular dynamics study. *J. Fluor. Chem.* 2021. Vol. 241. Art. 109675.
24. Grjotheim K., Krohn C., Malinovsky M., Matiasovsky K., Thonstad J. Aluminum electrolysis. Fundamentals of the Hall-Heroult process. 2-nd ed. Dusseldorf: Aluminium-Verlag, 1982.
25. Hertzberg T., Torklep K., Oye H. Viscosity of $\text{NaF}-\text{AlF}_3-\text{Al}_2\text{O}_3$ melt mixtures. In: *Essential Readings in Light Metals* (Eds. Bearne G., Dupuis M., Tarcy G.). Springer, 2016. P. 19–24.
26. Solheim A., Rolseth S., Skybakmoem E., Stoen L., Sterten A., Store T. Liquidus temperature and alumina solubility in the system $\text{Na}_3\text{AlF}_6-\text{AlF}_3-\text{LiF}-\text{CaF}_2-\text{MgF}_2$. In: *Essential Readings in Light Metals* (Eds. Bearne G., Dupuis M., Tarcy G.). Springer, 2016. P. 73–82.
27. Шпрамм Г. Основы практической реологии и реометрии. М.: Колос, 2003.
Schramm G. A practical approach to rheology and rheometry. Gebrueder HAAKE GmbH, Karlsruhe. FRG, 1994.