

УДК 661.11

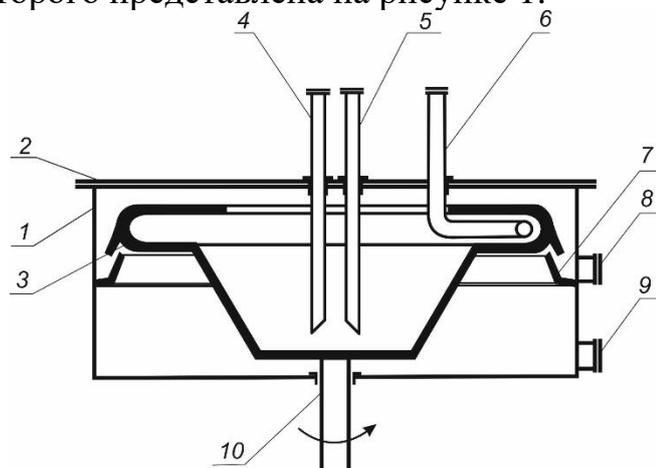
## ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЗМОВ ДРОБЛЕНИЯ КАПЕЛЬ В АКТИВНЫХ ЗОНАХ ЦЕНТРОБЕЖНОГО МАССООБМЕННОГО АППАРАТА

А.А. Кухленко, к.т.н., доцент

Институт проблем химико-энергетических технологий  
Сибирского отделения РАН,  
г. Бийск, Алтайский край

Повышение эффективности и безопасности проведения процессов основного органического синтеза невозможно без разработки и расчета новых образцов перспективного технологического оборудования, и, несомненно, являются актуальным направлением в химической технологии. Типичным примером таких процессов является производство нитратов спиртов, которое включает в себя несколько основных стадий, к которым следует отнести нитрование серно-азотной смесью с последующей стадией разделения продуктов реакции, а также водная и содовая промывка с целью удаления из него растворенных кислот [1].

Для полноценного и безопасного проведения стадии нитрования необходимо обеспечить следующие условия. При проведении нитрования необходимо получить развитую поверхность контакта фаз, уменьшить толщины диффузионного и тепловых пограничных слоев, что позволит одновременно повысить скорости нитрования и отведения тепла из зоны реакции. Достичь указанных параметров проведения процесса возможно путем дробления дисперсной фазы и активного перемешивания ее капель в ядре потока. Получение тонкой эмульсии также будет обеспечивать и полноту протекания реакции. В качестве перспективного оборудования для проведения реакции нитрования спиртов нами рассматривается центробежный массообменный аппарат (ЦМА), принципиальная схема которого представлена на рисунке 1.



1 – корпус; 2 – крышка; 3 – ротор; 4, 5 – патрубки ввода реагентов; 6 – заборная трубка; 7 – сборный коллектор; 8, 9 – технологические патрубки; вал ротора

Рис. 1. Принципиальная схема центробежного массообменного аппарата

Принцип работы ЦМА заключается в следующем. На рабочую поверхность ротора 3 через патрубки 4 и 5 подаются в определенном соотношении реагенты. Под действием центробежных сил реагенты растекаются по поверхности ротора с образованием пленки жидкости. Течение пленки жидкости при определенных условиях становится нестационарным. В таком случае на поверхности пленки возникают волны, и становится возможным отрыв пленки жидкости от поверхности ротора. В результате отрыва пленки происходит дробление дисперсной фазы и образование эмульсии из исходных реагентов. Также дробление дисперсной фазы и образование эмульсии возможно в результате воздействия сдвиговых напряжений при попадании жидкости в тороидальный зазор между ротором и заборной трубкой аппарата 6. Полученная таким образом эмульсия из исходных реагентов выводится из тороидальной части ротора при помощи заборной трубки аппарата.

Изучение механизмов дробления дисперсной фазы и оценка диаметров капель получающейся эмульсии представляют собой большой научный и практический интерес и являются целью настоящей работы.

Как было отмечено ранее отрыв пленки жидкости от поверхности ротора возможен при переходе конической поверхности в плоскую. Механизм дробления дисперсной фазы на данном участке аппарата изучали на основе предложенных в работах [2-6] математических моделей.

Согласно [2,3,6] амплитуда волн  $\beta_r$  образующихся на поверхности пленки жидкости определяется как:

$$\beta_r = -2 \frac{\mu_0}{\rho} \frac{k^2 \tanh\left(\frac{kH_r}{2}\right)}{\tanh\left(\frac{kH_r}{2} + \frac{\rho_g}{\rho}\right)} + \frac{\left\{ 4 \left(\frac{\mu_0}{\rho}\right)^2 k^4 \tanh\left(\frac{kH_r}{2}\right) - \left(\frac{\rho_g}{\rho}\right)^2 U_r^2 k^2 - \left[ \tanh\left(\frac{kH_r}{2}\right) + \frac{\rho_g}{\rho} \right] \left( \frac{\sigma k^3}{\rho} - \frac{\rho_g}{\rho} U_r^2 k^2 \right) \right\}^{1/2}}{\tanh\left(\frac{kH_r}{2}\right) + \frac{\rho_g}{\rho}}, \quad (1)$$

где  $\mu_0$  – коэффициент динамической вязкости жидкости, Па·с;  $\rho$ ,  $\rho_g$  – плотности жидкости и газовой фаз, кг/м<sup>3</sup>;  $k$  – число волн, м<sup>-1</sup>;  $H_r$  – высота пленки, м;  $U_r$  – средняя скорость движения пленки, м/с;  $\sigma$  – поверхностное натяжение на границе жидкой и газовой фазы, Н/м;  $r$  – расстояние от оси вращения ротора, м.

Определение гидродинамических закономерностей течения пленки жидкости по рабочей поверхности ротора ЦМА в зависимости от скорости вращения ротора и расхода реагентов было выполнено нами ранее в работе [7].

В результате отрыва от поверхности ротора и последующего дробления пленки жидкости образуется связка капель, диаметр  $D$  которой можно определить по выражению [6]:

$$D = \left( \frac{4H_r}{k_{opt}} \right)^{1/2}. \quad (2)$$

Оптимальное число волн  $k_{opt}$  определяется максимумом функции  $\beta_r$  в точке отрыва пленки от поверхности ротора.

Критерии Рейнольдса  $Re$ , Вебера  $We$  и Онезорге определяются следующим образом [2-6]:

$$Re = \frac{U_r D \rho}{\mu}, \quad We = \frac{\rho U_r^2 D}{\sigma}, \quad Oh = \frac{We^{1/2}}{Re} = \frac{\mu}{(\rho \sigma D)^{1/2}}. \quad (3)$$

Оптимальная длина волны связки составляет [2,3,6]:

$$\lambda_{opt} = \sqrt{2\pi D(1 + 3Oh)} \quad (4)$$

Ожидаемый диаметр капель  $d_L$ , формирующийся при отрыве пленки жидкости от поверхности ротора, соответственно, определяется как [2]:

$$d_L = \left[ \frac{3}{2} \lambda_{opt} D^2 \right]^{1/3}. \quad (5)$$

Выражение (5) позволяет выполнить оценку дисперсного состава капель формирующихся при отрыве пленки жидкости от рабочей поверхности ротора.

Дисперсный состав капель, формируемый в тороидальном зазоре между ротором и заборной трубкой аппарата оценивался на основе теории локальной изотропной турбулентности А.Н. Колмогорова [8,9]. Течение жидкости в зазоре представляли состоящим из двух ламинарных слоев прилегающих к поверхностям ротора и заборной трубки и турбулентного ядра между ними.

Толщины ламинарных слоев и скорости жидкости на их границах оценивали на основе работ [10]:

$$\delta_0 ; \left( \frac{\Delta^{1/3} \mu_0}{\rho U_R} \right)^{3/4}; \quad U_0 ; \left( \frac{\mu_0}{\rho \Delta} \right)^{1/4} U_R^{3/4}; \quad (6)$$

$$\delta_1 ; \left( \frac{\Delta^{1/3} \mu_0}{\rho U_R} \right)^{3/4}; \quad \Delta U_R ; \left( \frac{\mu_0}{\rho \Delta} \right)^{1/4} U_R^{3/4}, \quad (7)$$

где  $\delta_0, \delta_1$  – толщины ламинарных слоев, прилегающих к стенке заборной трубки и ротора ЦМА соответственно, м;  $\Delta$  – величина тороидального зазора между ротором и заборной трубкой, м;  $U_R$  – скорость ротора, м/с;  $U_0, \Delta U_R$  – скорость и относительная скорость течения жидкости на границе ламинарных слоев прилегающих к стенке заборной трубки и ротора соответственно, м/с.

Профиль окружной скорости жидкости в тороидальном зазоре согласно [10-11] будет определяться как:

$$U_y = \begin{cases} U_0 \frac{x - R_t}{\delta_0} & R_t \leq x \leq R_t + \delta_0; \\ \frac{U_0}{\sqrt{\alpha}} \ln \left( \frac{x - R_t}{\delta_0} \right) & R_t + \delta_0 < x \leq R_t + \Delta - \delta_1; \\ \Delta U_R \frac{x - (R_t + \Delta - \delta_1)}{\delta_1} + U_R - \Delta U_R & R_t + \Delta - \delta_1 < x \leq R_t + \Delta, \end{cases} \quad (8)$$

где  $\alpha = [\ln((\Delta - \delta_1)/\delta_0)]^2 \times [U_0/(U_R - \Delta U_R)]^2$ ;  $R_t$  – радиус заборной трубки, м.

Величина турбулентной вязкости в ядре турбулентного потока  $\mu_t \gg \mu_0$ . Принимая, что значение вязкости в ядре турбулентного потока в приближении Буссинеска [12] линейно возрастает по мере удаления от границы ламинарного слоя, то в соответствии с этим допущением, значение вязкости в ламинарных слоях и турбулентном ядре будет определяться:

$$\mu(x) = \begin{cases} \mu_0 & R_t \leq x \leq R_t + \delta_0; \\ \mu_0 \left( 1 + \frac{x - R_t}{\delta_0} \right) & R_t + \delta_0 < x \leq R_t + \Delta - \delta_1; \\ \mu_0 & R_t + \Delta - \delta_1 < x \leq R_t + \Delta. \end{cases} \quad (9)$$

Для характеристики дисперсного состава получаемой в тороидальном зазоре ЦМА эмульсии согласно теории А.Н. Колмогорова является величина диссипации мощности, которую по известному профилю скоростей (8) и закону изменения вязкости (9), определяли как:

$$\varepsilon = \frac{\int_{R_t}^{R_t + \Delta} \mu(x) \left( \frac{\partial U_y}{\partial x} \right)^2 dx}{\rho_2 \int_{R_t}^{R_t + \Delta} \sqrt{(R_t + \Delta)^2 - (R_t + x)^2} dx}. \quad (10)$$

Дисперсный состав образующихся капель в тороидальном зазоре аппарата будет характеризоваться диаметром наиболее устойчивых капель  $d_{\max}$ , который находится как [10]:

$$d_{\max} = 0,291 \left( \frac{\sigma}{\rho} \right)^{0,6} \varepsilon^{-0,4}. \quad (11)$$

Сравнение результатов численной оценки дисперсного состава капель на основе выражений (5) и (11) при условиях, что расход компонентов сплошной и дисперсной фазы составляет 0,5-1,5 мл/с, а диапазон скорости вращения ротора – 2000-3000 об/мин показал, что наибольшая эффективность дробления капель достигается в тороидальном зазоре между ротором и заборной трубкой аппарата. Оценка дисперсного состава капель получаемых в результате отрыва пленки жидкости от поверхности ротора по выражению (5) составляют порядка 200-500 мкм, в то время как расчетное значение дисперсного состава

капель, образующихся в тороидальном зазоре по выражению (11) – 10-50 мкм. Полученные предварительные результаты позволяют утверждать о целесообразности применения ЦМА в качестве перспективных реакторов для получения продуктов основного органического синтеза.

*Работа выполнялась с использованием приборной базы Бийского регионального центра коллективного пользования СО РАН (ИПХЭТ СО РАН, г. Бийск).*

### Список литературы:

1. *Путеркин Р.Н., Просвирнин Р.Ш., Петров Е.А.* Технология нитроэфиров и нитросодержащих промышленных взрывчатых веществ: монография. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2012. – 268 с.
2. *Matsumoto Y., Ohara T. Teruya I. et al.* Liquid film formation on a rotating disk (numerical analysis at the initial stage) // JSME Int. J. – 1989. – Vol. 32. – P. 52-56.
3. *Dombrowski N., Johns W.R.* The aerodynamic instability and disintegration of viscous liquid sheets. // Chem. Eng. Sci. – 1963. – Vol. 18. – P.203-214.
4. *Clark C.J, Dombrowski N.* The aerodynamic instability and disintegration of inviscid liquid sheets // Proc. R. Soc. Lond. A. 1972. 329A. P.467-478.
5. *Liu J.X., Yu Q.B., Qin Q.* Numerical study on film disintegration by centrifugal atomization using rotating cup // Powder Metallurgy. – 2013. – Vol. 56, № 4. – P. 288-294.
6. *Deng H., Ouyang H.* Vibration of spinning disks and powder formation in centrifugal atomization // Proc. R. Soc. A. – 2011. – № 467. – P. 361-380.
7. *Кухленко А.А., Орлов С.Е., Василишин М.С.* Расчет параметров течения пленки жидкости по рабочей поверхности центробежного массообменного аппарата // Ползуновский вестник. – 2017. – № 4. – С. 145-150.
8. *Колмогоров А. Н.* Локальная структура турбулентности в несжимаемой жидкости при очень больших числах Рейнольдса // Докл. АН СССР. – 1941. – Т.30, № 4. – С.299-303.
9. *Колмогоров А. Н.* Рассеяние энергии при локально изотропной турбулентности // Докл. АН СССР. – 1941. – Т.32, № 1. – С. 19-21.
10. *Левич В.Г.* Физико-химическая гидродинамика. – М.: Гос. изд-во физико-математической литературы, 1959. – 700 с.
11. *Протодьяконов И.О., Ульянов С.В.* Гидродинамика и массообмен в дисперсных системах жидкость-жидкость. – Л.: Наука, 1986. – 272 с.
12. *Boussinesq J.* Theorie de l'Écoulement Tourbillant. Mem. Presentes par Divers Savants // Acad. Sci. Inst. Fr. – 1877. – Vol.23. – P. 46-50.