

Исследование поперечной проводимости катодного листа диафрагменного электролизера

В. Л. Беляев, А. А. Шалагинов

Национальный минерально-сырьевой университет "Горный",
Санкт-Петербург, РФ, e-mail: rimsinc@mail.ru

Выполнено комплексное исследование поперечной проводимости катодного листа диафрагменного электролизера. Получены аналитические выражения, позволяющие определить поверхностную удельную проводимость перфорированного листа.

Ключевые слова: ток, проводимость, сопротивление, потенциал, электролизер, диафрагма, анизотропия, катод, лист.

В настоящее время на предприятиях химической промышленности для производства хлора и каустической соды применяются электролизеры диафрагменного типа БГК-100 на номинальный ток 100 кА и БГК-50/25 на номинальные токи 50 и 25 кА [1]. Эти электролизеры представляют собой ванны, состоящие из днища, боковых стенок и крышки. При этом катодом является стальное днище, а анодом — крышка, изолированная от стенок резиновой прокладкой. Пресеченные сетки, погруженные в раствор, используются в качестве электродов, раствор находится в ванне электролизера [2, 3].

Одним из недостатков пресеченных сеток является невозможность установки их в одной плоскости. Поэтому в одних местах ванны межэлектродное расстояние увеличивается, а в других — уменьшается, что приводит к неравномерному распределению тока по поверхности электрода и к недостаточной производительности электролизера. К еще одному недостатку пресеченных сеток следует отнести анизотропию их проводимости, обусловленную ориентацией ячеек. При растекании тока в пресеченных сетках, применяемых в качестве электродов в существующих диафрагменных электролизерах, наблюдается анизотропия поперечной проводимости, обусловленная асимметричной конструкцией сетки.

Поэтому цель настоящей работы — исследовать влияние ориентации листа, перфорированного круглыми отверстиями, на величину поперечной проводимости, то есть определить степень анизотропии последней.

На рис. 1 изображена одна из областей перфорированного листа. Видно, что благодаря симметрии поворот направления тока на 60° не ведет к изменению проводимости перфорированного листа. Следовательно, проводимость листа при токе, направленном параллельно оси OA , оказывается идентичной проводимости, наблюдаемой при токе, направленном параллельно оси OC . Наибольшее отклонение от указанной проводимости можно ожидать для проводимости при токе, направленном параллельно оси OB или, соответственно, оси OD , то есть при повороте линий тока на 30° . Поэтому необходимо определить степень анизотропии, то есть относительную разность проводимостей в направлениях OA и OB .

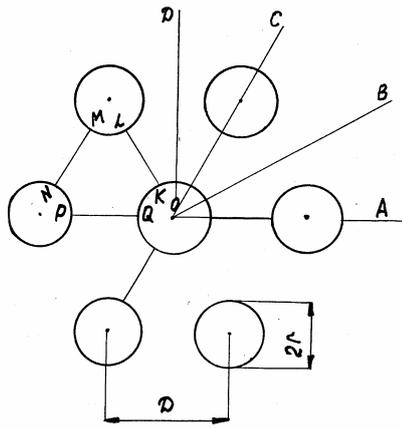


Рис. 1. Область перфорированного катодного листа диафрагменного электролизера.

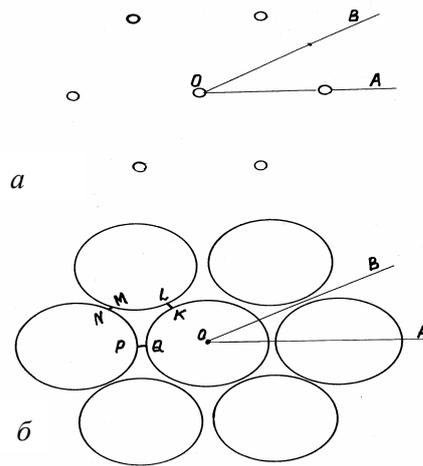


Рис. 2. Области перфорированного катодного листа с продольными размерами отверстий при $\alpha = 0$ (а) и 0,5 (б).

Для этого рассмотрим два предельных случая. В первом случае $\alpha = r/D = 0$, отверстия отсутствуют. Во втором — $\alpha = r/D \approx 0,5$, отверстия максимальны (рис. 2, а, б). Первый предельный случай соответствует сплошному, неперфорированному листу. Поскольку удельная проводимость γ_0 всюду однородна и изотропна, поэтому и проводимость листа окажется изотропной, следовательно, анизотропия в этом случае будет отсутствовать. При втором предельном случае перешейки между отверстиями оказываются настолько малыми, что при токе, направленном параллельно оси OB , поле в них можно считать однородным, а отрезки KL , MN , PQ , лежащие на прямых, которые соединяют центры указанных отверстий, можно считать линиями равного потенциала. Тогда область листа, ограниченная дугами LM , NP , QK и отрезками KL , MN , PQ , может быть представлена звездообразной схемой замещения (рис. 3, а) [4].

Если известно сопротивление R' в звездообразной схеме замещения, то поперечная проводимость листа G_{OB} в направлении OB может быть определена по формуле

$$G_{OB} = \gamma_{OB} \frac{b}{l}, \quad (1)$$

где l — длина листа в направлении OB ; b — ширина листа в направлении, перпендикулярном OB ; γ_{OB} — удельная эквивалентная поверхностная проводимость перфорированного листа, которая связана с сопротивлением R' элемента звездообразной схемы замещения соотношением

$$\gamma_{OB} = \frac{\sqrt{3}}{6R'}. \quad (2)$$

Чтобы убедиться в этом, следует учесть, что сопротивление R_1 области $KLMNPQ$ при указанной ориентации листа по отношению к току превышает сопротивление R' в полтора раза:

$$R_1 = 1,5R'. \quad (3)$$

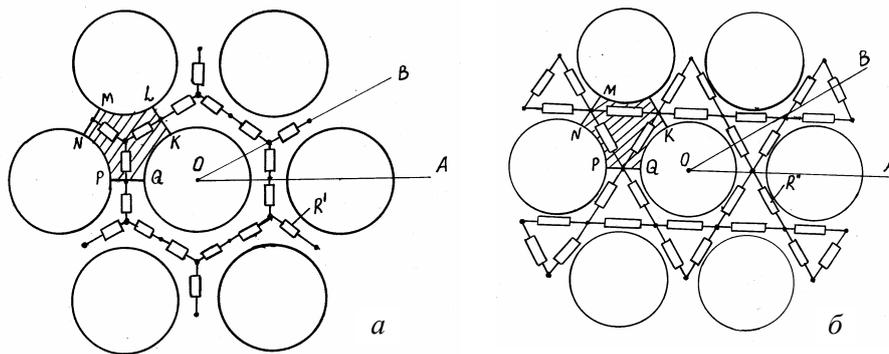


Рис. 3. Электрическая звездообразная (а) и эквивалентная треугольная схемы замещения перфорированного катодного листа.

Действительно, сопротивление R_1 включено последовательно в группе сопротивлений R' и R' , которые между собою соединены параллельно:

$$R_1 = R' + \frac{R'R'}{R' + R'} = 1,5R'. \quad (4)$$

Рассмотрим это иначе. Заменяя звезду эквивалентным треугольником (рис. 4), заметим, что одна из сторон может быть исключена из рассмотрения ввиду отсутствия тока в ней, поскольку концы указанной стороны имеют один и тот же потенциал. А это позволяет считать, что две другие стороны соединены параллельно, а их сопротивление R_1 равно половине сопротивления R'' отдельной стороны. Учитывая все это, получим тот же результат, что уже был приведен:

$$R_1 = 0,5R'' = 0,5 \cdot 3R' = 1,5R'. \quad (5)$$

При расчетах учтено, что при замене звезды эквивалентным треугольником имеют место следующие соотношения:

$$\begin{aligned} R_A &= \frac{R_{AB}R_{CA}}{R_{AB} + R_{BC} + R_{CA}}; \\ R_B &= \frac{R_{BC}R_{AB}}{R_{AB} + R_{BC} + R_{CA}}; \\ R_C &= \frac{R_{AC}R_{AB}}{R_{AB} + R_{BC} + R_{CA}}; \\ R_{AB} &= R_A + R_B + \frac{R_A R_B}{R_C}; \\ R_{BC} &= R_B + R_C + \frac{R_B R_C}{R_C}; \\ R_{CA} &= R_C + R_A + \frac{R_C R_A}{R_B}, \end{aligned} \quad (6)$$

где R_A, R_B, R_C — сопротивления элементов звезды, а R_{AB}, R_{BC}, R_{CA} — сопротивления элементов эквивалентного треугольника.

В рассматриваемом случае вследствие симметрии расположения отверстий $R_A = R_B = R_C = R'$ и $R_{AB} = R_{BC} = R_{CA} = R''$. Подставляя эти значения сопротивлений в приведенные формулы (6), получим

$$R' = \frac{R''R''}{R'' + R'' + R''} = \frac{R''}{3}; \quad (7)$$

$$R'' = R' + R' + \frac{R'R'}{R'} = 3R'. \quad (8)$$

Рассмотрены соотношения, позволяющие установить связь между сопротивлением R' элемента звездообразной схемы замещения и удельной эквивалентной поверхностной проводимостью перфорированного листа γ_{OB} при токе, ориентированном в направлении OB . Перейдем к рассмотрению поперечной проводимости и установлению связи между ее величиной и сопротивлением R_1 для случая, когда ток направлен параллельно оси OA . В этом случае в схеме замещения, представленной на рис. 3, а, будет отсутствовать ток в элементах R' эквивалентной звезды, расположенных вертикально, а остальные элементы окажутся включенными последовательно с образованием отдельных ветвей. И эквивалентная удельная поверхностная проводимость γ_{OA} при ориентации тока по оси OA может быть найдена по соотношению

$$\gamma_{OA} = \sqrt{3}/(6R'). \quad (9)$$

Идентичность формул (2) и (9) позволяет утверждать, что при указанном допущении, а именно в предположении эквипотенциальности линий, соединяющих центры отверстий при ориентации тока по направлению OB , эквивалентная удельная поверхностная проводимость перфорированного листа не зависит от того, как направлен ток: по OA или OB , то есть анизотропией поперечной проводимости можно пренебречь.

Следует заметить, что при ориентации тока по направлению OA некоторые из указанных отрезков линий, соединяющих центры отверстий, например PQ , оказываются не линиями равного потенциала, а силовыми линиями. Но это наблюдается в областях, где электрическое поле практически отсутствует, что на схеме замещения соответствует сопротивлениям (лучам звезды), которые обесточены. А это позволяет считать, что полученные результаты достоверны.

Итак, при изменении направления тока на 60° благодаря симметрии поверхностная проводимость не изменяется. Как уже указывалось, изменение направления тока на 30° , то есть переход от направления OA к направлению OB при $\alpha \approx 0$ и $0,5$, также не ведет к изменению удельной проводимости при изменении направления тока на 15° , однако этим можно пренебречь. Все это позволяет предположить, что анизотропия отсутствует и при произвольных значениях α в пределах $0 < \alpha < 0,5$, то есть

$$\gamma_{OA} = \gamma_{OB} = \gamma. \quad (10)$$

Для проверки указанного предположения, а также для определения соотношения между удельной поверхностной проводимостью γ_0 сплошного листа и эквивалентной удельной поверхностной проводимостью γ

перфорированного круглыми отверстиями листа проведено исследование указанных проводимостей с использованием моделирования на проводящей бумаге.

Удельная поверхностная проводимость γ_0 проводящей бумаги определена следующим образом. Из проводящей бумаги вырезали полоску длиной l и шириной b , по ней пропускали ток I и при этом измеряли напряжение U_1, U_2, \dots, U_n на участках длиной l_1, l_2, \dots, l_n , являющихся частью указанной полоски. Удельную поверхностную проводимость $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n$ определяли по соотношениям

$$\gamma_1 = \frac{I l_1}{U_1 b}; \quad \gamma_2 = \frac{I l_2}{U_2 b}; \quad \gamma_n = \frac{I l_n}{U_n b}. \quad (11)$$

За истинное значение удельной проводимости принималось среднее значение указанных проводимостей

$$\gamma_0 = (\gamma_1 + \gamma_2 + \dots + \gamma_n) / n. \quad (12)$$

Удельное поверхностное сопротивление ρ_0 определяли по соотношению

$$\rho_0 = 1 / \gamma_0. \quad (13)$$

Измерения тока осуществляли миллиамперметром типа М1109, а напряжения — вольтметром типа М1108, имеющим большое сопротивление, благодаря чему ток в вольтметре оказывался значительно меньше тока в проводящей бумаге, несмотря на ее большое сопротивление. А это позволило проводить измерения с необходимой степенью точности.

Для упрощения изготовления модели перфорированного листа из проводящей бумаги целесообразно учесть, что при ориентации тока по оси OB указанными линиями являются отрезки MN (рис. 3). Таким образом, для проведения исследования был выбран не целый лист, а его части, изображенные на рис. 4. Боковыми границами этих частей оказались указанные отрезки силовых линий. Признано целесообразным охватить не менее восьми отверстий в продольном направлении, то есть в направлении тока, чтобы избежать краевого эффекта в этом направлении.

На рис. 5 изображены указанные модели, которые соответствуют случаям, когда ток ориентирован по осям OA (рис. 5, *a*) и OB (рис. 5, *б*). Модели на рис. 5, *a, б* соответствуют случаям, когда ток ориентирован по осям OA и OB . Исследования проводили при следующих значениях

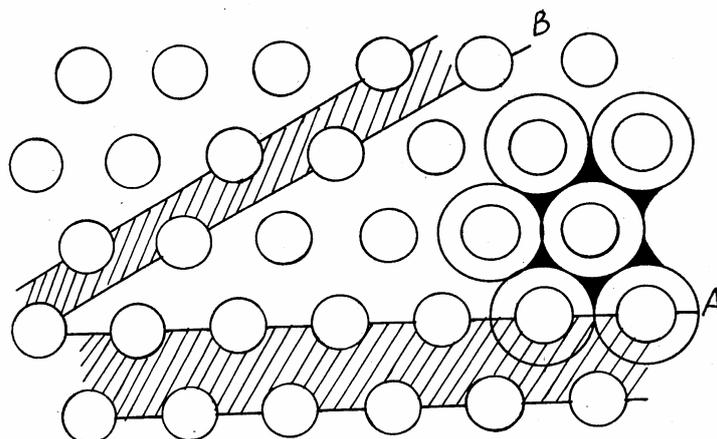


Рис. 4. Область исследования проводимости перфорированного катодного листа с помощью проводящей бумаги.

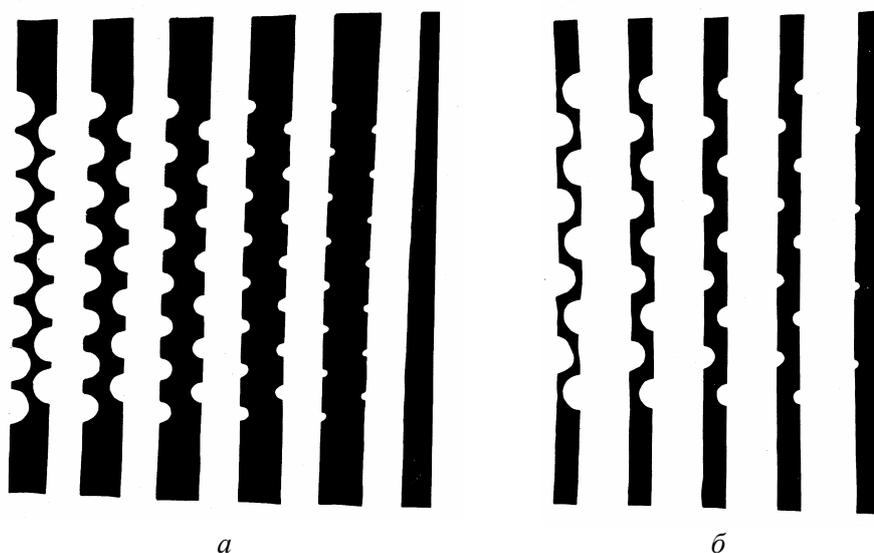


Рис. 5. Область исследования проводимости перфорированного катодного листа с помощью проводящей бумаги. Ток ориентирован по осям OA (a) и OB ($б$).

параметра α : 0; 0,083; 0,167; 0,25; 0,33; 0,42. Следует заметить, что при ориентации тока по оси OA ширина полоски составила $C = 0,866D$, а расстояние между центрами соседних полукругов оказалось равным D . Тогда как при ориентации тока по оси OB указанные параметры равны соответственно $C = 0,5D$ и $d = 1,732D$.

При проведении исследования измеряли ток I в полоске и напряжение U между определенными точками в полоске, которыми ограничивается исследуемый участок. Сопротивление R_{Π} полосок рассчитывали по соотношению

$$R_{\Pi} = \frac{U}{I}.$$

Для определения эквивалентного удельного поверхностного сопротивления перфорированного листа и соответствующей ему удельной поверхностной проводимости использованы формулы:

при ориентации тока по оси OA

$$\gamma_{OA} = \frac{2\sqrt{3}}{3} \cdot \frac{n}{R_{II}}; \quad (13)$$

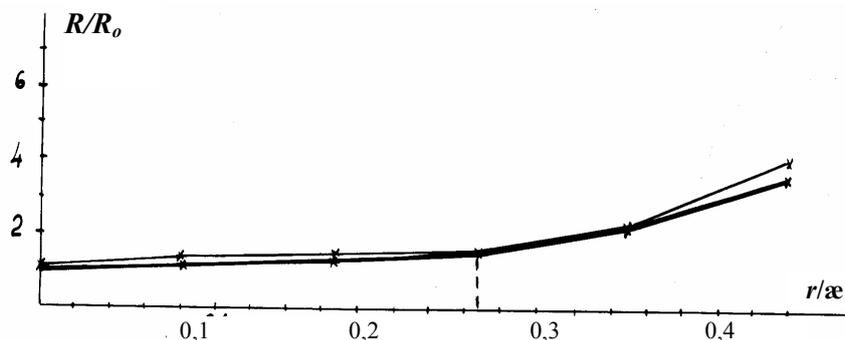


Рис. 6. Опытные зависимости R_{OA}/R_0 и R_{OB}/R_0 от α при ориентации тока по оси OB

$$\gamma_{OB} = \frac{2\sqrt{3} \cdot n}{R_{II}}. \quad (14)$$

На рис. 6 представлены зависимости R_{OA}/R_0 и R_{OB}/R_0 от α в пределах $\alpha = 0—0,417$. Видно, что они практически совпали. Некоторые расхождения наблюдаются при сравнительно больших значениях параметра α , где они, согласно изложенному, должны быть минимальными ввиду эквипотенциальности отрезков линий, соединяющих центры отверстий. Это свидетельствует о том, что указанное расхождение вызвано погрешностью измерений, обусловленной недостаточно большим сопротивлением вольтметра и неоднородностью проводящей бумаги, которая хотя и удовлетворяет соответствующему ГОСТу, однако может внести заметную погрешность.

Пример. Радиус отверстия $r = 0,001$ м, расстояние между центрами отверстий $D = 0,004$ м. Удельная проводимость титана $\gamma_{00} = 2,13 \cdot 10^6$ см/м. Толщина катодного листа $h = 0,0015$ м. Требуется определить удельную поверхностную проводимость γ перфорированного катода.

1. Поверхностная проводимость сплошного листа

$$\gamma_0 = \gamma_{00}h = 2,13 \cdot 10^6 \cdot 0,0015 = 3,19 \cdot 10^3 \text{ см.}$$

2. Параметр

$$\alpha = r/D = 0,001/0,004 = 0,25.$$

3. Отношение удельного поверхностного сопротивления перфорированного листа к удельному поверхностному сопротивлению сплошного листа ρ/ρ_0 определяется по графику на рис. 6:

$$\rho/\rho_0 = 1,40.$$

4. Отношение удельной поверхностной проводимости γ перфорированного листа к удельной поверхностной проводимости γ_0 сплошного листа $\gamma/\gamma_0 = 1/(\rho/\rho_0) = 1/1,40 = 0,714$.

5. Удельная поверхностная проводимость перфорированного листа

$$\gamma = \gamma_0(\gamma/\gamma_0) = 3,19 \cdot 10^3 \cdot 0,714 = 2,28 \cdot 10^3 \text{ см.}$$

Выводы

Разработана и предложена методика расчета сопротивления перфорированного катодного листа диафрагменного электролизера в зависимости от конфигурации структуры внутренних электродов. Методика дает возможность оценить влияние параметров внутренней структуры электролизера на величину падения напряжения на нем и выбрать рациональную геометрию электродов, чтобы снизить электрические потери в электролизной установке.

1. *Беляев В. Л., Дзекцер Н. Н., Шалагинов А. А. и др.* // Отраслевой информ. сб. — 1990. — Вып. 4 (28). — С. 28.
2. *Беляев В. Л.* Экспериментальные установки для исследования сильноточных контактных систем / [В. Л. Беляев, А. М. Сегаль, М. П. Румако, А. А. Шалагинов]. — Л. : Ленингр. гос. техн. ун-т, 1990. — С. 114.
3. *Банников В. В.* Влияние параметров электродов на поперечную проводимость / [В. В. Банников, М. А. Рамбов, А. М. Сегаль, А. А. Шалагинов]. — Харьков : ВНИИэлектроаппарат, 1990. — 84 с.
4. *Бессонов Л. А.* Теоретические основы электротехники. В 3-х ч.: (Уч. для вузов). — М. : Высш. школа, 1961.

Дослідження поперечної провідності катодного листа діафрагмового електролизера

В. Л. Беляєв, А. А. Шалагінов

Виконано комплексне дослідження поперечної провідності катодного листа діафрагменного електролизера. Отримано аналітичні вирази, які дозволяють визначити поверхневу питому провідність перфорованого листа.

Ключові слова: струм, провідність, опір, потенціал, електролизер, діафрагма, анізотропія, катод, лист.

Study of transverse conductivity of cathode sheet diaphragm electrolytic

V. L. Beljaev, A. A. Shalaginov

A comprehensive study of the transverse conductivity of the cathode sheet diaphragm electrolytic cell was carried out. Analytical expressions for the surface to determine the conductivity of the perforated sheet has been received.

Keywords: current, conductivity, resistance, potential, electrolytic diaphragm, anisotropy, cathode sheet.

