

## КИНЕТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИСПАРЕНИЯ РАСТВОРИТЕЛЕЙ НЕФТЕХИМИИ И СУШКА ПОКРЫТИЙ НА ИХ ОСНОВЕ

Н.Ц. Гатапова<sup>1</sup>, Б.Ш.Д. Аль Саиди<sup>1</sup>, Е.А. Сергеева<sup>2</sup>

*Кафедры: «Технологические процессы и аппараты» (1),  
«Безопасность жизнедеятельности» (2), ФГБОУ ВПО «ТГТУ»;*  
*kvidep@cen.tstu.ru*

**Ключевые слова и фразы:** критериальные зависимости; процессы тепломассообмена; скорость испарения; температурно-влажностные кривые.

**Аннотация:** Проанализированы особенности кинетики испарения растворителей. Рекомендованы расчетные зависимости кинетики сушки с учетом механизма испарения и температурно-влажностных кривых.

---

Органические растворители, в том числе растворители нефтехимии, широко применяются в промышленности и обладают специфическими свойствами, по сравнению с водными составами они более летучи, пожароопасны и токсичны. Отсюда вытекают принципиальные физические особенности процессов испарения и сушки, технологические особенности производств и конструктивные особенности применяемого оборудования [1]. Эти особенности изучены слабо, хотя производительность и экономичность сушилок, качество материалов и режим обработки определяются именно механизмом и кинетикой сушки.

Проведен качественный анализ свойств растворителей, материалов подложек и процессов тепломассоотдачи при испарении растворителей в разных условиях (начальное насыщение материала, температура и скорость сушильного агента). Время сушки для органических растворителей (за редким исключением малолетучих жидкостей) меньше, чем время нагрева подложек. Для воды соотношение между временем сушки и нагрева в большей степени, чем для органики, зависит от толщины подложки и степени увлажнения.

Скорость сушки в первом периоде может зависеть от начального увлажнения и степени заполнения пор вследствие различных условий испарения на поверхности, причиной которых является неравномерность поверхностного заполнения капилляров разных размеров. Кроме того, увлажнение зависит от условия нанесения растворителя на материал (шприцем; контактом со смоченной фильтровальной бумагой и т.д.), смачиваемости капиллярной структуры и пр. Обработка данных показывает, что интенсивность испарения может изменяться пропорционально степени заполнения пор, причем степень заполнения меняется в диапазоне 0,1...0,5.

При анализе испарения различных растворителей в одинаковых условиях получено, что температурная площадка, соответствующая температуре мокрого термометра, имеет большую протяженность при большей длительности первого периода сушки. Порядок кинетических кривых в целом соответствует порядку расположения веществ по их летучести.

Экспериментальные исследования по испарению растворителей проводились на психро-эвапорометрической установке, отличительной особенностью которой является одновременное измерение скорости и температуры испарения растворителей в широком диапазоне изменения температур и скоростей сушильных агентов в процессах конвективной сушки [2].

В качестве примера покрытия использовался клей для промазки протекторов камер, бортовых лент на основе натурального каучука с добавлением растворителей (нефрас, этилацетат). Кинетические кривые сушки снимались на большой циркуляционной сушилке на кафедре «Технологические процессы и аппараты». Для сопоставительного анализа использовались ранее полученные на щелевой установке результаты [3].

Анализ данных по испарению растворителей нефтехимии полностью подтвердил применимость предложенного ранее безразмерного числа в критериальных зависимостях для расчета коэффициентов тепло- и массоотдачи, которое учитывает характер и силы межмолекулярных взаимодействий, что проявляется в разности энергетических уровней жидкости – ее температуры при кипении и плавлении.

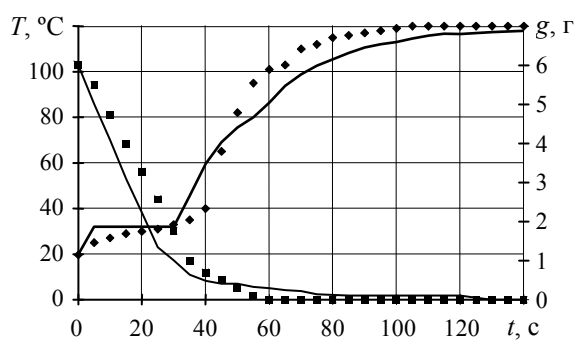
Однако физический механизм переноса при испарении в настоящее время изучен недостаточно. Основные возможные механизмы и особенности могут заключаться в следующем: процесс испарения растворителей не столько диффузионный процесс, а в большей степени – процесс фазового превращения на поверхности раздела жидкость (влажный материал) – газ (парогазовая смесь). Даже диффузия в модельном представлении (для систем газ – газ) в случае испарения растворителей не равномолярная, противоположно направленная по Максвеллу, а однонаправленная через инертный компонент, что должно учитываться поправкой на величину коэффициента диффузии, или на встречный конвективный («стефановский») поток.

При фазовом превращении плотность меняется сразу на три порядка на поверхности раздела фаз, условно не имеющей толщины, и это никак не учитывается используемыми диффузионными представлениями. Огромное разнообразие особенностей межмолекулярного взаимодействия, приводящего к различной кинетике, обнаруживается при сушке различных видов покрытий полимер – растворитель [4] как в полимерных системах, так и в клеточных структурах.

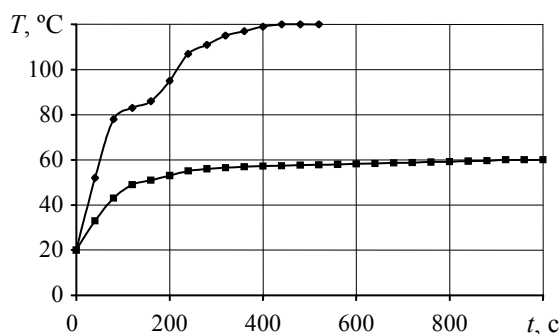
Для того чтобы объяснить увеличение коэффициента теплоотдачи при испарении А.В. Лыков выдвинул гипотезу субмикродиспергирования [5]. Для ряда случаев это было подтверждено непосредственными наблюдениями [6]. Янг в экспериментах с каплями на подложках обнаружил [7] связь между интенсивностью испарения и произведением модифицированного числа Марангони  $Ma^*$  на диэлектрическую проницаемость испаряющихся растворителей. Одним из возможных эффектов, коррелирующих с молекулярными свойствами растворителей, со скоростью воздуха и кинетическими особенностями тепломассопереноса, является кластерный механизм испарения.

Известна зависимость относительной летучести, в том числе определяемой на прецизионных эвапорометрах [8, 9], от вида подложек (материалы – фильтровальная бумага, полихлорвинил, алюминий и др.; размер образца, наличие бортика и пр.). Причиной может быть капиллярный подъем в углах образцов, образование высохших пятен, неравномерное высыхание фильтровальной бумаги и т.д.

Все эти особенности имеют принципиальный характер, так как не учитываются в существующих модельных описаниях процессов испарения и сушки, и являются задачей последующих исследований.



a)



б)

**Сравнение расчетных (сплошная линия) и экспериментальных (точки) данных по испарению (первый период сушки) и сушке:**

a – растворитель этилацетат, температура сушильного агента – 120 °С, скорость сушильного агента – 1,5 м/с; б – покрытие на основе клея (состав: натуральный каучук, этилацетат, Нефрас-С2-80/120), температура сушильного агента – 100 °С, скорость сушильного агента – 5 м/с

Для расчетов совместного тепломассопереноса при испарении растворителей и сушке покрытий на пористых или монолитных материалах подложек применялась отработанная в школе профессора В.И. Коновалова методика с итерациями и параллельным поинтервальным счетом [10–13], с введением эффективных коэффициентов переноса в граничные условия с поверхностным стоком в первом периоде и эффективной теплоемкости с учетом объемного стока на испарение во втором периоде сушки. Связь между ними устанавливается экспериментальной поверхностной температурно-влажностной зависимостью. Она жестко фиксирует влажностное поведение системы и позволяет получить более достоверные результаты расчета тепломассопереноса. При этом оказывается возможным обойтись только оценкой коэффициента диффузии в высушиваемом покрытии и эффективным коэффициентом массоотдачи во втором периоде сушки. Основные расчетные соотношения и критериальные зависимости приведены в работах [2, 13, 14].

Сравнение расчетных и экспериментальных данных по испарению чистого растворителя и сушке покрытия на основе резинового клея показано на рисунке.

*Работа по испарению растворителей нефтехимии и сушке покрытий на их основе выполнена в научной школе профессора В.И. Коновалова и является частью комплексных исследований по сушильно-термическим процессам.*

### Список литературы

1. Коновалов, В.И. Пропиточно-сушильное и клеепромазочное оборудование / В.И. Коновалов, А.М. Коваль. – М.: Химия, 1989. – 224 с.
2. Коновалов, В.И. Экспериментальная установка для исследования кинетики процессов сушки и испарения растворителей / В.И. Коновалов, Н.Ц. Гатапова, Б.Ш.Д. Аль Саиди // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2013. – Т. 19, № 1. – С. 97–102.
3. Сергеева, Е.А. Кинетика испарения растворителей и сушки покрытий на пористых и монокристаллических материалах : дис. ... канд. техн. наук : 05.17.08 : защищена 16.03.2001 / Сергеева Елена Анатольевна. – Тамбов, 2000. – 210 с.
4. Левин, Г.М. Кинетика испарения растворителей из композиций для покрытий пластивола ПВХ / Г.М. Левин, В.А. Берестнев // Каучук и резина. – 1985. – № 2. – С. 18–21.
5. Лыков, А.В. Теория сушки / А.В. Лыков. – 2-е изд. – М. : Энергия, 1968. – 472 с.
6. Шубин, Г.С. О влиянии испарения на теплообмен при сушке / Г.С. Шубин, А.В. Чемоданов // Тр. Моск. лесотехн. ин-та. Технология и материалы деревообрабатывающих пр-в. – 1985. – Вып. 170. – С. 102.
7. Yang, W.-J. Natural Convection in Evaporating Droplets / W.-J. Yang // Handbook of Heat and Mass Transfer. – Houston : Gulf Publ., 1986. – Vol. 1. – P. 211–229.
8. Rocklin, A.L. Evaporation Phenomena: Precise Comparison of Solvent Evaporation Rates from Different Substrates / A.L. Rocklin // J. Coating Technology. – 1976. – Vol. 48, No. 622. – P. 45–57.
9. Saary, Z. New instrument to measure solvent evaporation / Z. Saary, P.L. Goff // J. Paint Technology. – 1973. – Vol. 45, No. 583. – P. 45–55.
10. Коновалов, В.И. О возможностях использования точных, интервальных и приближенных аналитических методов в задачах тепло- и массопереноса в твердых телах / В.И. Коновалов, Е.Н. Туголуков, Н.Ц. Гатапова // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 1995. – Т. 1, № 1–2. – С. 75–90.
11. Коновалов, В.И. К расчету внутреннего тепло- и массопереноса и кинетики сушки и нагрева волокнистых материалов / В.И. Коновалов [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 1997. – Т. 3, № 3. – С. 224–236.
12. Коновалов, В.И. К расчету внешнего теплообмена при сушке и нагреве волокнистых материалов / В.И. Коновалов [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 1997. – Т. 3, № 1–2. – С. 47–60.
13. Гатапова, Н.Ц. Кинетика и моделирование процессов сушки растворителей, покрытий, дисперсий, растворов и волокнистых материалов: единый подход : дис. ... д-ра техн. наук : 05.17.08 : защищена 10.06.2005 : утв. 14.10.2005 / Гатапова Наталья Цибиковна. – Тамбов, 2005. – 554 с.
14. Пахомов, А.Н. Расчет кинетики сушки капли жидкости на подложке / А.Н. Пахомов, Е.А. Ильин, Аль Саиди Басам Шериф // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2013. – Т. 19, № 2. – С. 339–345.

---

## Kinetic Features of Petrochemical Solvents Evaporation and Drying of Coatings on Their Basis

N.Ts. Gatapova<sup>1</sup>, B.Sh.D. Al Saedi<sup>1</sup>, E.A. Sergeeva<sup>2</sup>

*Departments: “Technological Processes and Devices” (1),  
“Life Safety” (2), TSTU; kvidep@cen.tstu.ru*

**Key words and phrases:** criteria dependences; evaporation rate; heat and mass transfer processes; temperature-humidity curves.

**Abstract:** The paper analyzes features the kinetics of evaporation of solvents. The calculated dependences of drying kinetics with regard to the mechanism of evaporation and temperature-humidity curves have been recommended.

---

### **Kinetische Besonderheiten der Verdunstung der Lösungsmittel der Petrochemie und das Trocknen der Deckungen auf ihrer Grundlage**

**Zusammenfassung:** Es sind die Besonderheiten der Kinetik der Verdunstung der Lösungsmittel analysiert. Es sind die Rechenabhängigkeiten der Kinetik des Trocknens unter Berücksichtigung des Mechanismus der Verdunstung und der temperaturfeuchtigen Kurven empfohlen.

---

### **Particularités cinétiques de l'évaporation des dissolvants de la pétrochimie et séchage des couvertures à leur base**

**Résumé:** Sont analysées les particularités cinétiques de l'évaporation des dissolvants. Sont recommandées les dépendances de calcul de la cinétique du séchage compte tenue du mécanisme de l'évaporation et des courbes de température et de l'humidité.

---

**Авторы:** *Гатапова Наталья Цибиковна* – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Технологические процессы и аппараты»; *Аль Сауди Бассам Шариф Денеф* – аспирант кафедры «Технологические процессы и аппараты»; *Сергеева Елена Анатольевна* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

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

---