

Процессы и аппараты химических и других производств. Химия

УДК 66.047

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КИНЕТИКИ ПРОЦЕССОВ СУШКИ И ИСПАРЕНИЯ РАСТВОРИТЕЛЕЙ

В.И. Коновалов, Н.Ц. Гатапова, Б.Ш.Д. Аль Саиди

*Кафедра «Технологические процессы и аппараты», ФГБОУ ВПО «ТГТУ»;
kvidep@cen.tstu.ru*

Ключевые слова и фразы: органические растворители; психро-эвапориметрическая установка; скорость испарения; температура поверхности испарения.

Аннотация: Описана экспериментальная установка, позволяющая одновременно определять скорость и температуру испарения различных растворителей в широком диапазоне изменения температур и скоростей сушильных агентов в процессах конвективной сушки.

Процессы испарения растворителей, в том числе нефтяных, и сушка покрытий на их основе широко распространены в промышленных технологиях, связанных с нанесением лакокрасочных, адгезионных и антиадгезионных, электроизоляционных и токопроводящих, антикоррозионных, герметизирующих и др. покрытий, а также на конечных стадиях получения и обработки технических продуктов или природного сырья в среде органических растворителей по окончании реакций полимеризации, процессов кристаллизации, экстрагирования, гранулирования, фильтрации, промывки, отбеливания и др. Кроме того, в технике широко используется обработка различных поверхностей охлаждающими и дезинфицирующими жидкостями, обезжиривающими составами и смывками на основе органических и нефтяных растворителей [1–5].

Одной из основных технологических характеристик растворителей является абсолютная скорость испарения (например в $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$), а также легко определяемая из нее относительная скорость испарения растворителей (относительная летучесть) [6–8].

Для измерения относительной скорости испарения растворителей, чаще всего по сравнению со скоростью испарения бутилацетата, используют, например, эвапорометры фирмы «Шеврон» или фирмы «Шелл» [6, 7, 9]. Измерения в этих устройствах проводятся при постоянных стандартных условиях, например, определяется время испарения 90 % навески 1 г растворителя при температуре около 25 °С и при скорости обдувающего воздуха около 0,15 м/с. Однако в промышленных условиях температура сушки и скорости сушильных агентов изменяются в широком диапазоне. Кроме того, в существующих эвапорометрах измерения производятся в неустановившемся режиме, что снижает их точность и может приводить к несопоставимости полученных результатов для разных растворителей.

Для расчета времени сушки покрытий необходимо знать движущую силу процесса, так называемый температурный потенциал сушки [10], который пред-

ставляет собой разность между температурой обдувающего сушильного агента и температурой поверхности испарения влажного материала (температуры мокрого термометра). Измерение температуры мокрого термометра широко используется также в психрометрии, например, психрометром Ассмана [11].

На кафедре «Технологические процессы и аппараты» ТГТУ разработана экспериментальная психро-эвапорометрическая установка, предназначенная для одновременного измерения скорости испарения и температуры испарения растворителей в широком диапазоне изменения температур и скоростей сушильных агентов в процессах конвективной сушки [12, 13]. Экспериментальная установка позволяет работать в среде различных сушильных агентов (воздух, инертные газы, и др.), обеспечивает надежность измерений в установившемся режиме, а также сопоставимость результатов с любыми вариантами как психрометров, так и эвапорометров различных фирм.

Психро-эвапорометрическая установка (рис. 1) имеет систему измерения веса испаряющегося растворителя в единицу времени, что позволяет получить скорость испарения, и систему измерения температуры поверхности испарения в стационарном режиме.

Экспериментальная психро-эвапорометрическая установка выполнена на базе наиболее надежного и проверенного психрометра Ассмана 1. Психрометр установлен на термостатируемом сушильном шкафу и снабжен всеми необходимыми устройствами.

Узел смоченного термометра выполнен из полое текстолитового стержня 2, установленного в одной из психрометрических трубок 3. Нижние концы трубок заглублены в термостатируемый шкаф 4, в который подается сушильный агент. Для просасывания парогазовой смеси через трубки 3 используются микровентильатор с регулируемым числом оборотов 5. Подачу исследуемого растворителя на смачиваемую поверхность испарения обеспечивает внешний напорный резервуар 6. Элементы 2–6 представляют собой систему измерения температуры поверхности испарения. Они подвешены на весоизмерительном устройстве 7.

Весоизмерительное устройство в совокупности с резервуаром для растворителя 6 и с образцом смоченного материала 8 обеспечивает измерение количества испаряющегося растворителя во времени.

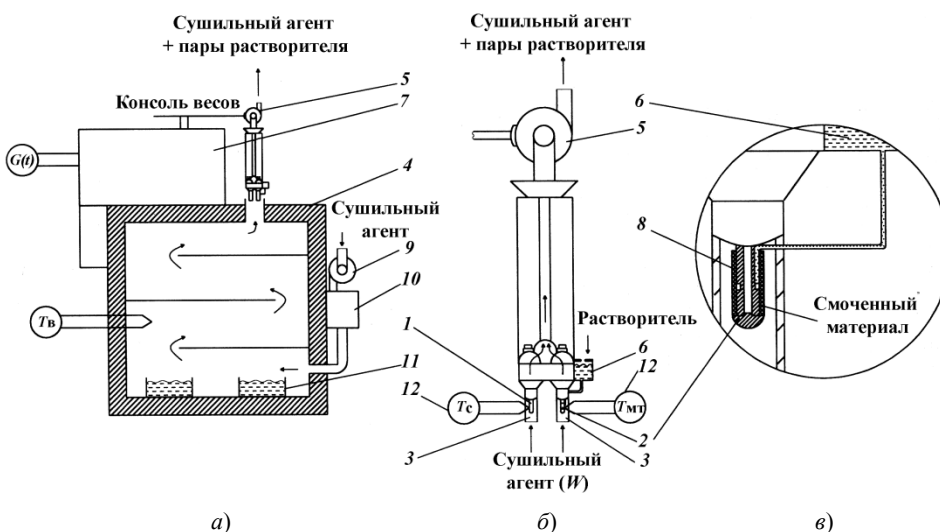


Рис. 1. Психро-эвапорометрическая установка:
a – схема установки; *б* – психрометр с внешним увлажняющим устройством; *в* – узел смоченного термометра

Микровентилятор 5 с регулируемым числом оборотов позволяет задавать различную скорость сушильного агента в трубках. Тарировка скорости осуществляется предварительно с помощью термоанемометра. Для исключения подсосов внешнего воздуха используется второй микровентилятор с регулируемым числом оборотов 9, причем его производительность поддерживается несколько большей, чем количество просасываемого через трубки 3 сушильного агента.

Для подготовки сушильного агента с заданной температурой и влажностью на входе в термостатируемый шкаф может быть установлен осушитель 10, а внутри – увлажнители 11. При использовании в качестве сушильного агента водяного пара применяется парогенератор-кипятильник, при этом детали психрометра, соприкасающиеся с паром, должны дополнительно обогреваться во избежание конденсации на их поверхности пара. В случае, если сушильным агентом являются инертные газы, их подача осуществляется из баллона. Осушитель в этом случае не используется.

Стержень 2 обернут фильтровальной бумагой и смачивается растворителем, непрерывно поступающим из внешнего напорного резервуара 6. Таким образом получаем известную площадь поверхности испарения. В обычных психрометрах используется внутренний резервуар для воды, что не позволяет фиксировать поверхность испарения. В резервуар 6 шприцем заливается навеска растворителя. Количество растворителя подбирается из условия обеспечения достаточной продолжительности стационарного режима испарения. Во избежание избыточного напора растворителя выбрано крайнее нижнее размещение резервуара.

После многочисленных проб были приняты все меры для устранения посторонних источников-стоков тепла, для фиксации смачиваемой поверхности, равномерного смачивания фитиля, подачи и испарения растворителя и др. Использование стандартных термометров психрометра Ассмана не обеспечивало полного увлажнения и фиксации поверхности смачиваемого материала и приводило к образованию капель. Для устранения этого на стержне 2 была сделана кольцевая проточка, а трубка для подачи растворителя заделана внутрь стержня. На конце стержня установлен обтекатель.

После выхода устройства на выбранные температурный (20...150 °С) и скоростной (0,1...5 м/с) режимы в напорный резервуар шприцем заливается навеска растворителя. Растворитель проходит через капиллярную трубку и смачивает поверхность испарения. В процессе опыта одновременно снимаются показания весоизмерительной системы, а также температуры смоченного и сухого термометров с помощью термопар 12 за последующей записью на регистрирующие приборы.

Полученные на экспериментальной установке характерные примеры температурных и весовых кривых испарения для воды и бутилацетата показаны на рис. 2.

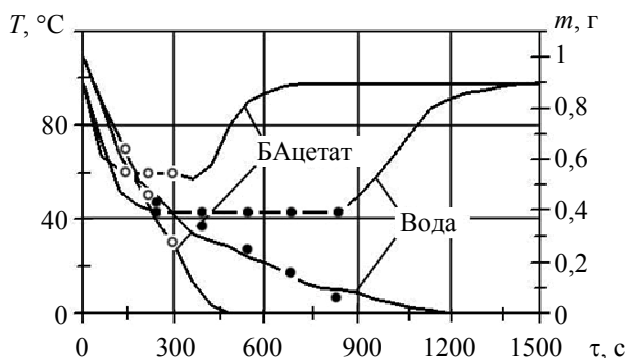


Рис. 2. Экспериментальные температурные и весовые кривые испарения для воды и бутилацетата

В начальный момент происходит резкое падение температуры поверхности до постоянной хорошо выраженной площадки, соответствующей температуре мокрого термометра $T_{\text{м.т}}$. Скорость испарения $m_{\text{исп}}$ при этом примерно постоянна и надежно измеряется по наклону влажностной кривой. В конце опыта может наблюдаться некоторое местное понижение температуры в результате стекания на фильтровальную бумагу остатка растворителя из резервуара.

При обработке экспериментальных данных величина $m_{\text{исп}}$ находилась, как обычно, графически по наклону весовых кривых, величина $T_{\text{м.т}}$ – по температуре площадки на температурных кривых.

Расчетные величины температуры мокрого термометра $T_{\text{м.т}}$ можно определить совместно со скоростью испарения $m_{\text{исп}}$ итерациями из баланса тепла $q_{\text{исп}}$, Вт, для площадки на температурной кривой

$$q_{\text{исп}} = \alpha_{\text{исп}} (T_{\text{с}} - T_{\text{м.т}}) = r m_{\text{исп}} = r \beta_{\text{исп}} (C_{\text{нас}} (T_{\text{м.т}}) - C_{\text{с}}), \quad (1)$$

где $\alpha_{\text{исп}}$ и $\beta_{\text{исп}}$ – коэффициенты тепло- и массоотдачи при испарении, Вт/(м²·К) и м/с, соответственно; $T_{\text{с}}$ – температура сушильного агента, °С; r – удельная теплота парообразования, Дж/кг; $C_{\text{с}}$, $C_{\text{нас}}$ – объемные концентрации растворителя в объеме среды при $T_{\text{с}}$ и у смоченной поверхности при температуре насыщения, кг/м³.

Коэффициенты тепло- и массоотдачи при испарении $\alpha_{\text{исп}}$ и $\beta_{\text{исп}}$ предварительно можно получить по ранее предложенным критериальным уравнениям [14]:

$$\begin{cases} \text{Nu}_{\beta} = 0,77 \text{Re}^{0,4} \text{Sc}^{0,333} K_{\text{кп}}^{1,333}; \\ \text{Nu}_{\alpha} = 1,06 \text{Re}^{0,375} \text{Pr}^{0,333} K_{\text{кп}}^{0,5}. \end{cases} \quad (2)$$

Сравнение расчетных и экспериментальных значений температуры мокрого термометра и скорости испарения па примере воды и бутилацетата показано на рис. 2 (точки – эксперимент, линии – расчет).

Особую трудность в обработке экспериментальных данных вызывает нестабильность $m_{\text{исп}}$ и $T_{\text{м.т}}$ для разных типов растворителей и условий опытов, связанная как со сложностью экспериментальной техники, так и с различными физико-химическими свойствами отдельных растворителей и смесей. Поэтому приходится использовать «индивидуальные подходы»: выбирать базовые (характерные) опыты, например для двух растворителей (вода и бутилацетат) или для группы растворителей (вода, четыреххлорстый углерод, этилацетат) на фиксированных условиях; определять сначала вид зависимостей для них, а затем, внося коррективы, расширять число обрабатываемых опытов, вплоть до всего массива данных.

Задачей дальнейших исследований является физическое описание, математическое моделирование и разработка инженерных методов расчета процессов сушки покрытий с учетом особенностей кинетики испарения растворителей, в том числе нефтяных.

Список литературы

1. Коновалов, В.И. Пропиточно-сушильное и клеепромазочное оборудование / В.И. Коновалов, А.М. Коваль. – М. : Химия, 1989. – 224 с.
2. Химия и технология полимерных пленочных материалов и искусственной кожи. В 2 ч. Ч. 2. Технологические процессы / Г.П. Андрианова [и др.] – М. : Легпромбытиздат, 1990. – 384 с.

3. Стеколыщиков, М.Н. Углеводородные растворители : справочник / М.Н. Стеколыщиков. – М. : Химия, 1986. – 120 с.
4. Бедрик, Б.Г. Растворители и составы для очистки машин и механизмов : справочник / Б.Г. Бедрик, П.В. Чулков, С.И. Калашников. – М. : Химия, 1989. – 176 с.
5. Фиалков, Ю.Я. Растворитель как средство управления химическим процессом / Ю.Я. Фиалков. – Л. : Химия, 1990. – 240 с.
6. Дринберг, С.А. Растворители для лакокрасочных материалов / С.А. Дринберг, Э.Ф. Ицко. – Л. : Химия, 1986. – 208 с.
7. Archer, W.E. Industrial Solvents Handbook / W.E. Archer. – New York : Dekker, 1996. – 328 p.
8. Вайсбергер, А. Органические растворители / А. Вайсбергер [и др.]. – М. : Изд-во иностр. лит., 1958. – 520 с.
9. Saary, Z. New Instrument to Measure Solvent Evaporation / Z. Saary, P.L. Goff // Journal of Paint Technology. – 1975. – Vol. 45, No. 583. – P. 45–55.
10. Касаткин, А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А.Г. Касаткин. – М. : Химия, 1971. – 623 с.
11. Воронец, Д. Влажный воздух / Д. Воронец, Д. Козич. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 79 с.
12. Пат. № 2256170 Российская Федерация, G 01 N 25/62. Устройство для измерения скорости испарения и температуры испарения растворителей («психроэвапорометр») / Коновалов В.И., Гагапова Н.Ц., Козлов Д.В., Утробин А.Н., Фролов А.А.; заявитель и патентообладатель Тамб. гос. техн. ун-т. – № 20031125681 ; заявл. 20.08.2003 ; опубл. 10.07.2005, Бюл. № 19. – 5 с.
13. Гагапова, Н.Ц. Кинетика и моделирование процессов сушки растворителей, покрытий, дисперсий, растворов и волокнистых материалов: единый подход : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.17.08 / Н.Ц. Гагапова. – Тамбов, 2005. – 32 с.
14. Konovalov, V.I. Transport Phenomena in Drying of Capillary-Porous Materials / V.I. Konovalov, N.Z. Gatapova // Proceedings of the 15th Intern. Drying Symp. (IDS'2006), Budapest, Hungary, Aug. 20–23, 2006. – Budapest, 2006. – Vol. A. – P. 141–148.

Experimental Setup for Studying the Kinetics of Drying and Evaporation of Solvents

V.I. Konovalov, N.Ts. Gatapova, B.Sh.D. Al Saidi

*Department "Processes and Devices", TSTU;
kvidep@cen.tstu.ru*

Key words and phrases: evaporation rate; organic solvents; psychrometric evaporation plant; temperature of evaporation surface.

Abstract: The paper describes experimental setup that allows simultaneous determination of evaporation rate and evaporation temperature of different solvents in a wide range of temperatures and velocities of drying agents in the process of convection drying.

Experimentelle Anlage für die Untersuchung der Kinetik der Prozesse des Trocknens und der Verdunstung der Lösungsmittel

Zusammenfassung: Es ist die experimentelle Anlage, die die Geschwindigkeit der Verdunstung und die Temperatur der Verdunstung der verschiedenen Lösungsmittel im breiten Bereich der Veränderung der Temperaturen und der Geschwindigkeiten der Trockenagenten in den Prozessen des konvektiven Trocknens, beschrieben.

Installation expérimentale pour l'étude de la cinétique des processus du séchage et de vaporisation des matières solubles

Résumé: Est décrite une installation expérimentale permettant de définir simultanément la vitesse de la vaporisation et la température de la vaporisation de différentes matières solubles dans une large gamme du changement des températures et des vitesses des agents du séchage dans les processus du séchage de convection.

Авторы: **Коновалов Виктор Иванович** – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологические процессы и аппараты»; **Гатапова Наталья Цибиковна** – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Технологические процессы и аппараты»; **Аль Сауди Бассам Шариф Денеф** – аспирант кафедры «Технологические процессы и аппараты», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

Рецензент: **Брянкин Константин Вячеславович** – доктор технических наук, профессор кафедры «Химические технологии органических веществ», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».
