

Міністерство освіти і науки України  
Сумський державний університет  
Шосткинський інститут Сумського державного університету  
Фармацевтична компанія «Фармак»  
Управління освіти Шосткинської міської ради  
Виконавчий комітет Шосткинської міської ради

# **ОСВІТА, НАУКА ТА ВИРОБНИЦТВО: РОЗВИТОК І ПЕРСПЕКТИВИ**

## **МАТЕРІАЛИ**

### **II Всеукраїнської науково-методичної конференції,**

**(Шостка, 20 квітня 2017 року)**



Суми  
Сумський державний університет  
2017

УДК 661.25

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА МАССООТДАЧИ ПРИ КОНЦЕНТРИРОВАНИИ СЕРНОЙ КИСЛОТЫ ИСПАРЕНИЕМ В ТОКЕ ВОЗДУХА

С.А. Бучковец, С.Н. Романько, С.В. Тимофеев

Шосткинский институт Сумского государственного университета  
khtms@ishostka.sumdu.edu.ua

Перспективным способом концентрирования серной кислоты, особенно для малотоннажных производств, является способ, в котором кислота нагревается через стенку аппарата, а испарение происходит в поток нейтрального газа (воздуха) [1]. Такой способ позволяет проводить концентрирование при температуре ниже температуры кипения кислоты и соответственно использовать низкотемпературные теплоносители для ее нагревания [2]. Одним из основных явлений, определяющих процесс концентрирования серной кислоты, в этом случае является массоперенос от жидкой фазы в движущуюся газовую (парогазовую) фазу. Его особенность связана со свойствами самой серной кислоты и наличием потока нейтрального газа (воздуха). Интенсивность массопереноса при концентрировании серной кислоты характеризуется экспериментально определяемым коэффициентом массоотдачи от жидкой фазы в газовый поток.

При построении математической модели массопереноса исходили из следующих допущений:

- сопротивлением массопереносу со стороны жидкой фазы пренебрегаем, что возможно при достаточно интенсивном ее перемешивании;
- образовавшиеся пары кислоты мгновенно смешиваются с нейтральным газом.

При обработке экспериментальных данных использовали традиционные методы теории подобия, в связи с чем переходили от коэффициента массоотдачи  $\beta$  к диффузионному критерию Нуссельта

$$Nu_d = \frac{\beta \delta}{D},$$

где  $\delta$  – внутренний диаметр колбы в ее средней части, м;  $D$  – коэффициент молекулярной диффузии пара воды в воздухе, м<sup>2</sup>/с;  $\beta' = \beta RT / \mu_e$  – коэффициент массоотдачи по воде, м/с;  $R$  – газовая постоянная, Дж/кмоль гр;  $T$  – температура газовой фазы, К;  $\mu_e$  – масса одного киломоля испаряемого компонента, кг/кмоль. Полученные экспериментальные данные представляли в виде зависимостей критерия Нуссельта от массовой доли воды в растворе кислоты  $Nu_d = f(x)$ . Анализ этих зависимостей показывает, что с убыванием массовой доли воды в кислоте (повышением концентрации) критерий  $Nu_d$  уменьшается. Линейный характер зависимостей  $Nu_d = f(x)$  в полулогарифмических координатах свидетельствует, что они описываются показательной функцией вида

$$Nu_d = Nu_{d0} e^{kx}, \quad (1)$$

где  $Nu_{d0}$  и  $k$  – экспериментальные коэффициенты. Из уравнения (1) следует, что при  $x = 0$  ( $k \neq 0$ )  $Nu_d = Nu_{d0}$ , то есть по своей физической сущности коэффициент  $Nu_{d0}$  выражает массоотдачу в газовую фазу при испарении моногидрата H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (100%-ной кислоты). Коэффициент  $k$ , представляющий собой тангенс угла наклона прямой  $\ln Nu_d = kx \ln Nu_{d0}$ , характеризует интенсивность изменения  $Nu_d$  (коэффициента массоотдачи).

На основании экспериментальных данных было установлено, что коэффициенты  $Nu_{d0}$  и  $k$ , входящие в уравнение (1) определяются режимными параметрами процесса концентрирования:  $v$  – скоростью воздуха,  $t_{гo}$  – температурой воздуха, подаваемого в

колбу,  $t_k$  – температурой жидкой кислоты,  $x_0$  – массовой долей воды в исходной кислоте. С целью возможности обобщения результатов исследования при определении коэффициентов  $Nu_{до}$  и  $k$  переходили от указанных величин к безразмерным параметрам ( $x_0$  – по своей сущности безразмерная величина, кг воды/кг смеси):  $Re = v\delta/v$  – критерию Рейнольдса, характеризующего гидродинамический режим в свободном пространстве над кислотой;  $\frac{t_{ro}}{t_{oc}}$  – относительной температуре поступающего в колбу воздуха;  $\frac{t_k}{t_{oc}}$  – относительной температуры жидкой кислоты, где  $v$  – кинематический коэффициент вязкости воздуха, м<sup>2</sup>/с;  $t_{oc}$  – температура поступающего в систему воздуха (окружающей среды), °С. Выбор в качестве характерной температуры  $t_{oc}$ , по которой определяли величины, входящие в критерий  $Re$  и температурные симплексы  $\frac{t_{ro}}{t_{oc}}$  и  $\frac{t_k}{t_{oc}}$ , связан с необходимостью обеспечения независимости безразмерных параметров между собой.

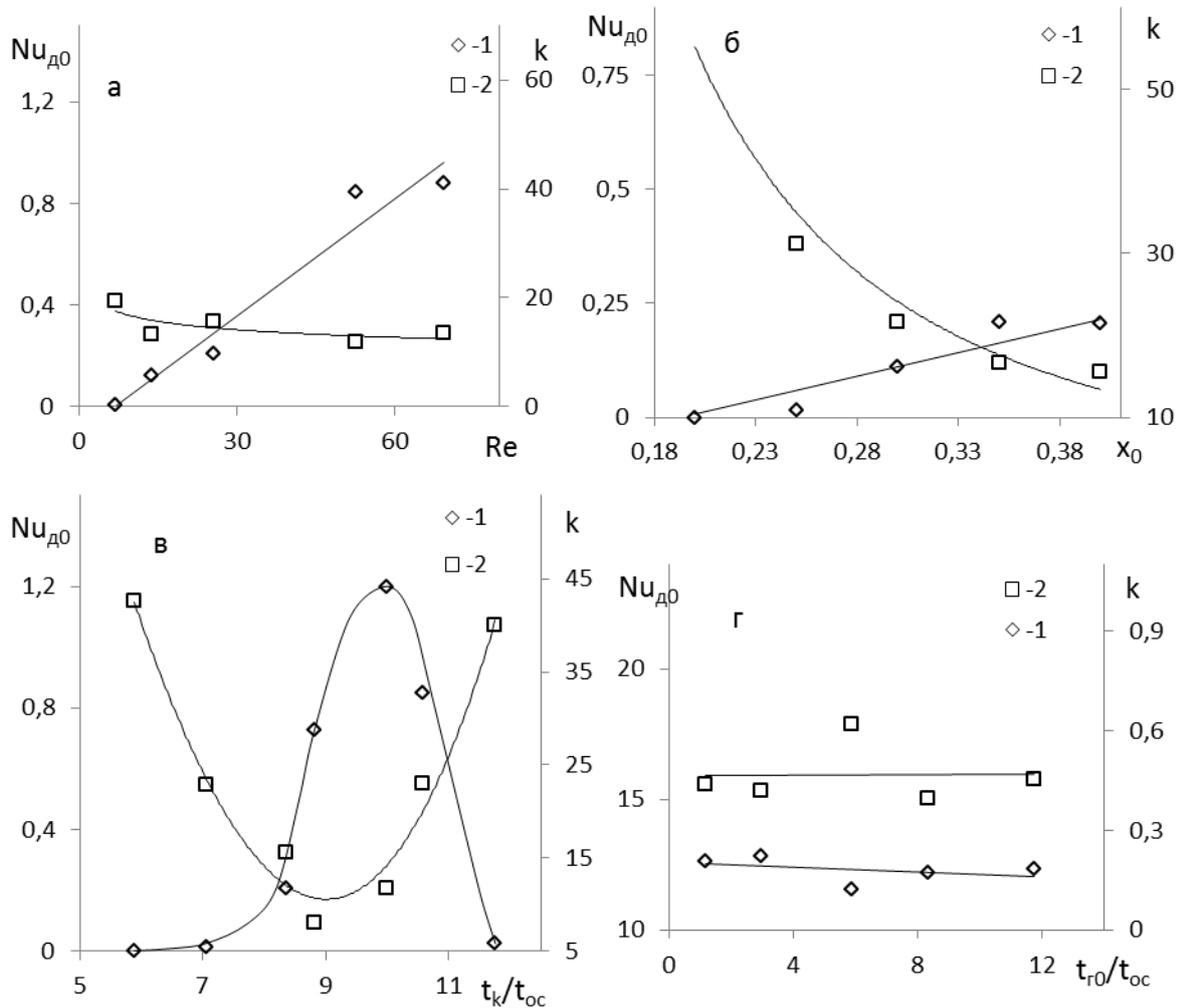


Рисунок – Зависимости коэффициентов  $Nu_{д}$  и  $k$  от безразмерных параметров процесса концентрирования кислоты: а – критерия  $Re$  ( $t_{ro}/t_{oc} = 1,18$ ;  $t_k/t_{oc} = 8,35$ ;  $x_0=0,4$ ): 1 –  $Nu_{до} = f(Re)$ ; 2 –  $k = f(Re)$ , б – начальной массовой доле воды в кислоте ( $Re = 25,7$ ;  $t_{ro}/t_{oc}=1,18$ ;  $t_k/t_{oc}=8,35$ ): 1 –  $Nu_{до} = f(x_0)$ ; 2 –  $k = f(x_0)$ , в – симплекса  $\frac{t_k}{t_{oc}}$  ( $Re = 25,7$ ;  $\frac{t_{ro}}{t_{oc}} = 1,18$ ;  $x_0 = 0,4$ ): 1 –  $Nu_{до} = f(\frac{t_k}{t_{oc}})$ ; 2 –  $k = f(\frac{t_k}{t_{oc}})$ , г – симплекса  $\frac{t_{ro}}{t_{oc}}$  ( $Re = 25,7$ ;  $\frac{t_k}{t_{oc}} = 8,35$ ;  $x_0 = 0,4$ ):  $Nu_{до} = f(\frac{t_{ro}}{t_{oc}})$ ; 2 –  $k = f(\frac{t_{ro}}{t_{oc}})$ .

Как следует из экспериментальных зависимостей коэффициентов  $Nu_{до}$  и  $k$  от безразмерных параметров процесса концентрирования серной кислоты (рис.) коэффициент  $Nu_{до}$  с увеличением критерия  $Re$  растет практически линейно.

Коэффициент  $k$  с увеличением  $Re$  сначала уменьшается, а при достижении  $Re \approx 20$  остается практически постоянным на всем исследованном диапазоне изменения  $Re$  (рис. а). С уменьшением массовой доли воды в исходной кислоте коэффициент  $Nu_{до}$  уменьшается, а коэффициент  $k$  увеличивается почти линейно (рис. б). С увеличением  $\frac{t_k}{t_{oc}}$  коэффициент  $Nu_{до}$  сначала растет, при  $\frac{t_k}{t_{oc}} \approx 10$  проходит через максимум, затем уменьшается. Коэффициент  $k$  наоборот сначала уменьшается, примерно при этом значении  $\frac{t_k}{t_{oc}}$  достигает минимума, затем увеличивается (рис. в). Наличие экстремумов в обоих зависимостях можно объяснить тем, что в данных условиях при  $\frac{t_k}{t_{oc}} \approx 10$  массовая доля воды в кислоте достигает значения, при котором на процесс концентрирования начинает влиять испарение моногидрата  $H_2SO_4$  (происходит переход от простого выпаривания к перегонке). При дальнейшем увеличении  $\frac{t_k}{t_{oc}}$  последнее явление полностью определяет процесс концентрирования. Влияние симплекса  $\frac{t_{ro}}{t_{oc}}$  на коэффициенты  $Nu_{до}$  и  $k$  в исследованном диапазоне его изменения находится в пределах погрешности опытов, что позволяет в расчетах не учитывать температуру воздуха, подаваемого в свободное пространство над кислотой.

Полученные экспериментальные данные по коэффициентам  $Nu_{до}$  и  $k$  позволяют в исследованных пределах изменения безразмерных параметров рассчитывать изменение критерия  $Nu_{д}$  (коэффициента массоотдачи в газовую фазу) в периодическом процессе концентрирования серной кислоты в условиях испарения в поток воздуха.

#### Список літературних джерел

1. Пат. 97392 Україна, МПК (2015) C01B17/88 B01710-00. Спосіб концентрування сірчаної кислоти / В.К. Лукашов, С.М. Романько, С.В. Тимофіїв, А.М. Гудзовський; заявл. 13.10.2014р; опубл 10.03.2015, Бюл. №5.
2. Серафимов Л.А. Соблюдение первого закона Коновалова в процессе ректификации с инертным газом / Л.А. Серафимов, А.В. Фролкова // Вестник МИТХТ. – 2008. – Т.3, №2. – С. 45–52.