

УДК 66-911.4

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИКИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СУЛЬФОНОЛА С ВОДОЙ

© 2009 Э.П. Дяченко, И.Ю. Алексанян, Л.М. Титова

Астраханский государственный технический университет

Поступила в редакцию 06.07.2009

Исследована статика процесса обезвоживания сульфонола как объекта сушки. Экспериментально получены и математически описаны изотермы сорбции сульфонола. Сделаны выводы об изменении формы связи влаги с материалом. Проведен анализ термодинамики внутреннего массопереноса при взаимодействии сульфонола с водой.

Ключевые слова: физика, теплофизика, термодинамика, теплообмен, массоперенос.

При разработке и исследовании различных способов обезвоживания изучение статистики процесса сушки является необходимым этапом, основой для аргументированного научного анализа кинетики процессов влагоудаления и оценки движущей силы процесса. В химической промышленности, и не только, сушка многих продуктов происходит в области гигроскопического состояния, поэтому для расчета процесса используются кривые сорбции – десорбции, по которым можно определить форму и энергию связи влаги с материалом, вычислить соответствующий расход тепла десорбции и определить равновесную влажность материала при данных условиях процесса.

Механизм процессов сорбции – десорбции реальных материалов достаточно сложен, благодаря чему теоретически описывающие их зависимости можно получить лишь для простейших типов изотерм на основании принятых моделей процесса. Таким образом, возникает необходимость экспериментального исследования равновесного состояния влажного материала с газом.

С целью исследования гигроскопических свойств поверхностно-активного вещества сульфонола использовался тензиметрический метод, подробно описанный в работе [1]. Относительная ошибка при измерении равновесного влагосодержания продукта  $U_p$ , кг/кг не превышала 6%. Анализ значений изотерм сорбции сульфонола (рис. 1) показывает существенную зависимость сорбционной способности сульфонола от температуры.

Характер кривых сорбции указывает на сложность механизма протекания процесса, при

этом наличие точек перегиба соответствует изменению механизма сорбции, а значит, наблюдается качественное изменение формы связи удаляемой влаги. Влагосодержание  $U_p = 0,03 - 0,05$  кг/кг соответствует образованию “монослоя”, кривая на участке от начального влагосодержания до первой критической точки имеет характерную для мономолекулярной адсорбции выпуклость к оси влагосодержаний. Поглощение жидкости на этом участке сопровождается значительным выделением тепла. Далее, ввиду увеличения количества адсорбированной влаги, тепловые колебания молекул воды, расшатывая молекулярные цепи, позволяют им принимать энергетически выгодные конформации, при этом сами молекулы воды в связи с поляризацией последующих слоев предыдущими, продолжают находиться в ориентированном состоянии [2], т.е. следует процесс полимолекулярной адсорбции (участок кривой  $U_p = 0,05 - 0,50$  кг/кг), затем капиллярной конденсации влаги (участок кривой  $U_p = 0,50 - 0,74$  кг/кг). В точке пересечения кривой изотермы с прямой  $\varphi = 1,0$  достигается максимальная гигроскопическая влажность сульфонола  $U_p = 0,74$  кг/кг.

Одной из основных целей изучения гигроскопических свойств являются рекомендации по выбору конечной влажности высушиваемых продуктов, при этом целесообразным для длительного хранения является влагосодержание, соответствующее образованию “монослоя”, т.к. в этом случае влага наиболее сильно связана с материалом. Для сульфонола емкость “монослоя” составляет  $U_p = 0,03 - 0,05$  кг/кг.

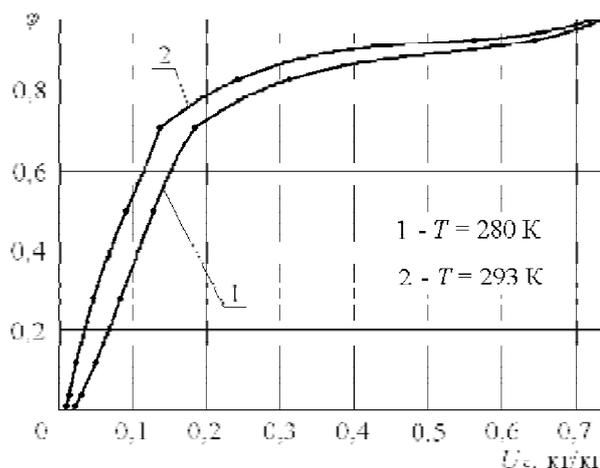
Для математического описания процесса сорбции сульфонола кривые сорбции были условно разбиты на два участка и получены для каждой зоны аппроксимирующие зависимости относительной влажности воздуха от равновесного влагосодержания продукта и температуры  $\varphi = f(T, U_p)$  (1), при этом величина достовернос-

Дяченко Эдуард Павлович, аспирант.

E-mail: amed-nauka@yandex.ru.

Алексанян Игорь Юрьевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой “Технологические машины и оборудование”.

Титова Любовь Михайловна, заведующая лабораторией.



**Рис. 1.** Экспериментальные изотермы сорбции сульфанола (•) и их аппроксимирующие зависимости (кривые 1 и 2)

ти аппроксимации составляла  $R^2=0,999$ . Из графиков сорбционного равновесия, представленных на рис. 1, видно, что расчетные изотермы сорбции (кривые 1 и 2) достаточной точностью описывают экспериментальные данные (отмечены точками).

Процесс сушки, являясь типично неравновесным, можно описать законами термодинамики неравновесных процессов. Неизотермический перенос влаги обуславливает перемещение ее внутри материала не только за счет градиента влажности (явления влагопроводности), но и градиента температуры (явление термовлагопроводности или термическая диффузия). Во влажных материалах явление термовлагопроводности (эффект Лыкова [3]) подобен явлению термодиффузии в растворах и газах (эффект Соре) и является причиной перемещения влаги по направлению потока тепла, что препятствует продвижению влаги из внутренних слоев к поверхности материала, так как их температура ниже температуры наружных. В этом случае создается градиент температуры, противоположный градиенту влажности.

Таким образом, движение влаги может происходить в виде молекулярного переноса пара и в виде переноса жидкости, обусловленных созданием в материале градиентов влажности и температуры. При отсутствии массопереноса термодинамический параметр, определяющий отношение перепада влагосодержания к перепаду температуры есть термоградиентный коэффициент  $\delta_p$  [3], который зависит от влагосодержания материала, т.е. термическое перемещение влаги так же, как и влагопроводность обусловлено формой связи влаги с материалом.

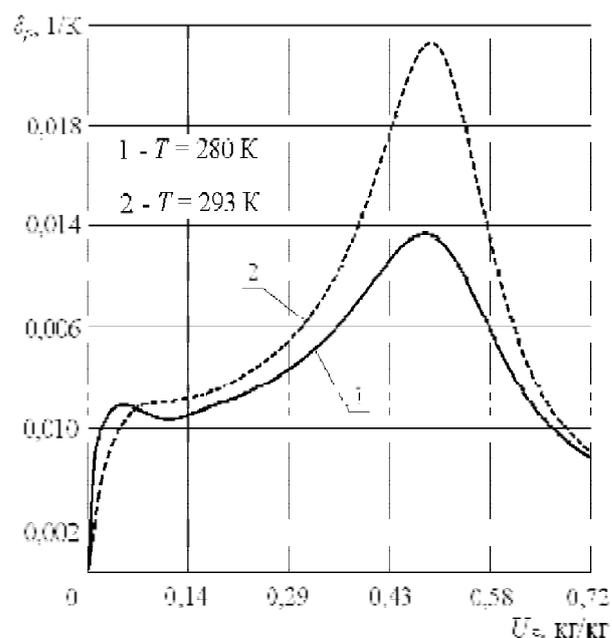
Используя полученное уравнение (1), описывающее сорбционное равновесие сульфанола и влажного воздуха, рассчитана функциональная

зависимость термоградиентного коэффициента  $\delta_p$  от влагосодержания  $U_p$  (рис. 2).

Кривая изменения  $\delta_p$  имеет экстремальный характер, максимум которой соответствует границе между коллоидно-связанной и свободной (капиллярной) влагой. При этом до экстремальной точки кривая монотонно возрастает, что обусловлено перемещением влаги в этой области преимущественно в виде пара за счет диффузионных сил. На участке  $U_p < 0,09$  кг/кг коэффициент  $\delta_p$  имеет отрицательное значение, что связано с явлением относительной термодиффузии в газовых смесях. Имеющий большую молекулярную массу воздух диффундирует по направлению потока тепла, более легкий водяной пар перемещается против потока тепла, причем эффект относительной термодиффузии значительно усиливается благодаря явлению теплового скольжения.

После достижения максимума при дальнейшем увеличении равновесной влажности наблюдается обратная зависимость, т.к. на этом участке влага движется главным образом в виде жидкости за счет действия заземленного воздуха. При полном насыщении жидкостью и отсутствии заземленного воздуха  $\delta_p \approx 0$ .

Таким образом, очевидна непосредственная связь технологических свойств сульфанола как объекта сушки с его термодинамическими характеристиками: потенциалы переноса обуславливают интенсивность и механизм переноса влаги в материале, термоградиентный коэффициент



**Рис. 2.** Зависимость термоградиентного коэффициента  $\delta_p$  от равновесного влагосодержания  $U_p$  при сорбции паров воды сульфаноном

определяет эффективность термической диффузии влаги. Используя термодинамический подход, основанный на известных законах классической термодинамики, получено математическое описание конечных энергетических изменений исследуемого процесса сорбции, на основе которого сделаны выводы о его механизме и движущей силе сорбции паров воды сульфенолом.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гинзбург А.С., Савина И.М.* Массовлагообменные характеристики пищевых продуктов. М.: Легкая и пищевая промышленность, 1982. 280 с.
2. *Алексянн, И.Ю. Буйнов А.А.* Высокоинтенсивная сушка пищевых продуктов. Пеносушка. Теория. Практика. Моделирование: Монография. Астрахань: АГТУ, 2004. 380 с.
3. *Лыков А.В.* Сушка в химической промышленности. М.: Химия, 1970. 499 с.

## STUDY OF THE THERMODYNAMICS OF THE INTERACTION OF SULFONOL WITH WATER

© 2009 E.P. Dyachenko, I.Yu. Aleksanyan, L.M. Titova

Astrakhan State Technical University

The statics of process of dehydration of sulfonol as object of drying is investigated. Are experimentally received and isotherms of sorbtion of sulfonol. Are drawn on change of the form of communication of a moisture with a material. The analysis of thermodynamics internal mass exchange is carried out at interaction of sulfonol with water.

Keywords: physics, thermophysics, thermodynamics, heat- mass exchange, heat-mass carrying over.

---

*Eduard Dyachenko, Graduate Student.*

*E-mail: amed-nauka@yandex.ru.*

*Igor Aleksanyan, Doctor of Technics, Professor, Head at the Technological machinery and equipment Department.*

*Lubov Titova, Head of the Laboratory.*