

УДК 66.011

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ТЕПЛОВОГО ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОЛИЗЕРА ДЛЯ ТРЕНАЖЕРА ОПЕРАТОРА АСУ ТП ПРОИЗВОДСТВА ФТОРА

А.В. Белянин, О.В. Нагайцева, Н.В. Ливенцова, С.Н. Ливенцов

Томский политехнический университет

E-mail: ola_ola81@mail.ru

Приводится математическое описание тепловой модели среднетемпературного электролизера (СТЭ-20) для компьютерного тренажера оператора производства фтора. Представлены результаты численного эксперимента, проведенного для оценки качества работы модели в диапазоне значений переменных модели, соответствующему режиму нормальной эксплуатации СТЭ-20.

Ключевые слова:

Тренажер, получение фтора, тепловая модель, модель идеального перемешивания, электролизер.

Key words:

Simulator, fluorine production, thermal model, ideal mixing model, electrolyzer.

Овладение эффективными приемами управления и безопасной эксплуатации технологических процессов электрохимических производств возможно в результате многолетней наработки опыта при эксплуатации или, что наиболее безопасно и выгодно, с помощью специального компьютерного тренажера. Тренажеростроение на сегодняшний день достаточно распространено [1, 2], т. к. его продукты являются обязательным условием работы потенциально опасных производств [3]. Производство фтора в настоящий момент не оснащено тренажером, поэтому поставлена задача разработки компьютерного тренажера оператора производства

фтора для обучения персонала безопасной эксплуатации оборудования и эффективным приемам управления технологическими процессами в типовых, нестандартных и аварийных ситуациях. Первичной задачей при создании такого тренажера является разработка модели, имитирующей процессы, протекающие в аппаратах технологической цепи производства.

Основу технологической схемы производства фтора составляют электролизеры – СТЭ-20, рис. 1, что делает технологические процессы, протекающие в них, ключевыми для моделирования.

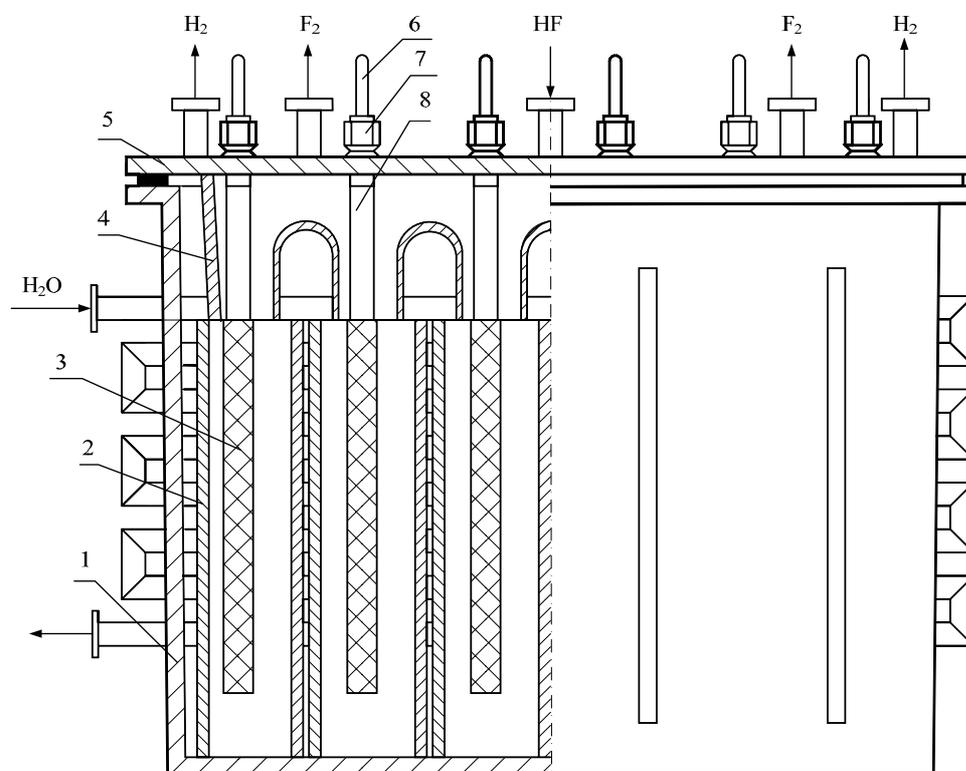
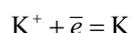
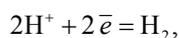


Рис. 1. Чертеж конструкции СТЭ-20: 1) корпус; 2) катодный блок; 3) анод; 4) колокол; 5) крышка; 6) анодный токоподвод; 7) сальниковое уплотнение; 8) сальник

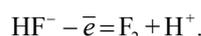
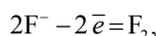
Электролизер СТЭ-20 представляет собой прямоугольную ванну, разделенную на секции. Каждая секция содержит катодные ячейки, в которые помещается анод. Конструкционный материал анода – прессованный уголь, катода – сталь. В качестве электролита используется раствор трифторида калия $KF \cdot 2HF$, который содержит анионы F^- , HF_2^- и катионы K^+ и H^+ . Тепло при электролизе отводится с помощью воды, которая подается в трубчатый теплообменник, распределенный между катодными ячейками внутри аппарата [4].

При пропускании постоянного электрического тока на электродах электролизера протекают электрохимические реакции; на аноде выделяется фтор, на катоде – водород, которые затем удаляются из электролизера через патрубки. Преобладающие электрохимические реакции [5]:

Катодные реакции:



Анодные реакции:



Суммарная реакция:

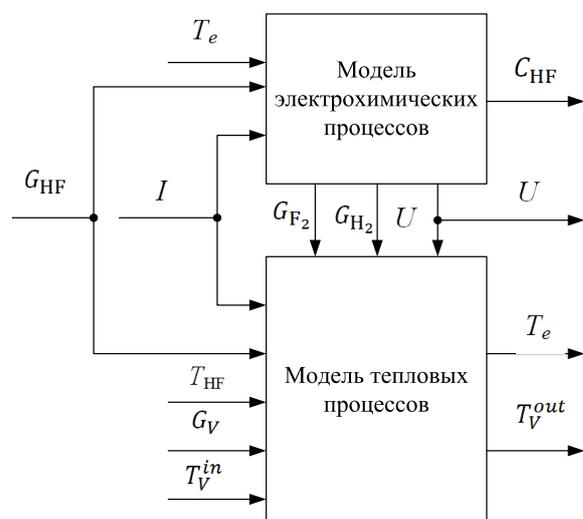


Рис. 2. Упрощенная структурная схема имитационной модели СТЭ-20: G_{HF} – расход фтористого водорода, $m^3/ч$; I – сила электрического тока, kA ; T_{HF} – температура HF на входе в электролизер, $^{\circ}C$; G_V – расход охлаждающей воды, $m^3/ч$; C_{HF} – концентрация HF в электролите, $мас. \%$; G_{F_2} и G_{H_2} – расход анодного газа и водорода на выходе электролизера, $m^3/ч$; U – общее падение напряжения на электролизере, B ; T_e – температура электролита, $^{\circ}C$; T_V^{in} , T_V^{out} – температура охлаждающей воды на входе и на выходе трубчатки охлаждения, $^{\circ}C$

На данный момент сотрудниками кафедры электроники и автоматики физических установок физико-технического факультета ТПУ ведется раз-

работка модели, имитирующей технологические процессы электролизера СТЭ-20. Упрощенная структурная схема модели приведена на рис. 2. Она состоит из двух базовых элементов, взаимодействующих друг с другом: модели электрохимических процессов и модели тепловых процессов.

Цель данной работы заключалась в разработке тепловой модели электролизера СТЭ-20 при постоянной концентрации фтористого водорода в электролите.

На основе анализа теоретических основ электролиза и опыта эксплуатации аппаратов СТЭ-20, а также требований к модели для целей тренажера были выбраны входные, выходные и внутренние переменные модели. В качестве входных переменных были выбраны: G_V – расход охлаждающей воды, $m^3/ч$; T_V^{in} – температура охлаждающей воды на входе теплообменника, $^{\circ}C$; I – сила электрического тока, kA , пропускаемого через электроды электролизера. В качестве выходных переменных выбраны: T_e – температура электролита, $^{\circ}C$; U – общее падение напряжения на электролизере, B ; T_V^{out} – температура охлаждающей воды на выходе теплообменника, $^{\circ}C$. Переменные, определяющие условия протекания процесса: c_V , c_e – теплоемкости охлаждающей воды и электролита (KH_2HF) соответственно, $Dж/(кг \cdot ^{\circ}C)$; F – площадь поверхности теплообмена, m^2 ; a – коэффициент теплоотдачи, $Вт/(m^2 \cdot ^{\circ}C)$; M_e – масса электролита, $кг$; C_{HF} – концентрация безводного фтористого водорода в электролите, $мас. \%$. Структурная схема тепловой модели СТЭ-20 приведена на рис. 3.

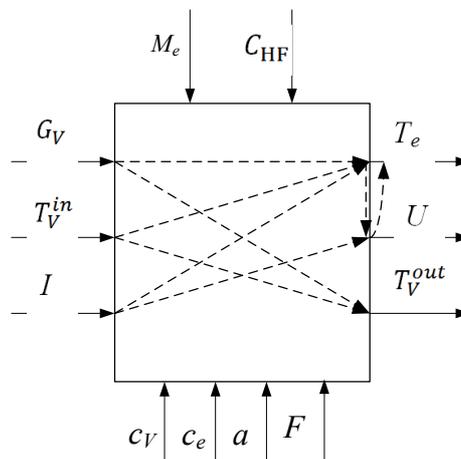


Рис. 3. Структурная схема тепловой модели СТЭ-20

При моделировании приняты допущения:

1. Концентрация безводного фтористого водорода в электролите поддерживается постоянной, а поскольку обеднение электролита при электролизе в основном происходит по фтористому водороду, то и массу электролита также принимаем постоянной. Теплоемкость охлаждающей воды и коэффициент теплоотдачи со стороны электролита принимаем неизменными.

2. Пренебрегаем: потерями теплоты в окружающую среду, теплотой отводимой с удаляемыми газами, теплотой входящего HF, теплотой побочных химических реакций и испарения электролита и других факторов в силу их незначительности по сравнению с основными источниками и приемниками тепла.
3. Наблюдения электролиза в аппаратах с прозрачными стенками показали, что процесс протекает бурно, с интенсивным перемешиванием. В этом случае с учетом постоянства скорости потока охлаждающей воды в трубчатке теплообменника в качестве гидродинамической модели потока температура электролита может быть принята модель идеального перемешивания.
4. Для потока температура охлаждающей воды в качестве гидродинамической модели может быть принята модель идеального вытеснения, т. к. отношение диаметра к длине трубки превышает 100 [6].

Далее были установлены взаимосвязи между переменными модели. Для этого были составлены уравнения теплового баланса по электролиту и охлаждающей воде с учетом принятых допущений, а также были использованы некоторые зависимости, полученные экспериментально для исследуемого электролизера.

Выражение соответствует уравнению теплового баланса по электролиту:

$$\frac{dQ_e}{dt} = Q_l - Q_v,$$

где Q_e – тепло, хранимое электролитом, Дж, Q_l – джоулево тепло, Дж, Q_v – тепло, уносимое хладагентом, Дж.

Тепло, хранимое электролитом:

$$Q_e = M_e c_e (T_e - T_0),$$

где T_0 – начальная температура электролита, К; c_e – теплоемкость электролита (КН·2HF), кДж/кг·°С, которая рассчитывается по эмпирической зависимости [7]:

$$c_e = -888,3 + 7,501 \cdot T_e + 46,39 \cdot C_{HF}.$$

Выделение джоулево тепла при электролизе от прохождения электрического тока участвуют все падения напряжения за исключением напряжения разложения. Энергия с участием напряжения разложения идет на процесс электролитической диссоциации [5] поэтому джоулево тепло рассчитывается по соотношению:

$$Q_l = I \cdot (U - E_p),$$

где E_p – напряжения разложения, В.

Общее падение напряжения на электролизере определяется эмпирической зависимостью [4]:

$$U = U_o + \frac{a \cdot I}{C_{HF} - b + c \cdot T_e},$$

где a, b, c – коэффициенты, зависящие от конструкции электролизера и состава электролита.

Количество тепла, отводимое охлаждающей водой Q_v , можно определить следующим образом:

$$Q_v = G_v \cdot c_v \cdot (T_v^{out} - T_v^{in}).$$

Температура воды на выходе теплообменника может быть получена по уравнению теплового баланса охлаждающей воды:

$$c_v \cdot S \cdot \left(\frac{\partial T_v}{\partial t} + G_v \cdot \frac{\partial T_v}{\partial l} \right) = \alpha \cdot \pi \cdot D \cdot (T_e - T_v),$$

где S – площадь поперечного сечения трубки теплообменника, м²; T_v – температура охлаждающей воды, К; D – диаметр трубки теплообменника, м.

Изменение количества теплоты охлаждающей воды обусловлено уносом теплоты потоком охлаждающей воды при ее движении вдоль трубки теплообменника и теплотой получаемой от электролита в результате теплопроводности, подчиняющейся закономерности теплообмена через цилиндрическую стенку.

На основе составленных уравнений была разработана схема моделирования, рис. 4.

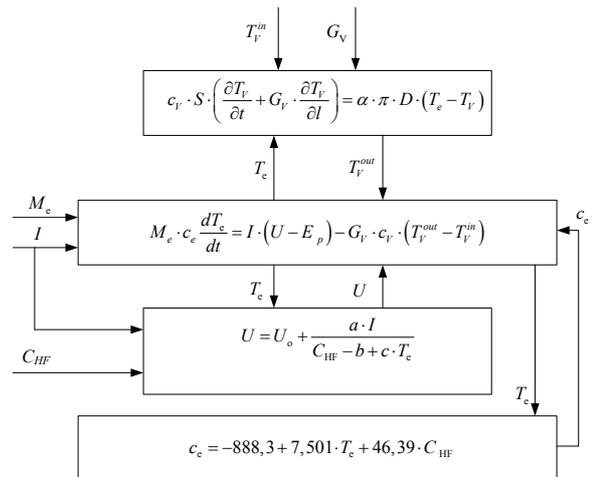


Рис. 4. Схема моделирования теплового контура электролизера

Для оценки качественной работы модели в диапазоне изменения значений входных переменных, соответствующему режиму нормальной эксплуатации СТЭ-20, был проведен численный эксперимент. Моделирование осуществлялось в среде Matlab 7 с применением метода конечных разностей для решения дифференциальных уравнений. Было принято следующее допущение: для фиксированного значения времени $d\tau$ внутри каждого временного интервала температурное поле потока охлаждающей воды является функцией, зависящей только от длины трубки. Результаты моделирования приведены на рис. 5. На рис. 5, а, показана реакция температуры электролита на изменение силы электрического тока при постоянном расходе

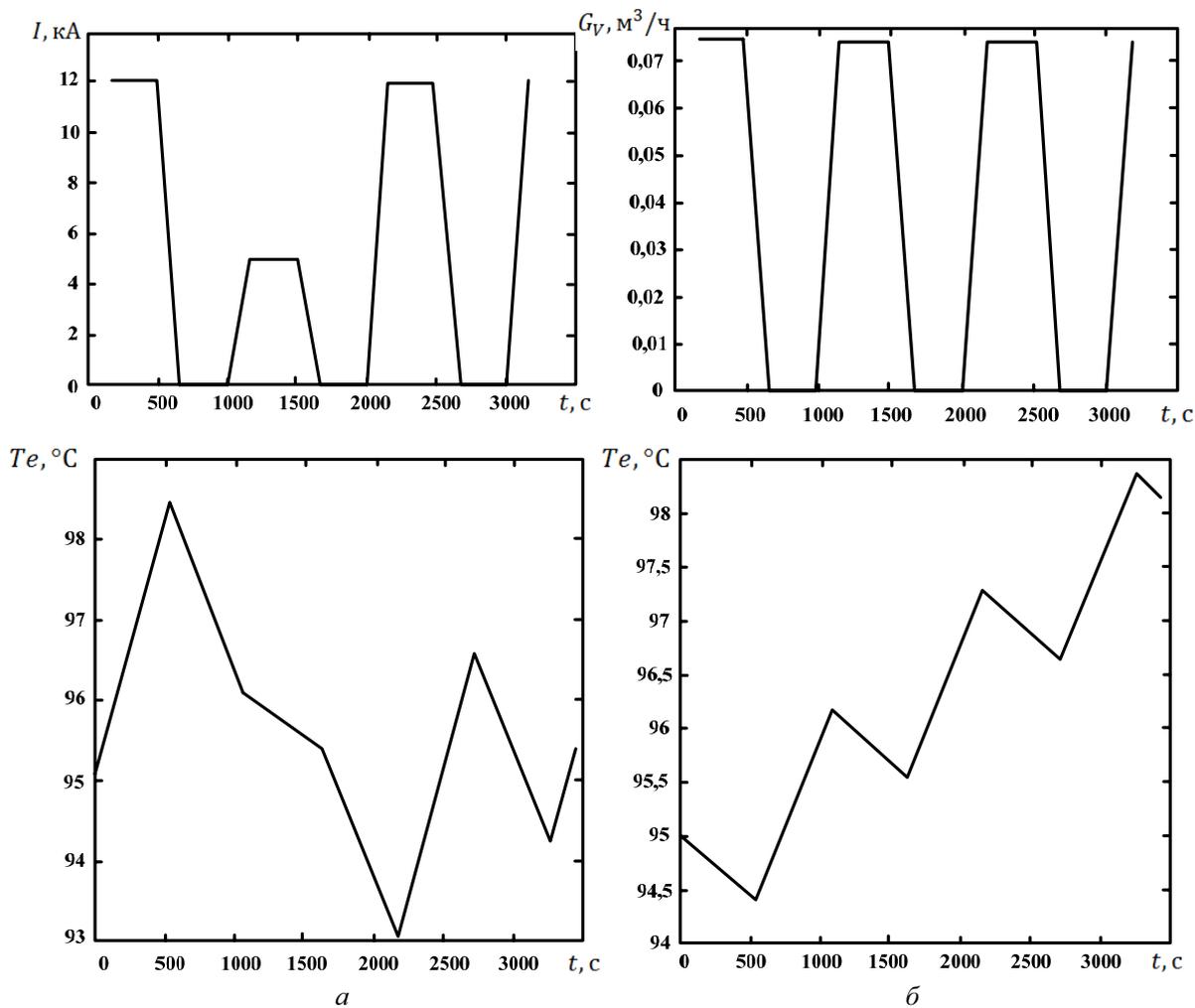


Рис. 5. Результаты моделирования теплового контура электролизера. Реакция модели на изменение: а) силы тока; б) расхода охлаждающей воды

охлаждающей воды, на рис. 5, б, — приведено поведение температуры электролита на изменение расхода охлаждающей воды при постоянной силе электрического тока. При росте токовой нагрузки и постоянном расходе воды наблюдается рост температуры электролита, при падении — понижение температуры электролита, при изменении расхода воды и постоянной силе тока наблюдается обратная тенденция, что можно проследить по приведенным графикам на рис. 5. Такое же поведение характерно для реального процесса, рис. 6, на котором показано изменение температуры электролита, измеренное при изменении расхода охлаждающей воды.

Подобное поведение характерно для реального процесса, как видно по рис. 6, на котором показаны изменения температуры электролита, измеренные при изменении расхода охлаждающей воды и полученные по модели, при одинаковом изменении силы тока. Экспериментальные данные температуры электролита, используемые для сравнения изменения температуры электролита с моделью,

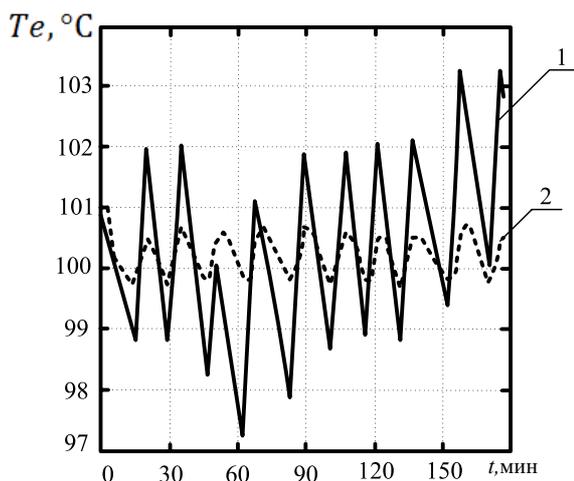


Рис. 6. Проверка математической модели на адекватность. Данные: 1) модельные; 2) экспериментальные

получены при изменении положения клапана охлаждающей воды и силы тока. Расход и температура воды на входе и выходе трубки охлаждения не

измеряются, по причине отсутствия соответствующих датчиков. Значение расхода охлаждающей воды, используемое при моделировании, было рассчитано по степени открытия клапана, в соответствии с номинальным расходом при полностью открытом клапане, но, следует отметить, что при изменении давления подачи воды, что наблюдается на производстве постоянно, такие расчеты являются некорректными для проверки адекватности модели.

Для проверки применимости разработанной математической модели для описания реального объекта будут проведены экспериментальные исследования на специально подготовленном аппарате СТЭ-20 с подключенными датчиками недостающих измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дозорцев В.М., Кнеллер Д.В. Типовой компьютерный тренажерный комплекс для обучения операторов ТП // Автоматизация в промышленности. – 2003. – № 2. – С. 4–9.
2. Дозорцев В.М., Кнеллер Д.В. Технологические компьютерные тренажеры // Промышленные контроллеры и АСУ. – 2004. – № 12. – С. 1–13.
3. Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств [Текст]: ПБ 09-540-03: утв. Ростехнадзором России 05.05.2003 – СПб.: ДЕАН, 2003. – 112 с. – ISBN 5-93630-334-9.
4. Ливенцова Н.В., Ливенцов С.Н. Исследование алгоритма определения состава электролита в процессе получения техни-

Выводы

Получено математическое описание теплового процесса в электролизере СТЭ-20 для компьютерного тренажера оператора производства фтора. Представлены результаты численного эксперимента, проведенного для цели оценки качественной работы модели в диапазоне значений переменных модели, соответствующему режиму нормальной эксплуатации СТЭ-20. Результаты численных экспериментов позволяют использовать динамическую модель теплового процесса для дальнейшей разработки теплового контура тренажера, включающего, кроме модели теплового процесса, систему автоматического управления, модели измерительных приборов, регулирующих органов и прочего вспомогательного оборудования.

- ческого фтора в производственных условиях // Высокие технологии, фундаментальные и прикладные исследования, образование. Сб. трудов V Междунар. науч.-практич. конф. / Под ред. А.П. Кудинова. – СПб., 2008. – Т. 12. – С. 469–470.
5. Галкин Н.П., Крутиков А.Б. Технология фтора. – М.: Атомиздат, 1968. – 188 с.
6. Кафаров В.В. Методы кибернетики в химии и химической технологии: 4-е изд., перераб., доп. – М.: Химия, 1985. – 448 с.
7. Шашкин Б.Ф., Тураев В.Н., Соловьев А.И., Карлин С.В. Определение теплоемкости расплава трифторида калия // Тезисы докл. IX Всесоюз. симпоз. по химии неорганич. фторидов. – Череповец, 1990. – Ч. 2. – С. 63–67.

Поступила 11.09.2009 г.