

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

УДК 66.046.1:621.365

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ФОРМЫ ЭЛЕКТРОДНОЙ ГРУППЫ ТРУБЧАТЫХ ГРЕЮЩИХ КАМЕР

© 2017 г. Е. А. Ходяков, Л. Ф. Зарипова, В. П. Пищулин

Северский технологический институт НИЯУ “МИФИ”

e-mail: pischulin@ssti.ru

Поступила в редакцию 21.06.2016 г.

В химической промышленности для проведения процессов нагревания, упаривания, десорбции и ректификации растворов серной кислоты и водных фторсерноокислых растворов наиболее эффективным является электродный нагрев переменным электрическим током, пропускаемым непосредственно через раствор в греющей камере. Для нагрева целесообразно применение электродных греющих камер, выполненных в виде установленных по оси в чередующемся порядке трубчатых электродов и изоляторов с различным соотношением размеров конструктивных элементов. Проведены экспериментальные исследования зависимости коэффициента формы электродных трубчатых групп от соотношения геометрических размеров электродов и изоляторов, получено эмпирическое уравнение. Установлены соотношения геометрических параметров электродных групп с целью выравнивания плотности электрического тока по рабочей поверхности электродов и достижения максимальной удельной мощности греющей камеры.

Ключевые слова: фторсерноокислые растворы, электродная трубчатая группа, электроды, изоляторы, коэффициент формы, электрическое сопротивление греющей камеры

DOI: 10.1134/S2304487X16060079

ВВЕДЕНИЕ

В химической промышленности для проведения процессов нагревания, упаривания, десорбции и ректификации растворов серной кислоты и водных фторсерноокислых растворов наиболее эффективным является электродный нагрев переменным электрическим током, пропускаемым непосредственно через раствор в греющей камере [1]. Прямой электрический нагрев характеризуется высокой скоростью и равномерностью прогрева материала, возможностью достижения практически любых температур, простотой конструкции и компактностью греющих камер, высоким коэффициентом полезного превращения электрической энергии в тепловую и теплопроизводительностью, в 4–10 раз превышающей теплопроизводительность паровых греющих камер [2].

Для нагрева целесообразно применение электродных греющих камер, выполненных в виде установленных по оси в чередующемся порядке трубчатых электродов и изоляторов с различным соотношением размеров конструктивных элементов. Трубчатые электроды характеризуются большой рабочей поверхностью, что позволяет проектировать аппараты высокой удельной мощности с минимальной плотностью тока на рабо-

чей поверхности электродов, тем самым обеспечивая минимальный электрокоррозионный износ, надежность и безопасность их эксплуатации [3].

Мощность электродной греющей камеры, расходуемая на нагревание растворов электролитов, рассчитывается через ее электрическое сопротивление. Величина сопротивления зависит от формы электродной группы. Были проведены экспериментальные исследования зависимости коэффициента формы электродных трубчатых групп от соотношения размеров их конструктивных элементов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для расчета греющих камер была собрана модельная установка, изображенная на рис. 1, представляющая собой электродную греющую камеру, состоящую из двух трубчатых электродов 1, соединенных межэлектродной диэлектрической трубчатой вставкой 2 с внутренним диаметром $d_{мэл}$ в 4 раза меньшим внутреннего диаметра электродов $d_{эл}$. Электроды и изоляторы выполнены в виде набора чередующихся колец 3 и 4, соединен-

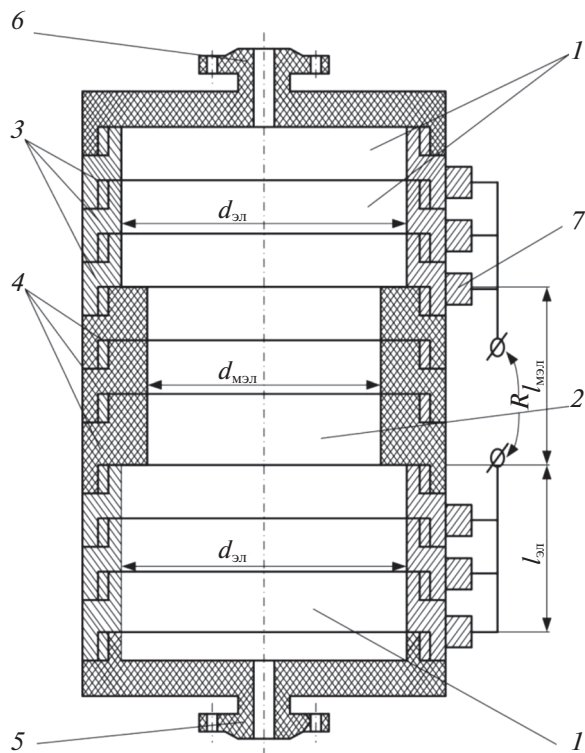


Рис. 1. Модель трубчатой электродной греющей камеры.

ных с помощью резьбы. Установка снабжена штуцерами 5 подачи и 6 отвода раствора электролита. Кольца 3 электродов 1 имеют токоподводы 7

для измерения электрического сопротивления электродной греющей камеры универсальным измерителем марки Е7-11, работающим с целью устранения граничных сопротивлений на переменном токе частотой 100 Гц.

Греющая камера заполнялась через штуцер 5 раствором электролита электропроводностью $\kappa = 0.0136 \text{ См см}^{-1}$ при температуре 22°C и проводилось измерение сопротивления греющей камеры. После этого изменяли длину электродов путем последовательного отсоединения колец 3 и снова замеряли электрическое сопротивление заполненной раствором греющей камеры. Далее, уменьшая длину межэлектродного изолятора путем отсоединения колец изолятора, проводились замеры электрического сопротивления при изменяющейся длине электродов.

После чего, последовательно увеличивая внутренний диаметр межэлектродного изолятора 2, вся серия опытов повторялась для каждого значения диаметра межэлектродного изолятора при изменяющейся длине электродов и изоляторов.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Полученные результаты эксперимента представлены в таблице 1.

Для расчета коэффициента формы можно воспользоваться уравнением [3]:

Таблица 1. Зависимость электрического сопротивления электродной греющей камеры от ее геометрических параметров

Длина изолятора $l_{\text{мэл}}, \text{ см}$	Диаметр изолятора $d_{\text{мэл}}, \text{ см}$	Электрическое сопротивление греющей камеры R , кОм при длине электрода $l_{\text{эл}}, \text{ см}$						
		4.9	4.2	3.5	2.8	2.1	1.4	0.7
26.7	1	2.140	2.140	2.140	2.140	2.140	2.140	2.140
	2	0.510	0.510	0.510	0.510	0.510	0.510	0.510
	3	0.236	0.236	0.236	0.236	0.236	0.236	0.236
	4	0.142	0.142	0.142	0.142	0.142	0.142	0.142
20.2	1	1.690	1.690	1.690	1.690	1.690	1.690	1.690
	2	0.407	0.407	0.407	0.407	0.407	0.407	0.407
	3	0.187	0.187	0.187	0.187	0.187	0.187	0.187
	4	0.112	0.112	0.112	0.112	0.112	0.112	0.112
13.7	1	1.210	1.210	1.210	1.210	1.210	1.210	1.210
	2	0.294	0.294	0.294	0.294	0.294	0.294	0.294
	3	0.137	0.137	0.137	0.137	0.137	0.137	0.137
	4	0.082	0.082	0.082	0.082	0.082	0.082	0.082

$$R = \frac{K_{\Gamma} K_{\Phi} l}{\kappa F}, \quad (1)$$

$$R = \frac{K_{\Phi \text{пр}}}{\kappa}.$$

где R — электрическое сопротивление греющей камеры, кОм;

K_{Γ} — коэффициент газонаполнения, учитывающий влияние неэлектропроводных газовых пузырей, образующихся при кипении раствора;

K_{Φ} — коэффициент формы и расположения электродов, учитывающий геометрию и расположение электродов в греющей камере;

l — расстояние между электродами, равное длине межэлектродного изолятора, см;

κ — удельная электропроводность раствора, См см⁻¹;

F — площадь живого сечения межэлектродного изолятора, размещенного между парой электродов, см².

Однако для трубчатых электродных греющих камер удобнее пользоваться приведенным коэффициентом формы, который можно получить, преобразовав выражение (1) к виду:

$$R = \frac{l K_{\Phi} K_{\Gamma}}{\kappa F} = \frac{K_{\Phi \text{пр}} K_{\Gamma}}{\kappa}, \quad (2)$$

где $K_{\Phi \text{пр}} = K_{\Phi} l / F$ — приведенный коэффициент формы трубчатой электродной группы, см⁻¹.

Учитывая, что эксперимент проводился без газонаполнения электролита, то есть $K_{\Gamma} = 1$, уравнение (2) примет вид:

Влияние геометрических параметров электродов и межэлектродного изолятора на коэффициент формы электродной группы можно представить в виде функциональной зависимости:

$$K_{\Phi \text{пр}} = f\left(\frac{l_{\text{мэл}}}{d_{\text{мэл}}}; \frac{d_{\text{эл}}}{d_{\text{мэл}}}; \frac{l_{\text{эл}}}{d_{\text{мэл}}}\right),$$

где $l_{\text{мэл}}$ — длина межэлектродного изолятора, см;

$d_{\text{мэл}}$ — внутренний диаметр межэлектродного изолятора, см;

$l_{\text{эл}}$ — длина электрода, см;

$d_{\text{эл}}$ — внутренний диаметр электрода, см.

Симплексом $l_{\text{эл}}/d_{\text{мэл}}$ — пренебрегли, т.к. согласно полученным экспериментальным результатам коэффициент формы электродной группы практически не зависит от длины электродов.

ВЫВОДЫ

Решая функциональную зависимость коэффициента формы от соотношений геометрических размеров электродов и изоляторов в исследованном интервале с помощью ПЭВМ получено эмпирическое уравнение следующего вида:

$$K_{\Phi \text{пр}} = 4.535 + 0.459 \left(\frac{l_{\text{мэл}}}{d_{\text{мэл}}} - 7.794 \right) + 2.716 \left(\frac{d_{\text{эл}}}{d_{\text{мэл}}} - 1.950 \right) + 0.285 \left(\frac{l_{\text{мэл}}}{d_{\text{мэл}}} - 7.794 \right) \times \left(\frac{d_{\text{эл}}}{d_{\text{мэл}}} - 1.950 \right) \pm 0.141.$$

Проверка уравнения показала, что экспериментальные и рассчитанные по уравнению результаты в указанных рекомендованных пределах геометрических параметров расходятся не более чем на 4.5%.

Установлено, что с целью выравнивания плотности электрического тока по рабочей поверхности электродов и достижения максимальной удельной мощности греющей камеры при расчете следует соблюдать следующие рекомендуемые соотношения геометрических параметров:

$$4 \leq \frac{l_{\text{мэл}}}{d_{\text{мэл}}} \leq 8; \quad 2 \leq \frac{d_{\text{эл}}}{d_{\text{мэл}}} \leq 4; \quad 2 \leq \frac{l_{\text{эл}}}{d_{\text{мэл}}} \leq 4.$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дивановская А.В., Зарипова Л.Ф., Пищулин В.П., Сваровский А.Я. Разработка технологии получения фтороводорода из гексафторида обедненного урана на сублиматных производствах // Инновационные технологии атомной энергетики и промышленности: Сб. статей, посвященных 55-летию СТИ НИЯУ МИФИ. Северск: СТИ НИЯУ МИФИ, 2014. С. 74–76.
2. Электротермические процессы химической технологии: учеб. пособие для вузов / под. ред. В.А. Ершова. Л.: Химия, 1984. 464 с.
3. Зарипова Л.Ф. Электротермические процессы в производстве фтороводорода и плавиковой кислоты: Дис. ... канд. техн. наук: 05.17.02. Защищена 10.09.99; Утв. 26.10.99; 011824. Томск, 1999. 240 с.: ил. Библиогр.: С. 188–202.

Determination of the Form Coefficient of the Electrode Group of Tubular Heating Chambers

E. A. Khodyakov, L. F. Zaripova, and V. P. Pischulin

*Seversk Technological Institute, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute),
Seversk, Tomskaya oblast, 636036 Russia
e-mail: pischulin@ssti.ru*

Abstract—Electrode heating by an alternating electric current flowing through a solution directly into a heating chamber is the most efficient in chemical industry for processes of heating, evaporation, distillation, and stripping solutions of sulfuric acid and aqueous solutions of fluorosulfuric acid. To heat the electrode, it is appropriate to use heating chambers made as tubular electrodes and insulators axially alternately mounted with different ratios of the sizes of the structural elements. The dependence of the tubular shape of the electrode groups on the aspect ratio of the electrodes and insulators is experimentally studied. An empirical equation is obtained. The relations of the geometrical parameters of the electrode groups are established in order to equalize the electric current density on the working surface of electrodes and to achieve the maximum power density of the heating chamber.

Keywords: fluorosulfuric acid solutions, tubular electrode group, electrodes, insulators, form coefficient, electrical resistance of the heating chamber

REFERENCES

1. Divanovskaya A.V., Zaripova L.F., Pishhulin V.P., Svarovskij A.Y. *Razrabotka tekhnologii polucheniya ftorovodoroda iz geksaftorida obednennogo urana na sublimatnykh proizvodstvax. Sb. statej* [Innovative nuclear energy and technologies industry: Collection of articles STI NRNU MEPhI]. Seversk, STI NRNU MIPhI, 2014, pp. 74–76 (in Russian).
2. Ershov E.A. *Elektrotermicheskie processy ximicheskoy tekhnologii* [Electrothermal processes of chemical technology]. Leningrad, Chemistry Publ., 1984, p. 464 (in Russian).
3. Zaripova L.F., *Elektrotermicheskie procesy v proizvodstve ftorovodoroda i plavikovoy kisloty: Diss. kand. tekhn. nauk* [Electrothermal processes in the production of hydrogen fluoride and hydrofluoric acid. Cand. eng. sci. diss.]. Tomsk, 1999. 240 p. (in Russian).