ВЕСТНИК НАЦИОНАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЯДЕРНОГО УНИВЕРСИТЕТА “МИФИ”, 2017, том 6, № 2, с. 113–116

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

УДК 66.046.1:621.365

# РАЗРАБОТКА КОНФИГУРАЦИИ ЭЛЕКТРОДНОЙ ТРУБЧАТОЙ ГРЕЮЩЕЙ КАМЕРЫ

**© 2017 г. Р. П. Здрайковский, Л. Ф. Зарипова, В. П. Пищулин**

*Северский технологический институт НИЯУ “МИФИ”, Томская область*

*E-mail: pischulin@ssti.ru*

Поступила в редакцию 23.06.2016 г.

Проведены исследования коррозионного износа трубчатых электродов с целью определения форм электродов и изоляторов, обеспечивающих наиболее равномерный износ рабочей поверхности электродов, и разработки конструкций электродных греющих камер для процессов нагревания и кипения сернокислых растворов. Показано, что при проектировании аппаратов, работающих в условиях кипения нагреваемого раствора, рекомендуются цилиндрические трубчатые электроды, выполненные диаметром большим, чем межэлектродные изоляторы и дополнительные электроизоляционные вставки. Для аппаратов, предназначенных для нагревания без кипения раствора, целесообразно применение цилиндрических трубчатых электродов, выполненных большим диаметром, чем межэлектродные изоляторы, и снабженных дополнительным донным участком.

*Ключевые слова:* сернокислые растворы, прямой электрический нагрев, электродная трубчатая греющая камера, конфигурация электродов и изоляторов, массовый показатель коррозии

**DOI:** 10.1134/S2304487X17010126

## ВВЕДЕНИЕ

Серная кислота в химической промышленности играет исключительно важную роль в различных отраслях и применяется в качестве реагента в процессах сернокислотного вскрытия минералов и руд, обеспечивая получение фтороводорода, редких и рассеянных элементов, аффинажа редких металлов, дегидратации при получении этилового эфира, сложных эфиров, сульфирования, алкилирования и других. Для интенсификации процессов сернокислотного вскрытия минерального сырья целесообразно растворы серной кислоты предварительно подогревать до 100–200°С, а при переработке отработанных сернокислых растворов, например, фторсернокислых или хлорсернокислых необходим нагрев до температуры кипения. Традиционные методы нагрева сернокислых растворов водяным насыщенным паром в различных типах теплообменной аппаратуры характеризуются малой интенсивностью процесса, громоздкостью теплообменной аппаратуры, малым сроком эксплуатации вследствие высокой коррозионной активности горячих сернокислых растворов. Наиболее эффективным методом нагревания сернокислых растворов является прямой электрический нагрев переменным электрическим током, пропускаемым непосредственно через раствор в электродной трубчатой греющей камере [1].

Прямой электрический нагрев характеризуется высокой удельной мощностью греющих камер, максимальной интенсивностью процесса, минимальными потерями энергии, плавностью и точностью регулирования теплового и температурного режима, высоким коэффициентом полезного превращения электрической энергии в тепловую, компактностью, простотой конструкции и монтажа электродных греющих камер, возможностью применения коррозионностойких электродных (электродный уголь, силицированный графит) и конструкционных электроизоляционных (фтопопласты Ф-2М, Ф-4) материалов [2].

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Существенную роль в обеспечении реальных преимуществ прямого электрического нагрева в электродных греющих камерах играет конфигурация электродов и межэлектродных изоляторов [3]. При выборе конфигурации и геометрических размеров электродов и изоляторов необходимо равномерное распределение плотности электрического тока по рабочей поверхности электрода, что гарантирует наибольшую надежность и долговечность его работы. Для выявления наиболее приемлемых форм трубчатых электродов и изоляторов были проведены исследования коррозионного профиля некоторых наиболее технологичных в изготовлении электродных групп.

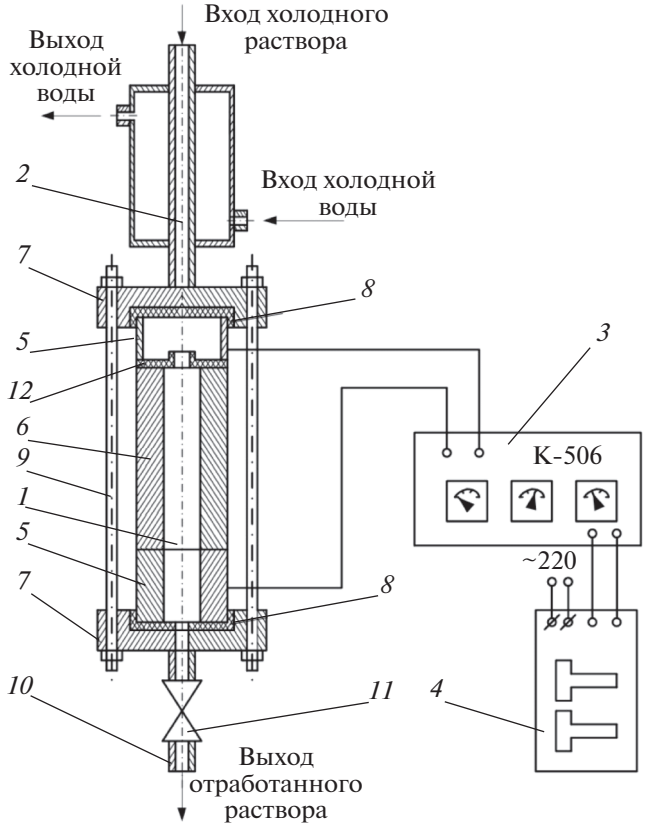



**Рис. 1.** Установка для исследования коррозионного профиля электродных групп: *1* – электродная греющая камера, *2* – холодильник, *3* – измерительный комплект, *4* – автотрансформатор, *5* – электрод, *6* – межэлектродный изолятор, *7* – фланец, *8* – прокладка, *9* – шпилька, *10* – патрубок, *11* – вентиль, *12* – дополнительная электроизоляционная вставка.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследований была собрана установка, изображенная на рис. 1, которая состояла из электродной греющей камеры *1* и холодильника *2*. Для измерения, регулирования и поддержания заданных параметров электрического тока служили измерительный комплект 3 типа К-506 и автотрансформатор *4* типа АОСН-20-220-7594.

Электродная греющая камера *1* состояла из двух электродов *5*, выполненных из стали Ст. 3 и межэлектродного изолятора 6 из фторопласта Ф-4, которые крепились между собой фланцами *7* через электроизоляционные прокладки *8* с помощью шпилек *9*. Снизу электродная камера снабжалась патрубком *10* с вентилем *11* для выхода отработанного раствора серной кислоты. Типы исследуемых электродов приведены в таблице.

Исследованию подвергались электроды *1* равного диаметра с межэлектродным изолятором *5*; электроды *2* большего диаметра, чем изолятор *5*, снабженный плоским донным участком; электрод *3* большего диаметра, чем изолятор, но снабженный дополнительной вставкой *6*, и электрод *4* большего диаметра, чем изолятор без каких-либо дополнительных элементов.

Раствор 28%-ной серной кислоты заливался через верхний патрубок внутренней трубы холодильника до заполнения электродной греющей камеры. Через автотрансформатор *4* в электродную греющую камеру подавался электрический ток. По показаниям измерительного комплекта *3* поддерживалась постоянная плотность тока на электродах путем регулирования напряжения на автотрансформаторе *4*. Образующиеся при кипении раствора пары воды конденсировались и возвращались в греющую камеру, тем самым поддерживалась постоянная концентрация раствора серной кислоты. По истечении 6–10 часов испытания производился визуальный осмотр, промывка, сушка и замер потери массы электродов на электронных механических весах марки ВЛТК-500г-М с точностью до 0.01 мг. По потере массы электрода производился расчет среднего по всей рабочей поверхности электрода массового показателя коррозии $K_M$, г/(см$^2$ мин):

$$K_M = \frac{m}{S\tau},$$

где $m$ – потеря массы электрода за время $\tau$, г;

$S$ – рабочая поверхность электрода, м$^2$;

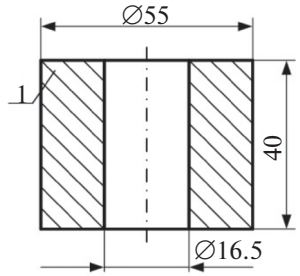
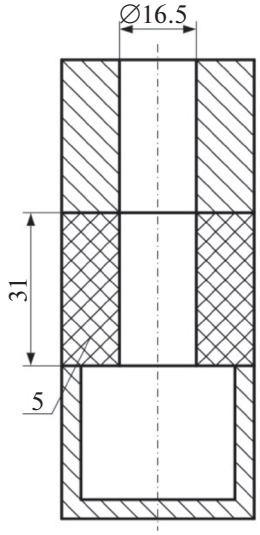
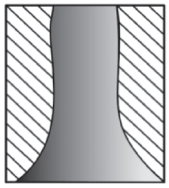
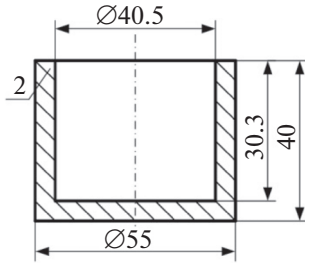
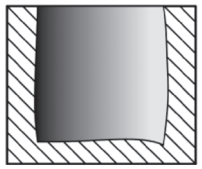
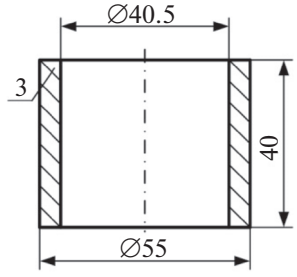
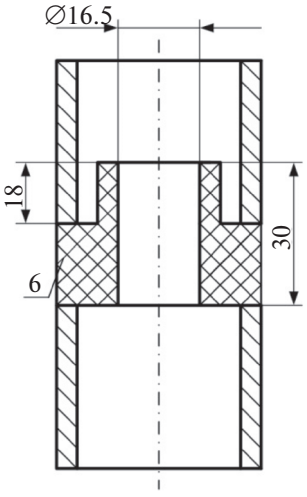
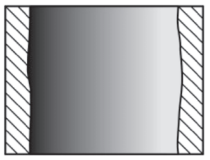
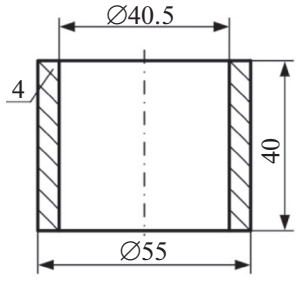
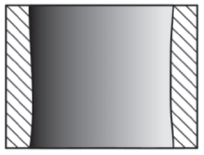
$\tau$ – время проведения испытания, мин.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТА

Как видно из полученных данных, наименьший массовый показатель коррозии у электрода 3, а после испытаний форма его рабочей поверхности осталась практически неизменной, близкой к цилиндрической, что говорит о равномерном распределении плотности тока по всей рабочей поверхности. На 15% больше показатель коррозии у электрода 4, при этом наблюдается заметное отклонение рабочей поверхности от исходной цилиндрической. У электрода 2 показатель коррозии значительно выше, чем у 3 и 4, несмотря на одинаковую среднюю плотность тока при испытаниях.

Из данных таблицы видно, что в случае кипения раствора наибольшая скорость коррозии наблюдается для донного участка электрода, что свидетельствует о преимущественном прохождении электрического тока через него. Кроме того, при кипении раствора от газовых пузырей в первую очередь освобождается центральная часть электрода, ввиду наличия здесь минимального гидравлического сопротивления выхода газа. Поэтому донный участок электрода быстрее освобождается от газовых пузырей, чем его цилиндри-

Результаты исследования коррозионного профиля электродных групп

| Размеры (мм) и форма электродов | Размеры (мм) и форма межэлектродных изоляторов | Плотность тока на электродах, А/см$^2$ | Массовый показатель коррозии, г/(см$^2$ мин) | Коррозионный профиль электрода после испытания |
|---|---|---|---|---|
|  |  | 0.5 | $7 \times 10^{-3}$ |  |
|  | | 0.2 | $5.6 \times 10^{-3}$ |  |
|  |  | 0.2 | $3.3 \times 10^{-3}$ |  |
|  | | 0.2 | $3.8 \times 10^{-3}$ |  |

ческая часть и имеет меньшее электрическое сопротивление, где преимущественно и течет электрический ток. Ввиду такого влияния пузырьков пара на равномерность коррозии рабочей поверхности электрода с донным участком, их не следует применять в греющих камерах, предназначенных для работы в условиях кипения раствора. Однако эти электроды показали высокую их эффективность и равномерность коррозионного износа при нагревании растворов без кипения. Наибольшая глубина коррозии и отклонение рабочей поверхности от исходной цилиндрической наблюдалась у электродов 1, где электрический ток проходит преимущественно по поверхности одной третьей части длины электрода, расположенной у межэлектродного изолятора. Такой электрод может очень быстро выйти из строя ввиду быстрого коррозионного износа граничной части электрода.

## ВЫВОДЫ

При проектировании аппаратов, работающих в условиях кипения нагреваемого раствора, можно рекомендовать цилиндрические трубчатые электроды, выполненные диаметром большим, чем межэлектродные изоляторы. При этом с точки зрения повышения равномерности распределения плотности тока по рабочей поверхности электрода и снижения скорости его коррозии целесообразно применение дополнительных электроизоляционных вставок 5. Для аппаратов, предназначенных для нагревания без кипения раствора, целесообразно применение цилиндрических трубчатых электродов 2, выполненных большим диаметром, чем межэлектродные изоляторы, и снабженных дополнительным донным участком.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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.
2. *Гришин С.Н., Зарипова Л.Ф., Пищулин В.П.* Интенсификация процесса получения фтороводорода классическим методом // Известия вузов. Физика. 2004. Т. 47. № 12. С. 205–209.
3. *Кладиев С.Н., Дементьев Ю.Н., Зарипова Л.Ф., Пищулин В.П.* Влияние предварительного нагрева жидкофазных реагентов на процесс разложения флюорита // Известия Томского политехнического университета. 2009. Т. 315. № 3. С. 32–35.

**Vestnik Natsional'nago issledovatel'skogo yadernogo universiteta "MIFI", 2017, vol. 6, no. 2, pp. 113–116**

# Development of the Configuration of a Tubular Electrode Heating Chamber

**R. P. Zdraykovskiy, 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**—The corrosion deterioration of tubular electrodes has been studied in order to determine the shapes of electrodes and insulators ensuring the most uniform wear of the working surface of electrodes and to develop designs of electrode heating chambers for heating and boiling of sulfuric acid solutions. It have been shown that cylindrical tubular electrodes with a diameter larger than the interelectrode insulators and additional electrical inserts are appropriate in the design of apparatuses operating under boiling conditions of the heated solution. For apparatuses intended for heating without boiling of the solution, it is reasonable to use cylindrical tubular electrodes that have a diameter larger than that of the interelectrode insulators and are equipped with an additional bottom section.

Keywords: sulfuric acid solutions, direct electrical heating, tubular electrode heating chamber, configuration of electrodes and insulators, corrosion mass index

DOI: 10.1134/S2304487X17010126

## REFERENCES

1. Zaripova L.F. *Electrotermicheskie 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.
2. Grishin S.N., Zaripova L.F., Pishhulin V.P. Intensifikaciya processa polucheniya ftorovodoroda klassicheskim metodom [The intensification of the process of obtaining the classical method of hydrogen fluoride] *Izv. Vuzov Fiz.*, 2004, vol. 47, no. 12, pp. 205–209.
3. Kladiev S.N., Dementev U.N., Zaripova L.F., Pishhulin V.P. Vliyanie predvaritelnogo nagreva zhidkofaznyx reagenotv na process razlozheniya flyuorita [Effect of pre-heating the liquid-phase reagents on the decomposition process of fluorite] *Izv. TPU.*, 2009, vol. 135, no. 3, pp. 32–35.