

**Рухов Артем Викторович**

Rukhov Artem Viktorovich

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего  
профессионального образования «Тамбовский государственный технический университет»  
Federal state budgetary educational institution of the higher vocational training  
«Tambov state technical university»

Старший преподаватель / The senior teacher

Кандидат технических наук

E-Mail: artem1@inbox.ru

**Аладинский Алексей Александрович**

Aladinskij Aleksey Aleksandrovich

ООО «НаноТехЦентр»

NanoTechCentr Ltd.

Ведущий специалист / The leading expert

E-Mail: aaladin@rambler.ru

05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий

## **Разработка испарителя жидких и сжиженных углеродсодержащих веществ для технологической схемы производства углеродных волокнистых наноматериалов**

Creation of the evaporator liquid containing carbon substances for the technological  
circuit design of manufacture of the carbon fibrous nanomaterials

**Аннотация:** Представлена математическая модель процесса испарения жидких и сжиженных углеродсодержащих веществ стадии подготовки сырья производства углеродных наноматериалов. Поставлена и решена оптимизационная задача проектирования испарителя углеродсодержащих веществ.

**The Abstract:** The mathematical model of process of transpiration of liquid substances of a stage of preparation of raw materials of manufacture containing carbon nanomaterials is presented. The optimising problem of designing of the evaporator of substances containing carbon is put and solved.

**Ключевые слова:** Углеродные нанотрубки, углеродные нановолокна, нанотехнология, математическое моделирование, оптимальное проектирование оборудования.

**Keywords:** Carbon nanotubes, carbon nanofibres, nanotechnology, mathematical modeling, optimising equipment designing.

\*\*\*

В настоящее время одним из направлений снижения себестоимости *углеродных волокнистых наноматериалов (УВНМ)* представляется повышение гибкости технологических схем их производства. Например, возможность применения жидких углеродсодержащих веществ в качестве сырья получения УВНМ [1-6]. Так же необходимость применения испарителей углеродсодержащих веществ может возникнуть при использовании сжиженных смесей сложного состава, для стабилизации соотношения компонентов.

В рамках разработанной методики создания аппаратного оформления производства УВНМ [7] необходима поставка локальной задачи оптимального проектирования испарителя

жидких и сжиженных углеродсодержащих веществ. Задача проектирования испарителя может быть решена с использованием методов математического моделирования.

В качестве конструкции испарителя выбран аппарат с цилиндрической обечайкой обернутой плоским электрическим нагревателем и слоем тепловой изоляции.

Сделаем следующие допущения:

1. Процесс испарения жидких и сжиженных углеводородов стационарный.
2. Градиент температур в кипящей жидкости и по длине испарителя отсутствует.
3. Теплофизические характеристики стенки испарителя, нагревателя и тепловой изоляции в отдельности изотропны.

В качестве варьируемых параметров при проектировании испарителя жидких и сжиженных углеродсодержащих веществ системы подготовки исходного сырья производства УВНМ определены следующие характеристики: диаметр обечайки испарителя,  $d$ ; толщина стенки обечайки испарителя,  $\delta$ ; толщина стенки тепловой изоляции испарителя,  $\delta_n$ ; температура внутренней стенки испарителя,  $t_1(R_0)$ :

$$\{d, \delta, \delta_n, t_1(R_0)\} \quad (1)$$

При проектировании испарителя жидких и сжиженных углеродсодержащих веществ определена себестоимость испарения единицы массы углеродсодержащего вещества.

$$I = \frac{1}{G_{\text{ж}}} \left( Q_{\text{Ц}_3} + \frac{1}{\tau_3} \left( \pi \rho_{\text{Мс}} L_{\text{Ц}_{\text{Мс}}} (d \delta - \delta^2) + \pi L_{\text{Ц}_{\text{ти}}} (d \delta_n + 4a \delta_n + \delta_n^2) + Q_{\text{Ц}_n} \right) \right) \quad (2)$$

Изменение температурного поля трехслойного не ограниченного цилиндра (стенка испарителя, слой электрического нагревателя и слой тепловой изоляции):

$$\frac{d^2 t_1(x)}{dx^2} + \frac{1}{x} \frac{dt_1(x)}{dx} = 0; \quad R_0 \leq x \leq R_1; \quad (3)$$

$$a_2 \left( \frac{d^2 t_2(x)}{dx^2} + \frac{1}{x} \frac{dt_2(x)}{dx} \right) + \frac{q_{\text{н}}}{\rho_2 c_2} = 0; \quad R_1 \leq x \leq R_2; \quad (4)$$

$a_2 = \frac{\lambda_2}{c_2 \rho_2}$  – температуропроводность материала нагревателя.

$$\frac{d^2 t_3(x)}{dx^2} + \frac{1}{x} \frac{dt_3(x)}{dx} = 0; \quad R_2 \leq x \leq R_3; \quad (5)$$

$$\text{Г.У.: } \lambda_1 \frac{dt_1(R_0)}{dx} = \alpha_{\text{кип}} (t_1(R_0) - t_{\text{к}}); \quad (6)$$

$$\lambda_1 \frac{dt_1(R_1)}{dx} = \lambda_2 \frac{dt_2(R_1)}{dx}; \quad (7)$$

$$\lambda_2 \frac{dt_2(R_2)}{dx} = \lambda_3 \frac{dt_3(R_2)}{dx}; \quad (8)$$

$$\lambda_3 \frac{dt_3(R_3)}{dx} = \alpha_{oc} (t_{oc} - t_1(R_3)); \quad (9)$$

$$t_1(R_1) = t_2(R_1); \quad t_2(R_2) = t_3(R_2). \quad (10)$$

$$G_{ж} (c_{ж} (t_{кип} - t_0) + r_{ж}) = 2\pi R_0 L \alpha_{кип} (t_1(R_0) - t_{кип}). \quad (11)$$

$$d \in (d_1, \dots, d_{n_1}); \quad \delta \in (\delta_1, \dots, \delta_{n_2})_{n_1}; \quad \delta_{и} \in (\delta_{и_1}, \dots, \delta_{и_{n_3}}); \quad t_{min} \leq t_1(R_0) \leq t_{max}, \quad (12)$$

Постановка задачи проектирования испарителя жидких и сжиженных углеродсодержащих веществ имеет вид, необходимо найти такие варьируемые параметры (1), что критерий оптимальности (2) достигает своего минимума при выполнении условий (3) – (12). Проверка адекватности математической модели методом сравнения расчетных и экспериментальных данных, показала расхождение менее 5%.

Рассмотрим пример расчета испарителя этанола выполненного для ООО «НаноТехЦентр».

Как было показано, в результате оптимального расчета испарителя жидких и сжиженных углеродсодержащих веществ в соответствии с постановкой задачи (1) – (12) определяются следующие конструктивные и режимные параметры:

- диаметр обечайки испарителя,  $d$ ;
- толщина стенки обечайки испарителя,  $\delta$ ;
- толщина стенки тепловой изоляции испарителя,  $\delta_{и}$ ;
- температура внутренней стенки испарителя,  $t_1(R_0)$ .

При этом первые три параметра являются дискретными величинами. Диаметр и толщина стенки обечайки испарителя определяется сортаментом на конструкционные материалы. Толщины теплоизоляции является кратной величине толщины ее полотна. Температура внутренней стенки испарителя должна находиться в диапазоне от температуры кипения жидких или сжиженных углеродсодержащих веществ до температуры деструкции данных веществ.

В качестве конструкционных элементов испарителя были рассмотрены трубы стальные водогазопроводные, ГОСТ 3262-75, трубы нерж. сталь 08X18H10, трубы медные, трубы титановые. Используемый сортамент труб представлен в табл. 1.

Теплоизоляционный материал испарителя K-FLEX SOLAR НТ (толщина мата 10 мм, коэффициент теплопроводности  $\lambda_{и}=0,04$  Вт/(м·К)).

Температурный диапазон для этанола выбран от 80 до 105 °С.

Алгоритм решения задачи проектирования испарителя этанола системы подготовки исходных компонентов производства УВНМ реализован на алгоритмическом языке Free Pascal (Copyright © 1998 – 2005 by BBrczi Gabor, Pierre Muller and Peter Vreman).

**Таблица 1**

**Сортамент труб (исходные данные оптимизационного расчета)**

Трубы стальные водогазопроводные, ГОСТ 3262-75			
Диаметр (мм)	Цена, рубли. (за один метр трубы)	Плотность (кг/м <sup>3</sup> )	Коэффициент теплопроводности при 20 °С (Вт/м·К)
6x1,8	12,21	7850	52
8x2	18,81		
10x2	24,42		
15x2,5	38,28		
20x2,5	49,5		
25x2,8	62,54		
Трубы нерж. сталь 08X18H10			
6x1	44	7900	17
10x1	70		
18x1,5	103		
20x2	238		
25x1,5	379		
Трубы медные			
6x1	44	7900	17
10x1	70		
18x1,5	103		
20x2	238		
25x1,5	379		
Трубы титановые			
20x2	304	4500	16
22x2	339		
25x2	389		

Результаты оптимизационного расчета:

- Труба стальная водогазопроводная, ГОСТ 3262-75,  $\varnothing 25 \times 2,8$ ;
- Толщина стенки испарителя 2,8 мм;
- Толщина слоя теплоизоляции 30 мм, 3 слоя;
- Длина испарителя 130 мм;
- Температура внутренней стенки испарителя  $t_1(R_0) = 105$  °С;
- Минимальная мощность нагревателя 991 Вт;
- Значение критерия оптимальности  $I = 2,526$  руб/кг (стоимость единицы оборудования (без накладных расходов и трудоемкости) 23963 рубля).

## Выводы

Разработана математическая модель процесса испарения жидких и сжиженных углеродсодержащих веществ. Поставлена и решена задача оптимального проектирования аппарата-испарителя. Показан пример оптимизационного расчета испарителя этанола, установленного на стадии подготовки исходного сырья технологической схемы производства УВНМ.

*Работа выполнена в рамках гранта Президента РФ МК-6578.2013.8.*

## Использованные обозначения

$c_2$ , – теплоемкость материала нагревателя испарителя Дж/(кг·К);  $d$  – внутренний диаметр обечайки испарителя, м;  $L$  – длина цилиндрической обечайки испарителя, м;  $G_{ж}$  – массовый расход жидких и сжиженных углеродсодержащих веществ, кг/с;  $q_{и}$  – удельная мощность нагревателя испарителя, Вт/м<sup>3</sup>;  $r_{ж}$  – удельная теплота парообразования жидких и сжиженных углеродсодержащих веществ, Дж/кг;  $R_0, R_1, R_2, R_3$  – радиус внутренней стенки, границы стенки и нагревателя, границы нагревателя и теплоизоляции, внешней поверхности теплоизоляции испарителя, соответственно, м;  $t_0$  – начальная температура, °С;  $t_1, t_2, t_3$  – температуры в стенке, нагревателе и теплоизоляции испарителя, °С;  $t_{oc}$  – температура окружающей среды, °С;  $t_{кип}$  – температура кипения жидких или сжиженных углеродсодержащих веществ, °С;  $x$  – пространственная координата, м;  $\alpha_{кип}$  – коэффициент теплоотдачи от стенки в кипящем углеродсодержащим веществам, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\alpha_{oc}$  – коэффициент теплоотдачи от внешней стенки аппарата в окружающую среду, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\delta, \delta_{и}$  – толщина стенки обечайки испарителя и тепловой изоляции, м;  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  – коэффициент теплопроводности материала стенки, нагревателя и теплоизоляции испарителя, соответственно, Вт/(м·К);  $\rho_2$  – плотность материала нагревателя испарителя, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{Me}$  – плотность материала корпуса, кг/м<sup>3</sup>;  $\Pi_э, \Pi_{Me}, \Pi_{н}$  – цены на электроэнергию, материал корпуса и нагреватель, соответственно, руб./(кВт·ч), руб./кг, руб./Вт;

## ЛИТЕРАТУРА

1. Selective chemical vapor deposition synthesis of double-wall carbon nanotubes on mesoporous silica / P.Ramesh, T.Okazaki, R.Taniguchi, T.Sugai, K.Sato, Y.Ozeki, H.Shinohara. // J. Phys. Chem., 2005. –V. 109. –PP. 1141-1147..
2. Жариков Е.В., Зараменских К.С., Исхакова Л.Д., Коваленко А.Н., Файков П.П. Синтез углеродных наноструктур каталитическим пиролизом этанола на новом Ni/(NiO+Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) катализаторе, полученном золь-гель методом // Химическая технология. 2011. Т. 12, № 2. С. 76-80.
3. Position-controlled carbon nanotube field-effect transistors fabricated by chemical vapor deposition using patterned metal catalyst / Y.Ohno, S.Iwatsu, T.Hiraoka, T.Okazaki, S.Kishimoto, K.Maezawa, H.Shinohara, T.Mizutani // Jpn. J. Appl. Phys., 2003. –V. 42. –PP. 4116-4119..
4. Влияние температурных условий на синтез углеродных наноструктур каталитическим пиролизом этанола на Ni/(NiO+Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) катализаторе / К.С. Зараменских, Е.В. Жариков, А.Н. Коваленко, Л.Д. Исхакова, П.П. Файков // Успехи в химии и химической технологии. 2010. –Т. XXIV, –№ 7 (112). –С. 89-91.
5. Неволин, В.К. Получение углеродных нанотрубок методом каталитического пиролиза этанола из газовой фазы / В.К. Неволин, М.М. Симунин // Наноиндустрия, №3, 2007, С. 34-36.
6. Effect of C-supported Co catalyst on the ethanol decomposition to produce hydrogen and multi-walled carbon nanotubes / J. Diao, H. Wang, W. Li, G. Wang, Z. Ren, J. Bai // Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures, 2010, vol. 42, p. 2280-2284.
7. Рухов, А.В. Методика проектирования аппаратного оформления производств углеродных нанотрубок и нановолокон // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 8, Ч. 6. – С. 1351–1355.

**Рецензент:** Гатапова Наталья Цибиковна, зав.кафедрой "Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность" ТГТУ, д.т.н., профессор, Тамбовский государственный технический университет.