

УДК 621.317.7.087.92

МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОЕМКОСТНОГО ДАТЧИКА СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ВОЗДУХОРАЗДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

Иванов А.В., Хорват А.В., Назаренко И.Н.

ФГКВОУ ВО «Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж, e-mail: alexey-khorvat@yandex.ru

В статье рассмотрена возможность применения электроемкостных датчиков гребенчатого типа в воздуходелительных установках. Предложен способ увеличения производительности воздуходелительных установок и повышение безопасности при добыче жидкого азота и кислорода. Проанализирован состав воздуха, используемый в низкотемпературной ректификации для получения азота и кислорода, содержащий молекулярную и аэрозольную составляющую, особенно углеводородного ряда. Накопление горючих примесей потенциально опасно для нормального функционирования воздуходелительных установок. Анализ литературных источников показал, что взрывы воздуходелительных установок связаны с накоплением углеводородов. Предлагается разработать систему мониторинга накопления примесей углеводородного ряда в виде твердой фазы в кубовой жидкости, основанную на электроемкостных датчиках гребенчатого типа, с целью повышения эффективной работы воздуходелительных установок и предупреждения возникновения нештатных ситуаций, связанных с взрывопожаробезопасностью.

Ключевые слова: электроемкость, емкостной датчик, кислород, азот, воздуходелительная установка, взрывобезопасность, взрыв

MODEL CAPACITIVE SENSORS MONITORING SYSTEM OF AIR SEPARATION PLANTS

Ivanov A.V., Khorvat A.V., Nazarenko I.N.

*Federal State Official Military Educational Institution of Higher Education
«Military Educational and Scientific Center of the Air Forces N.E. Zhukovsky
and Y.A. Gagarin Air Force Academy», Voronezh, e-mail: alexey-khorvat@yandex.ru*

The article discusses the possibility of using digital capacitive sensors ti-pa in air separation plants. A method for increasing the productivity of air-separation units and increase security at the production of liquid nitrogen and oxygen. Analyzed the composition of the air used in cryogenic rectification to produce nitrogen and oxygen molecular and aerosol containing component, particularly a number of carbon. The accumulation of combustible impurities is potentially dangerous for the proper functioning of air separation plants. The analysis of blasts of air separation plants, associated with the accumulation of hydrocarbons. It is proposed to develop a system for monitoring the accumulation of hydrocarbon-series impurities in the form of solids in the bottom liquid, based on capacitive sensors comb type, to improve the efficiency of the air-separation units and prevention of emergency situations related to the explosion and fire.

Keywords: electrical capacitance, capacitive sensor, oxygen, nitrogen, air separation unit, explosion, explosion

Основные продукты разделения воздуха (кислород, азот) до сих пор получают с использованием процессов и оборудования криогенной техники. Воздух, используемый для разделения, может содержать следующие компоненты, нежелательные (опасные) для нормального функционирования воздуходелительных установок (ВРУ):

1) молекулы, способные к окислению кислородом в газообразном и/или жидком виде (предельные, непредельные, ароматические углеводороды и их кислород-, азот-, серосодержащие производные, сероуглерод и др.);

2) молекулы более активных окислителей, чем молекулярный кислород O_2 (озон O_3 , органические перекисные соединения, оксиды азота NO , NO_2 и др.);

3) молекулы веществ, вызывающих химическую коррозию внутренних поверхно-

стей аппаратуры (для алюминия это кислотные оксиды, кислоты, аммиак и др.);

4) молекулы негорючих веществ, осаждающиеся на металлических поверхностях при низких температурах, ухудшающие теплообмен и массоперенос газов (в англоязычной литературе *plugging contaminants*, «закупоривающие» загрязнения): H_2O , CO_2 , N_2O ;

5) аэрозольные частицы, способные к окислению кислородом: мелкодисперсный элементарный углерод ЭУ (черная сажа или *black carbon BC*) и так называемый органический углерод ОУ (*organic carbon OC*) – продукты неполного сгорания растительности, жидкого и твердого углеводородного топлива.

Пятый пункт имеет прямое отношение к пожаро- и взрывоопасности в ходе эксплуатации ВРУ.

Содержаний опасных углеродсодержащих примесей в жидком кислороде [5]

Наименование вещества	Предельная концентрация, мг/дм ³ жидкости (в пересчете на углерод)
Ацетилен	0,22
Высшие ацетиленовые углеводороды	0,15
Предельные и непредельные углеводороды с малой растворимостью в жидком кислороде, группа C ₅ -C ₆ и более тяжелые, в сумме	1,0
Предельные и непредельные углеводороды, имеющие среднюю растворимость в жидком кислороде, группа C ₃ -C ₄ (пропилен, изобутан, бутен-1, н-бутан, изобутилен), в сумме	11
Этан	200
Этилен	25
Пропан	15
Предельные и непредельные углеводороды, хорошо растворимые в жидком кислороде, группа C ₁ -C ₃ (метан, этан, этилен и пропан), в сумме:	
а) в жидком кислороде из конденсаторов, последних по ходу жидкости, и в первичном криптоновом концентрате при отборе проб на анализ не реже, чем через 24 ч	430
б) в жидком кислороде из конденсаторов, последних по ходу жидкости, и в первичном криптоновом концентрате при отборе проб на анализ не реже, чем через 2 ч	645
в) в первичном криптоновом концентрате после теплого испарителя при наличии испарителя-конденсатора витого типа и непрерывном контроле за содержанием метана или суммы углеводородов:	
– метан	6800
– сумма углеводородов	7600
Сероуглерод, мг/дм ³	0,12
Масло, мг/дм ³	0,4

В настоящее время с целью прогнозирования и предупреждения аварийных ситуаций в процессе разделения воздуха могут проводиться следующие замеры:

- 1) контроль содержания опасных веществ в конечных криопродуктах;
- 2) контроль содержания опасных веществ в кубовой жидкости;
- 3) мониторинг состава воздуха, поступающего в воздухозаборник.

Контроль содержания опасных веществ в конечных криопродуктах, повсеместно использующийся в настоящее время, сам по себе важен и нужен, но не дает целостной картины эффективности очистки воздуха перед разделением на компоненты и динамики накопления взрывопожароопасных веществ внутри ВРУ.

Нормативы содержания взрывоопасных примесей в жидком кислороде, регламентированные в России и за рубежом, установлены в определенном соотношении к пределу растворимости примесей в жидком кислороде и представлены в таблице [1, 6].

Как видно из таблицы, все эти вещества (кроме сероуглерода CS₂) являются органическими и относятся к гомологическим рядам предельных и непредельных углеводородов. По крупным воздухоразделительным установкам стран-участниц

EIGA и CGA (Европейская и Североамериканская ассоциации производителей технических газов) известно следующее число взрывов, связанных с накоплением углеводородов [4, 6]:

- сильные взрывы, сопровождавшиеся разрушением не только установки, но и соседних сооружений, – 3;
- локальные взрывы, последствия которых не выходили за пределы кожуха блока разделения, – 8;
- микровзрывы, приводившие к появлению неплотностей в парогенерирующих каналах испарителей кислорода, – 36.

Данная статистическая выборка охватывает промежуток 1964–2013 гг.

В нормативных документах обычно устанавливаются определенные концентрации примесей (примерно 0,5 от предельной), для достижения которых допускается нормальная работа установки. В противном случае предусматривается повышение эффективности работы средств очистки, увеличение проточности, выявление и устранение источников повышенной загрязненности воздуха и реализация других мероприятий. Если концентрация примесей в жидком кислороде превышает норму, то предписывается остановка агрегата и проведение полного его отогрева [5].

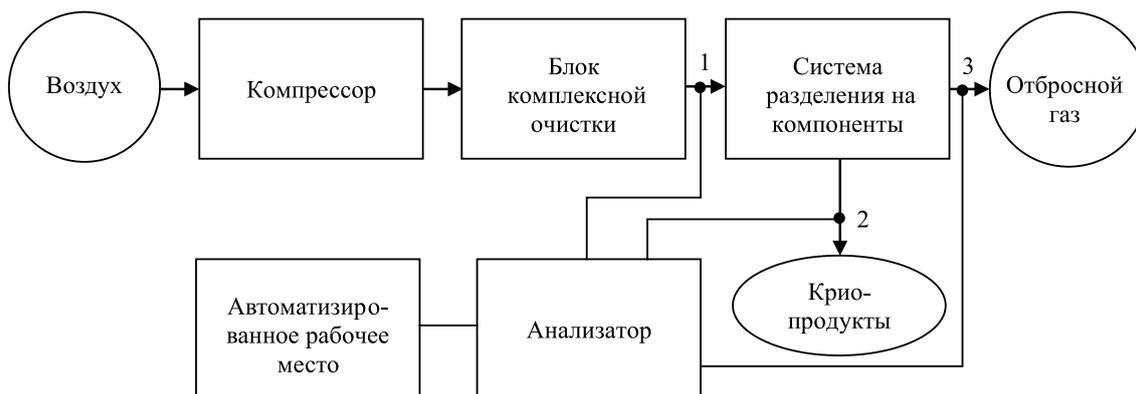
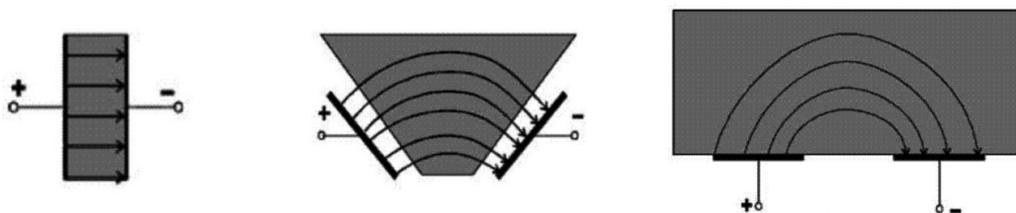


Рис. 1. Принципиальная схема системы автоматического мониторинга воздуходелительной установки. 1, 2, 3 – места отбора проб для анализа на газовом хроматографе или места установки блоков датчиков



а) плоскопараллельного типа б) с разведенными электродами в) с электродами в одной плоскости

Рис. 2. Поток силовых линий электрического поля между электродами конденсатора

Для повышения эффективности и обеспечения взрывопожаробезопасности эксплуатации ВРУ в неблагоприятной экологической обстановке, а также для осуществления мониторинга очистки воздуха, необходимо применить систему мониторинга воздуходелительной установки, как показано на рис. 1.

Одним из средств повышения безопасности использования ВРУ является оснащение криоустановок средствами контроля наличия твердых частиц как в объеме жидких веществ, так и на внутренних поверхностях, контактирующих с газовой фазой, обогащенной кислородом. Сравнительный анализ и экспериментальные исследования ряда возможных методов контроля (ультразвуковых, оптических, весовых и пр.) толщины осадков микропримесей показали преимущества емкостного метода, как показано на рис. 2.

В настоящее время существует множество типов и конструкций плоских измерительных датчиков, а также методов

и способов измерения. Но анализ существующих датчиков показал, что принцип работы у всех основан на проникновении линий электрического поля в основную часть плотно прилегающего материала, способного накапливать электрический заряд, к поверхности датчика. Таким образом, емкость датчика зависит от диэлектрической проницаемости и толщины прилегающего материала и геометрических параметров электродов [2].

Плоский измерительный датчик состоит из электродов гребенчатой формы с дополнительным экраном и предназначен для измерения тонких диэлектрических слоев, как показано на рис. 3.

Если предположить, что три однородных слоя, изображенных на рис. 3, не несут свободных зарядов, то для каждого из них справедливо уравнение Лапласа

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = 0. \quad (1)$$

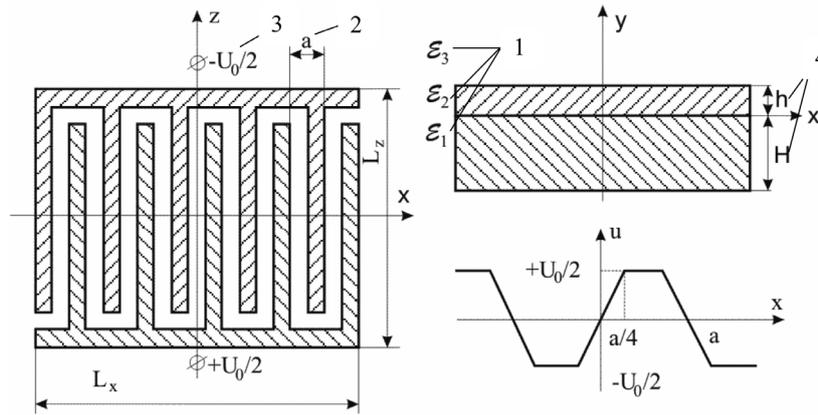


Рис. 3. Плоский конденсатор с электродами гребенчатой формы: вид сверху, вид сбоку и форма электрического потенциала в системе [3]. 1 – диэлектрическая проницаемость подложки, контролируемого слоя и внешней среды соответственно; 2 – период чередования ламелей; 3 – половина разности потенциалов разноименных заряженных ламелей; 4 – толщина контролируемого слоя и толщина подложки

Емкость преобразователя определяется разностью потенциалов между соседними ламелями и напряженностью электрического поля:

$$C = \frac{\epsilon_0}{U_0} \iiint \epsilon(x, y, z) E(x, y)^2 dx dy dz, \quad (2)$$

где U_0 – разность потенциалов, $\epsilon(x, y, z)$ – диэлектрическая проницаемость окружающей среды, $E(x, y)$ – напряженность электрического поля.

Если пренебречь краевыми эффектами, решение данной задачи [3] можно представить в виде бесконечного ряда по k :

$$C(h) = C^* \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{(2k+1)^3} \left\{ \epsilon_1 + \epsilon_2 \frac{\exp\left(\frac{2\pi(2k+1)h}{a}\right) - q}{\exp\left(\frac{2\pi(2k+1)h}{a}\right) + q} \right\}, \quad (3)$$

где $C^* = \frac{16\epsilon_0 S}{\pi^3 a}$, $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная, $S = L_x L_z$ – площадь датчика, h – толщина контролируемого слоя, a – период чередования ламелей; $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ – диэлектрические проницаемости подложки, контролируемого слоя и внешней среды.

Этот ряд быстро сходится, а числовой ряд $\sum_{k=0}^{\infty} (2k+1)^{-3}$ выражается через дзета-функцию Римана, и его сумма равна 1,051.

Окончательное выражение для емкости:

$$C(h) = C^* \left\{ 1,051\epsilon_1 + \epsilon_2 \frac{\exp\left(\frac{2\pi h}{a}\right) - q}{\exp\left(\frac{2\pi h}{a}\right) + q} \right\}, \quad (4)$$

где $q = \frac{\epsilon_2 - \epsilon_3}{\epsilon_2 + \epsilon_3}$.

Максимальное относительное изменение емкости можно найти из простого соотношения:

$$\frac{C_{\max} - C_0}{C_0} = \frac{\epsilon_2 - \epsilon_3}{\epsilon_1 + \epsilon_2}. \quad (5)$$

Данный метод предназначен для измерения емкости в статической системе, и, как было указано выше, в выражении (4) пренебрегаются краевые эффекты. Основной проблемой решения задачи, связанной с измерениями емкости (определения выпадения осадка), является динамичность системы. Как известно, при работе ВРУ, в узлах и агрегатах происходит постоянное движение криожидкости, что добавляет задачу определения мест накопления осадка в виде

твердой фазы. Для нивелирования краевых эффектов, необходимо изменение конструкции электроемкостного датчика.

Выводы

Воздух, используемый для разделения в ВРУ, содержит большое количество примесей, опасных при взаимодействии с жидким азотом и кислородом. Как показал анализ литературных источников, наиболее опасными являются примеси углеродородного ряда. Такие примеси, осаждаясь в криожидкости, образуют твердую фазу и накапливаясь, приводят к возгоранию и, впоследствии, к взрыву. Таким образом, необходима разработка и оснащение системой мониторинга работоспособности ВРУ, основанной на измерении электроемкостным методом при помощи плоских измерительных датчиков гребенчатого типа, что повысит эффективность и обеспечит взрывопожаробезопасную эксплуатацию воздуходелительных установок. Данную

задачу необходимо решить совокупностью математических моделей: «определения осадка в кубовой жидкости» и «определения наиболее вероятных мест накопления твердой фазы».

Список литературы

1. ГОСТ 6331-78. Кислород жидкий технический и медицинский. Технические условия. – Взамен ГОСТ 6331-68, введ. 01.01.80. – Москва: Изд-во стандартов, 1979. – 25 с.
2. Жежора А.А. Электроемкостные преобразователи и методы их расчета. – Минск: РУП Издательский дом «Белорусская наука», 2008.
3. Курбатов В.М., Пресняков Ю.П. Емкость конденсатора с электродами гребенчатой формы // Электричество. – 1975. – № 6. – С. 84–86.
4. Файнштейн В.И. Кислород, азот, аргон – безопасность при производстве и применении. – М.: Интермет-Инжиниринг, 2008. – 187 с.
5. Файнштейн В.И. Оценка степени приближения к опасным условиям работы конденсаторов-испарителей воздуходелительных установок // Технические газы. – 2009. – № 5. – С. 67–70.
6. Safe Practices Guide for Cryogenic Air Separation Plants. EIGADoc.147-13. – 2013. – 68 p.