

УДК 66. 047

**ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЗМА  
И КИНЕТИКИ СУШКИ КАПЕЛЬ ДИСПЕРСИЙ  
(на примере сушки послеспиртовой барды)**

**Ю.В. Пахомова, В.И. Коновалов, А.Н. Пахомов**

*Кафедра «Технологические процессы и аппараты»,  
ГОУ ВПО «ТГТУ»; kvipri@ce.tstu.ru*

**Ключевые слова и фразы:** депиннинг; испарение капли; образование корки; послеспиртовая барда; пиннинг; структурообразование в капле; тепло-массообмен.

**Аннотация:** Выполнен анализ современных исследований в области испарения и структурообразования в высыхающих каплях. Описана созданная экспериментальная визуальная сушильная установка и методика экспериментов. Приведены и проанализированы результаты экспериментов по сушке капель послеспиртовой барды. Обсуждены и анонсированы направления дальнейших исследований.

---

**1.** Сушка дисперсий (суспензий, эмульсий, кристаллообразующих растворов, смешанных дисперсных систем) – один из наиболее распространенных процессов химической технологии для получения твердых продуктов из жидкой фазы. При этом высушиваемые дисперсии дробятся и распределяются каплями или слоями на подложки различного рода, а при одновременном гранулировании подаются на зерна затравки или на частицы подсушенного продукта. Типичными примерами таких сушилок являются распылительные, пневматические, сушилки кипящего слоя, в том числе на инертном носителе, барабанные, роторные сушилки, а также спиральные, со встречными закрученными потоками (**ВЗП**), сублимационные и некоторые другие [1–9]. Особый научный и практический интерес в них вызывает образование, испарение и сушка капель – как свободных (парящих или падающих), так и неподвижных или стекающих (лежащих, сидячих, висящих) [10–15].

**2.** Кроме сушки весьма многочисленны и разнообразны другие технические процессы, аппараты и продукты, связанные с каплями, напр.: градирни, абсорбция, распыление, форсунки, сжигание топлива, охлаждение разбрызгиванием, нанесение покрытий, полиграфия, флотация, аэрозоли, порошки и т.п. [16–18]. Процессы и явления с участием капель также широко распространены и в природе, напр.: дождь, град, туман, роса, образование сталактитов-сталагмитов, радуга и пр. [10, 11]. Процессы с каплями часто используются в научных приборах и экспериментах, напр.: измерение смачивания и поверхностного натяжения, полярография, седиментация [19–23]. Такие явления и процессы изучаются в ряде естественных наук, напр.: метеорология, гидрология, минералогия, кристаллография [10, 11]. В связи с таким широким распространением литература по каплям

и явлениям с их участием насчитывает многие тысячи наименований. В списке литературы к данной статье, кроме цитированных выше, приведены также некоторые выборочные ссылки, непосредственно относящиеся к теме настоящей работы и к интересам авторов [24–37].

В последние годы резко возрос интерес к механизму явлений в капле в связи с рядом новых приложений и направлений исследований: в физике конвекции и турбулентности (межфазной по типу Марангони и объемной); в физико-химии явлений, получивших название «пиннинга и депиннинга» (задержки или смещения линии трехфазной границы капли); в образовании структур в высыхающих каплях (дегидратационная самоорганизация, «эффект кофейных пятен»); в микробиологии (биологических жидкостей, в том числе молекул протеинов и ДНК); в медицинской диагностике (по различию образующихся в высыхающей капле структур); во многих нанотехнологиях (в том числе с самоорганизацией наночастиц, приготовлении наноматериалов, сенсорных экранов, технике струйных принтеров) [38–47]. Эти исследования проводятся во многих научных центрах мира (напр.: ИТФ им. Л.Д. Ландау, ИТФ им. С.С. Кутателадзе, ИТТФ НАН Украины, НИИ геронтологии МЗ РФ, ИМПБ РАН, ИПФ РАН; Гарвардский, Калифорнийский, Мичиганский, Чикагский университеты – США; Лионский университет Клода Бернара – Франция; Тель-Авивский университет – Израиль и др.). В 2010 г. состоялась специальная Международная конференция по самоорганизации в высыхающих каплях [51].

**3.** Отметим также работы, имеющие непосредственную связь с исследованиями, выполняемыми авторами.

В работах [28, 29] В.И. Коноваловым выведены уравнения геометрии капли с разными углами смачивания на конечной, бесконечной и наклонной подложках. На их основе будут получены выражения для расчета диаметра, высоты, площади поверхности и объема лежащей капли, необходимые для количественного описания тепломассообмена при сушке. Пиннинг или депиннинг в этих работах наблюдался: на конечной подложке благодаря острому углу ее края; при плохом смачивании; при наличии загрязнений.

В работе В.Д. Янга (США, Япония) [38] экспериментально установлено наличие корреляции времени испарения капель 9-ти органических растворителей на подложке с числом Марангони, рядом физических свойств и с диэлектрической постоянной (!). Это подтверждает целесообразность продолжения выполненных в школе В.И. Коновалова работ [31–36, 52], в которых на данном этапе получены соотношения с безразмерными температурами кипения, плавления, тройной точки: по поиску корреляций скорости испарения непосредственно с молекулярно-кинетическими характеристиками жидкостей (напр.: комплекса дисперсионных сил; полярного взаимодействия и водородных связей; параметров парного взаимодействия типа потенциалов Леннарда–Джонса).

Наконец, в недавних работах А.А. Долинского, К.Д. Малецкой [25, 26] используется выделение характерных механизмов и типов испарения дисперсий, аналогичное разработанной В.И. Коноваловым классификации по 6 типам кинетических температурных и влажностных кривых сушки [31–37]. Это расширяет диапазон проверенных дисперсных систем на многочисленные биотехнологические и пищевые дисперсии и позволяет прогнозировать существование всех упомянутых механизмов сушки для послеспиртовой барды, которая является в настоящей работе основным объектом исследований.

**4.** Барда – основной отход производства этилового спирта [53]. Необходимость ее утилизации связана с экологическими и экономическими проблемами. Чаще всего барду тем или иным образом перерабатывают, в основном, на корма [54]. Жидкая барда обладает высокой питательной ценностью (в барде содержится высокое количество белка зерна). Послеспиртовая жидкая барда – быстрозакисающая жидкость (прокисает при температуре 20 °С примерно за сутки). После-

спиртовая барда быстро подвергается микробной порче за счет развития сапрофитной микрофлоры, ее физико-химический состав и, соответственно, физические свойства непредсказуемо изменяются. При доступе воздуха и без регулярного перемешивания более легкие фракции на поверхности с меньшим содержанием солей могут повреждаться плесневыми грибами.

Федеральный закон РФ от 21 июля 2005 года № 102-ФЗ «О государственном регулировании производства и оборота этилового спирта, алкогольной и спиртосодержащей продукции» (с дополнениями) обязывает спиртовые заводы производить полную переработку и (или) утилизацию барды.

Таким образом, барда – это типичная биотехнологическая дисперсия с характерными свойствами, а ее оптимальная переработка имеет большое значение как для России, так и для Тамбовской области, в которой находится 5 собственно спиртовых заводов (Ново-Лядинские – старый и новый, Волковский, Сергиевский, Сосновский, Хлыстовский), производства спирта – Рассказовский «Биохим», «Мичуринский экспериментальный завод», а также машиностроительный завод «Комсомолец», изготавливающий спиртовое оборудование. Этим был обусловлен выбор барды в качестве объекта настоящих исследований.

Известен ряд схем переработки послеспиртовой барды. Наиболее современная схема реализована на новом Ново-Лядинском спиртовом заводе [55, 56], введенном в строй в 2009 г., с получением сухой барды по ГОСТ Р 53098–2008 (зарубежная классификация: технология **DDGS** – Dried Distillers Grains with Solubles – сухая дробина барды с растворимыми веществами). Технологическая схема (оборудование фирмы Julius Montz, Германия) включает: фильтрацию 8–10%-й барды на центрифугах-декантерах; трехступенчатую выпарку последовательно в трубчатых аппаратах со сползающей пленкой, со стекающей пленкой и с принудительной циркуляцией; смешение в шнековом смесителе кека из декантеров, упаренного сиропа после выпарки и возврата сухой барды из сушилок; сушку в роторной трубчатой сушилке (4200 кг исп. влаги/ч; поверхность 720 м<sup>2</sup>; 6,5 об/мин) [57].

5. На рисунке 1 представлены фотографии наиболее распространенных инертных тел, применяемых в сушилках, сухих и с нанесенной на них жидкой бардой.

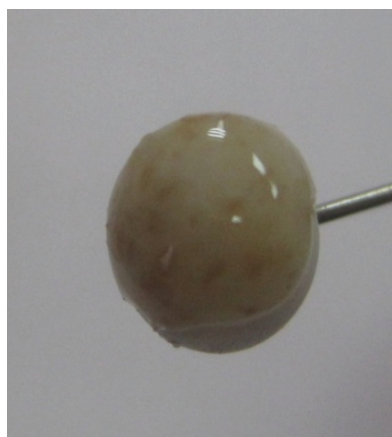
Наиболее корректно и обстоятельно с физической и математической точек зрения можно исследовать процесс сушки на горизонтальных диффузионно-непроницаемых подложках (мало- и высокотеплопроводных – фторопласт, алюминий) и мелких капроновых сетках [31–37]. Фотография капли жидкой послеспиртовой барды, нанесенной на горизонтальную подложку, представлена на рис. 2.

6. Для исследования кинетики сушки жидких и пастообразных дисперсных систем нами разработана многорежимная визуальная сушильная установка. Она обеспечивает температуры сушки до 300 °С, широкий диапазон скоростей сушильного агента и реализацию различных способов обдува (углы, пульсации, направления потока), быструю смену режимов и визуальное (или приборное) наблюдение. Схема установки представлена на рис. 3.

В процессе сушки вся подложка с нанесенной жидкостью находится в зоне основной струи – в «ядре» струи. Мощность установленных теплонагревателей по 2 кВт. Скорость обдува материала может варьироваться от 0,5 до 25 м/с. Возможно применение устройств, создающих заданную конфигурацию потока (сопла, раскататели, турбулизаторы и т.п.). Благодаря низкой инерционности калориферов и применению отдельных вентиляторов имеется возможность быстро переходить с одного температурного режима на другой: в пределах 2 мин – при изменении температуры до 50 °С; до 20 мин – для крайних по температуре режимов; практически мгновенно – для одинаковой температуры. Учитывая особенности установки, можно использовать режим отлежки. Регулировка режима нагрева осуществляется с помощью тиристорных регуляторов, подключенных к ЭВМ через



*a)*



*б)*

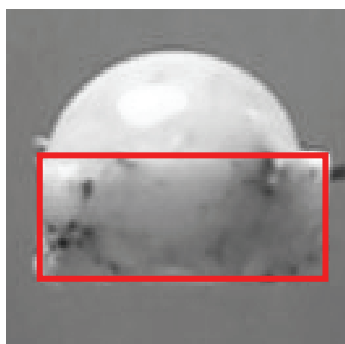


*в)*

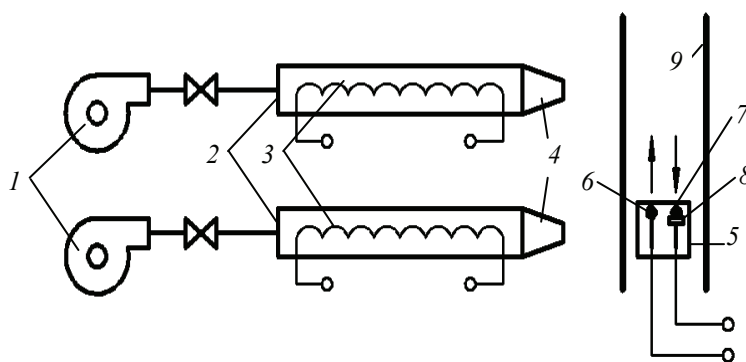


*г)*

**Рис. 1. Типичные инертные тела, применяемые в сушилках кипящего слоя:**  
*a* – шарообразный инерт (Япония), материал – фторопласт, диаметр шаров – 6 мм;  
*б* – жидкая послеспиртовая барда нанесена на отдельную шарообразную частицу, толщина слоя около 0,5 мм; *в* – частицы инерта в виде кубиков, материал – фторопласт, размер грани ~ 6 мм; *г* – жидкая послеспиртовая барда нанесена на отдельную кубическую частицу, толщина слоя около 0,5 мм



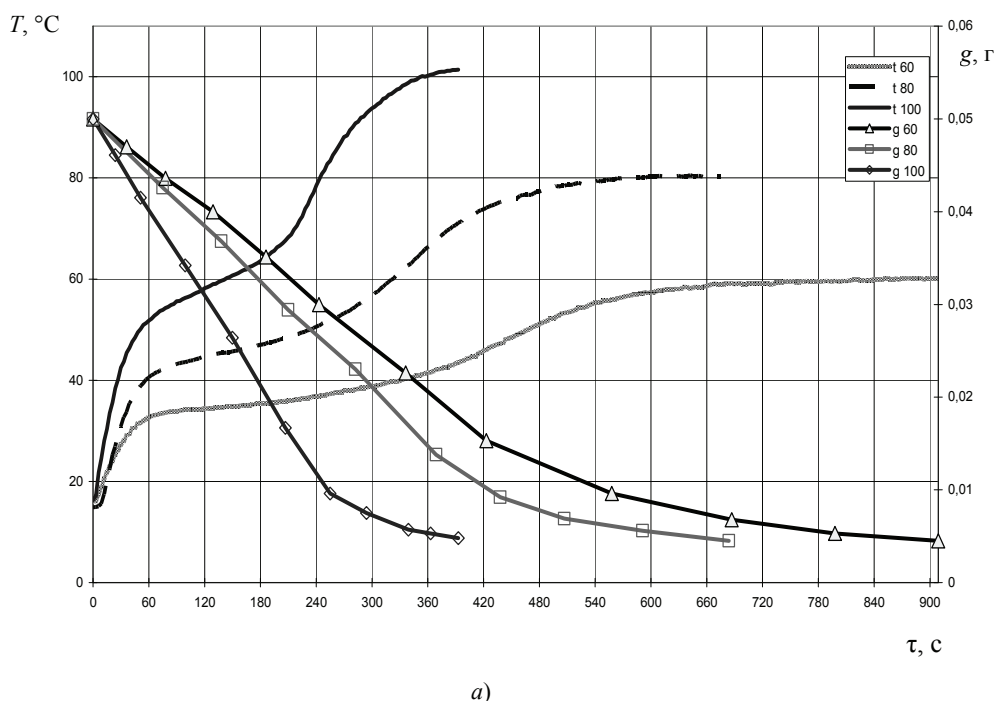
**Рис. 2. Капля жидкой барды, нанесенная на горизонтальную подложку:**  
 прямоугольник – границы подложки; материал подложки – фторопласт;  
 форма подложки – диск



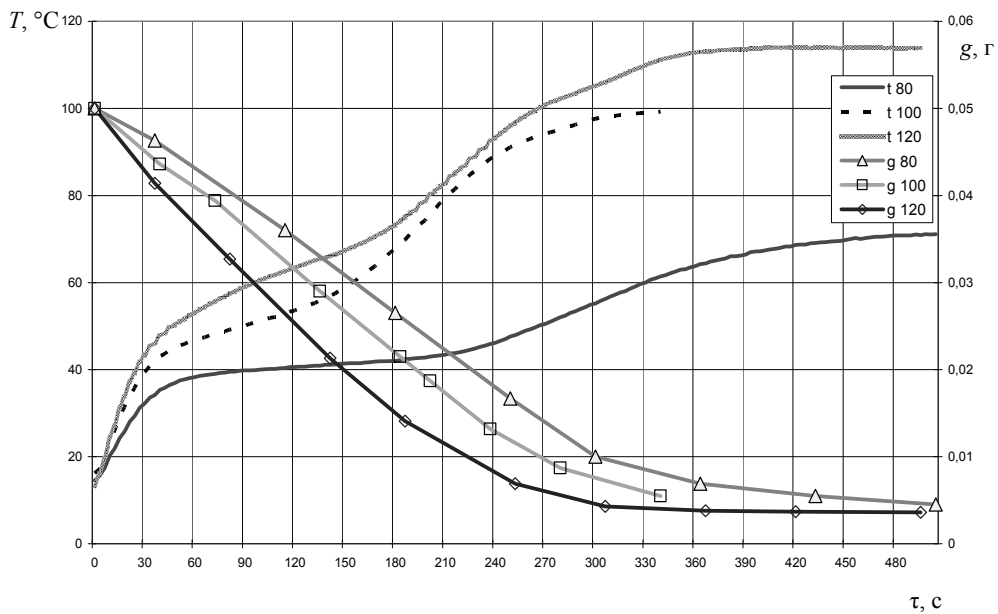
**Рис. 3. Схема многорежимной визуальной сушильной установки:**  
 1 – вентилятор; 2 – кожух защитный; 3 – тэн; 4 – сопло; 5 – подставка;  
 6 – термопара свободная; 7 – термопара в капле;  
 8 – подложка; 9 – направляющие

блок «Термодат» [58]. Для контроля температуры сушильного агента и высушиваемого продукта используются термопары ХК (хромель–копель (L)) с диаметром спая 0,5 мм. В материалах существенной толщины можно установить несколько термопар по толщине материала. Управление вентиляторами осуществляется с помощью лабораторных трансформаторов. Термопары подключаются к многоканальному электронному самописцу «Термодат».

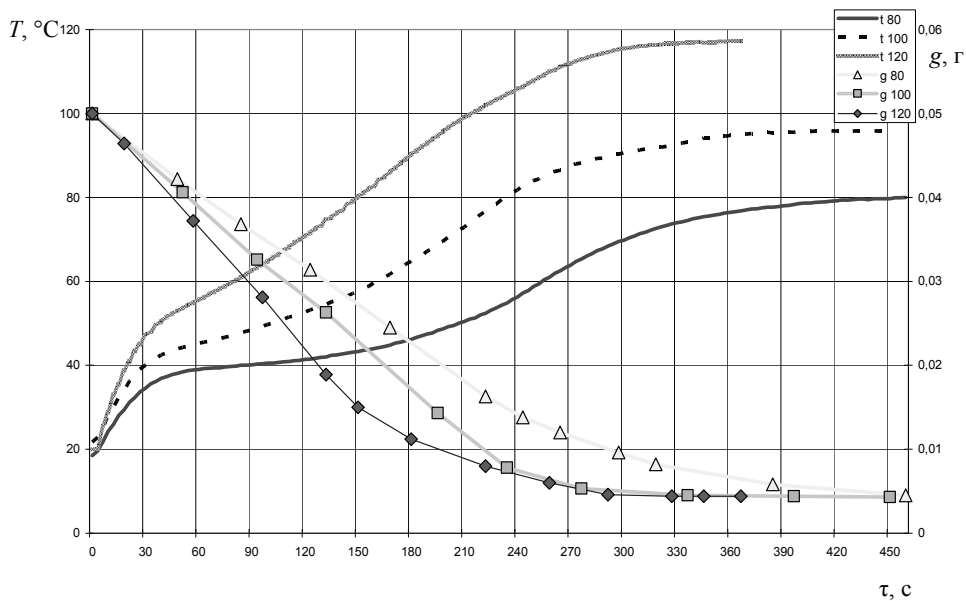
7. Некоторые результаты проведенных экспериментальных исследований представлены на рис. 4.



**Рис. 4. Кинетические кривые сушки капли барды на малом диске,**  
 $T = 60, 80, 100 \text{ }^\circ\text{C}$ ; навеска – капля 0,05 г (начало):  
 $a - w = 3 \text{ м/с}$



б)



**Рис. 4. Окончание:**  
*b* –  $w = 5$  м/с; *в* –  $w = 7$  м/с

Как следует из анализа кривых сушки и термограмм при постоянной скорости сушильного агента и увеличении температуры сушильного агента уменьшается время сушки и увеличивается скорость сушки. Характерной особенностью является типичное вырождение 1-го периода сушки и площадки мокрого термометра практически на всех режимах, за исключением очень мягких (напр.,  $T = 60 \dots 80$  °С;  $w = 3 \dots 5$  м/с). С увеличением температуры сушильного агента

идет монотонный рост температуры высыхающей капли. Уменьшение интенсивности испарения влаги с поверхности сохнущей капли жидкой барды может происходить уже в первом периоде. Максимум скорости сушки наблюдается в таком вырождающемся первом периоде. Критическое влагосодержание, при постоянной скорости сушильного агента и росте температуры сушильного агента, уменьшается. Значения критической влажности представлены в табл. 1.

Влияние скорости сушильного агента на скорость сушки и время сушки относительно невелико. Исключение составляют жесткие режимы сушки при температуре сушильного агента более 160 °С. При этих режимах увеличение скорости сушильного агента резко увеличивает скорость сушки и сокращает время сушки.

Вероятнее всего это связано с ускорением формирования корки на поверхности сохнущей капли и с увеличением давления внутри мелких пузырей, испаряющихся при температуре более 100 °С, что приводит к облегчению разрушения сформировавшейся корки. Однако при таких режимах может происходить деструкция высушенного материала.

8. После каждого эксперимента определялось значение конечного квазиравновесного влагосодержания (влажности) досушкой в сушильном шкафу при температуре 150...180 °С в течение 30 мин. Значения квазиравновесной влажности высушенной послеспиртовой барды при выбранных режимах представлены в табл. 2.

Таблица 1

**Значения критической влажности (кг влаги/ кг вл. матер.)  
при исследованных режимах ( $T$ , °С;  $w$ , м/с)**

Режим, $T/w$	Критическая влажность	Режим, $T/w$	Критическая влажность
60/3	0,7	140/5	0,64
80/3	0,67	160/5	0,5
100/3	0,54	180/5	0,375
115/3	0,52	80/7	0,67
125/3	0,5	100/7	0,61
150/3	0,44	120/7	0,58
80/5	0,7	140/7	0,57
100/5	0,58	160/7	0,5
120/5	0,54	180/7	0,375

Таблица 2

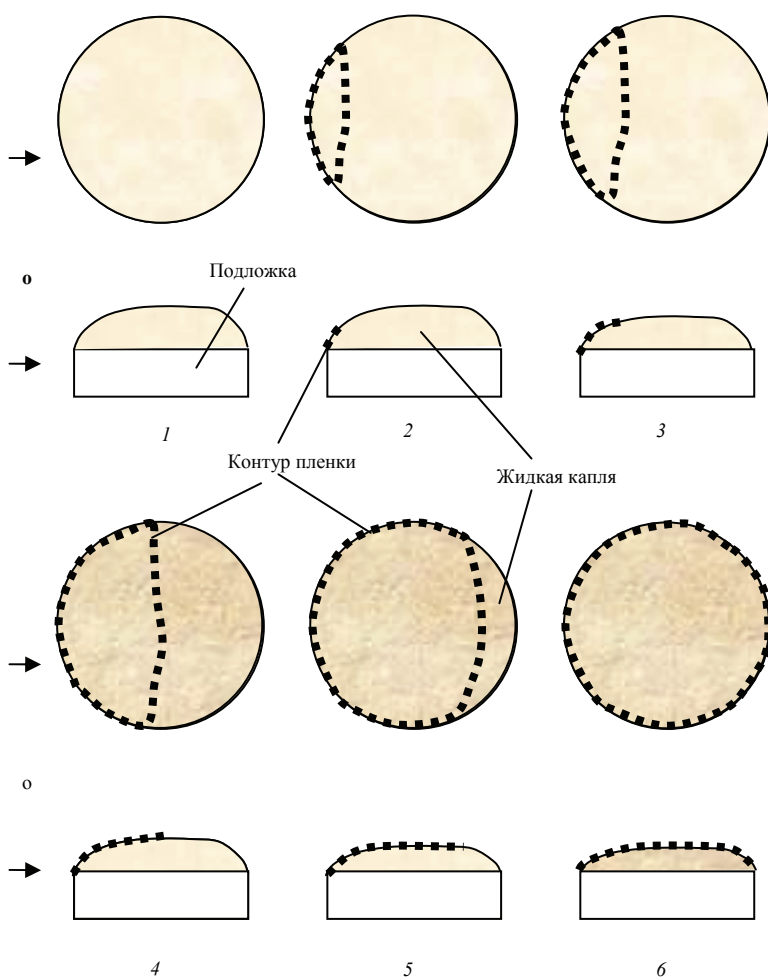
**Значения квазиравновесной влажности  
высушенной послеспиртовой барды при выбранных режимах**

Температура сушильного агента, °С	Влажность исходная, кг влаги/ кг вл. матер.	Влагосодержание исходное, кг влаги/кг абс. сух. матер.	Влажность квазиравновесная, кг влаги/кг вл. матер.
80	0,902	9,222	0,1
100	0,91	9,222	0,083
120	0,9235	9,35	0,071
140	0,9285	9,42	0,054
160	0,93	9,54	0,052

Как видно колебания влажности исходной жидкой послеспиртовой барды были незначительны (от 90 до 93 %). Количество влаги, оставшейся в сухом остатке, с увеличением температуры сушильного агента уменьшается. По получаемым результатам возможна корреляция квазиравновесного влагосодержания зависимостью от температуры воздуха и относительной влажности воздуха (при температурах до 100 °С), напр., по типу А.В. Лыкова, Г.К. Филоненко [1, 60].

9. В процессе проведения экспериментов проводилась макровидеосъемка поверхности высыхающей капли с разных ракурсов. Анализ видеозаписей показал, что на поверхности высыхающей капли барды в определенный момент времени начинает формироваться тонкая пленка подсохшей дисперсии. Характер формирования тонкой пленки на поверхности представлен на рис. 5.

Тонкая пленка на поверхности высушиваемой барды формируется при всех исследованных режимах сушки. Соединение визуальных наблюдений с термограммой и кривой сушки позволяет определить время и температуру образца при начале формирования пленки.



**Рис. 5. Формирование пленки на поверхности**

**высыхающей капли барды, нанесенной на твердую подложку:**

1 – капля в начале процесса сушки; 2–5 – процесс формирования пленки;  
6 – капля покрыта пленкой полностью, процесс сушки идет, капля еще не высохла



Обработка экспериментальных данных выявила, что окончательное формирование первоначальной тонкой пленки соответствует на термограмме процесса сушки определенной точке перегиба. Эта точка перегиба отмечается при всех исследованных режимах сушки и характеризует начало монотонного роста температуры образца уже в первом периоде сушки, где для большинства жидких продуктов наблюдается площадка мокрого термометра (рис. 6).

Полученные значения времени формирования пленки на поверхности капли (визуально и с видеосъемки) хорошо коррелируют со временем, характерным для положения точки перегиба на термограмме (рис. 7).

Как показывают вышеприведенные кинетические кривые убыли веса, скорость сушки в первом периоде не претерпевает заметных изменений. Снижение интенсивности испарения, вызываемое образованием корки, компенсируется увеличением температуры поверхности, что наблюдалось во всех без исключения экспериментах при вырождении 1-й температурной площадки [31–37, 52]. Положение точки перегиба предшествующей и последующей точек максимальной кривизны температурной кривой определенно связаны с рассчитываемой температурой мокрого термометра и могут использоваться для идентификации температурно-влажностных зависимостей.

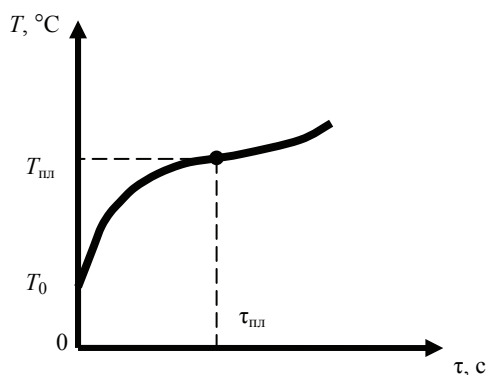


Рис. 6. Положение точки перегиба на термограммах сушки послеспиртовой барды

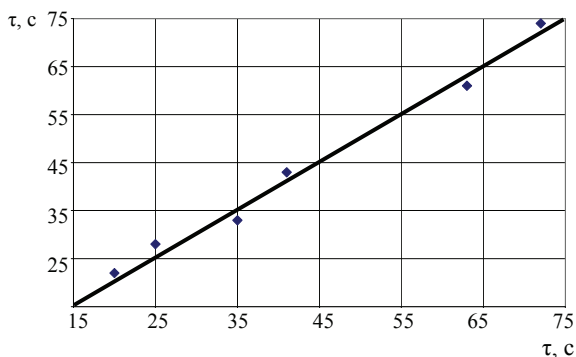


Рис. 7. Корреляция визуально отмечаемого времени формирования пленки и положения точки перегиба на термограмме

\* \* \*

Все вышеизложенное подтверждает целесообразность выбранной методики и высокую актуальность выполняемых исследований. Изучение циркуляции на поверхности и внутри высыхающей капли, проводимое с помощью микромаркеров, позволяет судить о взаимодействии в погранслое и внешней тепло-массоотдаче, и о перемешивании, влияющем на внутреннюю конвективную диффузию в жидкости. Наблюдаемое визуально и видеосъемкой образование структур в высыхающей капле может использоваться для анализа качества исходной барды. Оно относится к фундаментальным современным вопросам физики и термодинамики – упорядочиванию материи из хаоса. Наблюдаемое изменение цвета высыхающей барды может связываться с качеством конечного продукта, что в последние годы стало актуальным в технике сушки многих термолабильных продуктов.

#### *Список литературы*

1. Лыков, А.В. Теория сушки / А.В. Лыков. – 2-е изд. – М. : Энергия, 1968. – 472 с. (1-е изд. 1950 г., 416 с.).
2. Лыков, М.В. Сушка в химической промышленности / М.В. Лыков. – М. : Химия, 1970. – 430 с.
3. Сушильные аппараты и установки : каталог НИИХиммаш. – М. : ЦИНТИхимнефтемаш, 1992. – 80 с.
4. Сажин, Б.С., Научные основы техники сушки / Б.С. Сажин, В.Б. Сажин. – М. : Наука, 1997. – 448 с.
5. Фролов, В.Ф. Моделирование сушки дисперсных материалов / В.Ф. Фролов. – Л. : Химия, 1987. – 208 с.
6. Муштаев, В.И. Сушка дисперсных материалов / В.И. Муштаев, В.М. Ульянов. – М. : Химия, 1988. – 352 с.
7. Mujumdar, A.S. Handbook of Industrial Drying / A.S. Mujumdar. – 3-rd Ed. – New York : Taylor & Francis, 2007. – 1280 p.
8. Strumillo, C. Drying: principles, applications and design / C. Strumillo, T. Kudra. – New York : Gordon and Breach, 1986. – 448 p.
9. Keey, R.B. Drying of Loose and Particulate Materials / R.B. Keey. – New York : Hemisphere, 1992. – 504 p.
10. Гегузин, Я.Е. Капля / Я.Е. Гегузин. – 2-е изд., доп. – М. : Наука, 1977. – 176 с.
11. Волинский, М.С. Необыкновенная жизнь обыкновенной капли / М.С. Волинский. – М. : Знание, 1986. – 144 с.
12. Фукс, Н.А. Испарение и рост капель в газообразной среде / Н.А. Фукс. – М. : Изд-во Акад. наук СССР, 1958. – 92 с.
13. Адамсон, А. Физическая химия поверхностей / А. Адамсон. – М. : Мир, 1979. – 568 с.
14. Сумм, Б.Д. Физико-химические основы смачивания и растекания / Б.Д. Сумм, Ю.В. Горюнов. – М. : Химия, 1976. – 232 с.
15. Дерягин, Б.В. Физико-химия нанесения тонких слоев на движущуюся подложку / Б.В. Дерягин, С.М. Леви. – М. : Изд. Акад. наук СССР, 1959. – 208 с.
16. Рамм, В.М. Абсорбция газов / В.М. Рамм. – 2-е изд., пер. и доп. – М. : Химия, 1976. – 655 с.
17. Трейбал, Р. Жидкостная экстракция / Р. Трейбал. – М. : Химия, 1966. – 724 с.
18. Справочник по распыливающим оросительным и каплеулавливающим устройствам / А.Н. Чохонелидзе [и др.]. – М. : Энергоатомиздат, 2002. – 608 с.
19. Левич, В.Г. Физико-химическая гидродинамика / В.Г. Левич. – 2-е изд., доп. и пер. – М. : Физматиздат, 1959. – 700 с.
20. Химическая гидродинамика / А.М. Кутепов [и др.]. – М. : Бюро Квантум, 1996. – 336 с.
21. Макрокинетика процессов в пористых средах. Топливные элементы / Ю.А. Чизмаджев [и др.]. – М. : Наука, 1971. – 364 с.
22. Хейфец, Л.И. Многофазные процессы в пористых средах / Л.И. Хейфец, А.В. Неймарк. – М. : Химия, 1982. – 320 с.
23. Коновалов, В.И. Исследование наклонного противоточного виб-

рационного экстрактора : дис. ... канд. техн. наук : 05.17.08 / Коновалов Виктор Иванович. – Л., 1961. – 147 с. **24.** Долинский, А.А. Оптимизация процессов распылительной сушки / А.А. Долинский, Г.К. Иваницкий. – Киев : Наукова думка, 1984. – 240 с. **25.** Долинский, А.А. Кинетика и технология сушки распылением / А.А. Долинский, К.Д. Малецкая, В.В. Шморгун. – Киев : Наукова думка, 1987. – 224 с. **26.** Малецкая, К.Д. Теплофизические основы создания новых технологий и совершенствование техники обезвоживания жидкостных материалов в диспергированном состоянии : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.17.08 / К.Д. Малецкая. – Киев, 2003. – 36 с. (на украинском языке). **27.** Коновалов, В.И. Пропиточно-сушильное и клеепромазочное оборудование / В.И. Коновалов, А.М. Коваль. – М. : Химия, 1989. – 224 с. (Рецензия в «Drying Technology – An Intern. Journal». – 1990. – Vol. 8, No. 1. – P. 225–226). **28.** Коновалов, В.И. Оборудование для охлаждения и усадки профилированных резиновых заготовок / В.И. Коновалов. – М. : ЦИНТИ-химнефтемаш, 1988. – 42 с. **29.** Постернак, А.Г. Исследование процессов охлаждения шприцованных резиновых заготовок : дис. ... канд. техн. наук : 05.17.08 : защищена 02.10.80 / Постернак Антон Григорьевич. – Л., 1979. – 237 с. **30.** Прудник, Л.В. Кинетика тепловых и механических процессов обработки шприцованных резиновых заготовок : дис. ... канд. техн. наук : 05.17.08 : защищена 11.05.85 / Прудник Людмила Васильевна. – Тамбов, 1984. – 349 с.

**31.** 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 / Гатапова Наталья Цибиковна. – Тамбов, 2005. – 554 с. **32.** Пахомов, А.Н. Кинетика сушки дисперсий на твердых подложках : дис. ... канд. техн. наук : 05.17.08 : защищена : 16.03.2001 / Пахомов Андрей Николаевич. – Тамбов, 2000. – 225 с. **33.** Сергеева, Е.А. Кинетика испарения растворителей и сушки покрытий на пористых и монолитных материалах : дис. ... канд. техн. наук : 05.17.08 : защищена 16.03.2001 / Сергеева Елена Анатольевна. – Тамбов, 2000. – 210 с. **34.** Шикун, А.Н. Кинетика процессов сушки дисперсий и кристаллообразующих растворов : дис. ... канд. техн. наук : 05.17.08 : защищена: 24.02.2005 / Шикун Алексей Николаевич. – Тамбов, 2004. – 250 с. **35.** Konovalov, V.I. Guest Editorial. Drying R&D Needs: Basic Research in Drying of Capillary-Porous Materials / V.I. Konovalov // Drying Technology – an Intern. Journal. – 2005. – Vol. 23, No. 12. – P. 2307–2311. **36.** Konovalov, V.I. Some Generalized and Particular Issues on Modeling of Complex Drying Processes Based on Temperature-Moisture Relationships : in 3 parts / V.I. Konovalov, T. Kudra, N.Z. Gatapova // 17<sup>th</sup> Intern. drying symposium (IDS-2010), Magdeburg, Germany, 3–6 October 2010. – Magdeburg, 2010. – 1. General statements. – Vol. A. – P. 478–485 ; 2. Specific Targets. Thermally-Thin Bodies. – Vol. A. – P. 248–256 ; 3. Specific Targets. Drying with Essential Temperature Kinetics. – Vol. B. – P. 786–794. **37.** Гатапова, Н.Ц. Единый подход к кинетике и моделированию сушки растворителей, покрытий, жидких дисперсий, кристаллообразующих растворов и волокнистых материалов / В.И. Коновалов, Н.Ц. Гатапова. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2004. – (Препринт Вестник Тамб. гос. техн. ун-та / Тамб. гос. техн. ун-т. – Препринт № 09. Рубрика 02. – 2004. – Т. 10, № 1. – 64 с. **38.** Yang, W.-J. Natural Convection in Evaporating Droplets (University of Michigan) / W.-J. Yang // Handbook of Heat and Mass Transfer. Ed. N.P. Cheremisinoff. – Houston, 1986. – Vol. 1. – P. 211–229. **39.** Савина, Л.В. Кристаллоскопические структуры сыворотки крови здорового и больного человека / Л.В. Савина. – Краснодар : Советская Кубань, 1999. – 96 с. **40.** Шабалин, В.Н. Морфология биологических жидкостей человека / В.Н. Шабалин, С.Н. Шатохина. – М. : Хризостом, 2001. – 304 с.

41. Рапис, Е. Белок и жизнь (самосборка и симметрия наноструктур белка) / Е. Рапис. – Иерусалим ; М. : Зл. Милта-ПКП ГИТ, 2002. – 257 с.
42. Тарасевич, Ю.Ю. Качественный анализ закономерностей высыхания капли многокомпонентного раствора на твердой подложке / Ю.Ю. Тарасевич, Д.М. Православнова // Журн. теорет. физики. – 2007. – Т. 77, вып. 2. – С. 17–21.
43. Яхно, Т.А. Основы структурной эволюции высыхающих капель биологических жидкостей / Т.А. Яхно, В.Г. Яхно // Журн. теорет. физики. – 2009. – Том 79, вып. 8. – С. 133–141.
44. Бараш, Л.В. Испарение и динамика лежащей на подложке капли : автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук : 05.17.08 / Л.В. Бараш. – М., 2009. – 19 с.
45. Водолазская, И.В. Моделирование эволюции фазового фронта в высыхающей на горизонтальной подложке капле коллоидного раствора / И.В. Водолазская, Ю.Ю. Тарасевич, О.П. Исакова // Нелин. мир. – 2010. – Т. 8, № 3. – С. 142–150.
46. Экспериментальное и численное исследование нестационарного испарения капель жидкости / В.И. Терехов [и др.] // Инж.- физ. журн. – 2010. – Т. 83, № 3. – С. 829–836.
47. Исследование механизмов самоорганизации в высыхающих каплях биологических жидкостей [Электронный ресурс] : сайт совместной лаборатории Ин-та математ. проблем биологии РАН и Астрахан. гос. ун-та. – Режим доступа : <http://mathmod.aspu.ru/?id=133>. – Загл. с экрана.
48. Tsapis, N. Onset of Buckling in Drying Droplets of Colloidal Suspensions. (Dept. of Physics, Harvard University, Cambridge, Massachusetts) / N. Tsapis // Physical Review Letters. – 2005. – Vol. 94, No. 54. – P. 018302-1–018302-4.
49. Zheng, Rui. A Study of the Evaporative Deposition Process: Pipes and Truncated Transport Dynamics / Rui Zheng // Ph.D. Thesis / University of Chicago, Dept. of Physics. – Chicago, 2007. – 86 p.
50. Popov Yu.O. Singularities, Universality and Scaling in Evaporative Deposition Patterns / Yu.O. Popov // Ph.D. Thesis / University of Chicago, Dept. of Physics. – Chicago, 2003. – 83 p.
51. Процессы самоорганизации в высыхающих каплях многокомпонентных жидкостей: эксперименты, теория, приложения : материалы I междунар. конф., 3–6 мая 2010 г. CD, ISBN 978-5-9926-03156-6 / АстрГУ, ИМПБ РАН, ИПФ РАН. – Астрахань, 2010.
52. Konovalov, V.I. Macrokinetics of Industrial Processes / V.I. Konovalov, N.Ts. Gatapova // Theoretical Foundn of Chem. Engg. – 2004. – Vol. 38, No. 2. – P. 112–121.
53. Технология спирта / В.Л. Яровенко [и др.]. – М. : Колос-Пресс, 2002. – 464 с.
54. Андросов, А.Л. Промышленные технологии переработки послеспиртовой барды / А.Л. Андросов, И.А. Елизаров, А.А. Третьяков // Вест. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2010. – Том 16, № 4. – С. 954–963.
55. Производственный технологический регламент на получение спирта этилового из крахмалсодержащего сырья для ОАО «Талвис» спиртовое производство. Часть III. Получение, фасовка и хранение сухой барды... – М. : НИИ «Мир-Продмаш», 2006. – 86 с.
56. Романова, Е.В. К вопросу о сушке послеспиртовой барды / Е.В. Романова, А.Ю. Орлов // Актуальные проблемы сушки... : материалы междунар. науч.-техн. семинара / Воронеж. гос. лесотехн. акад. – Воронеж, 2010. – С. 245–248.
57. Современное оборудование для комбинированной кондуктивно-конвективной сушки и термообработки / В.И. Коновалов [и др.] // Вест. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2008. – Т. 14, № 3. – С. 579–583.
58. Производство измерительных приборов и систем контроля [Электронный ресурс] : сайт ОАО «Термодат». – Режим доступа : <http://www.termodat.ru>. – Загл. с экрана.
59. Konovalov, V.I. Drying of Liquid Dispersions – a Unified Approach to Kinetics and Modeling / V.I. Konovalov, N.Z. Gatapova, T. Kudra // Drying Technology – An Intern. Journal (New York). – 2003. – Vol. 21, No. 6. – P. 1029–1047.
60. Филоненко, Г.К. Кинетика сушильного процесса / Г.К. Филоненко. – М.-Л. : Оборонгиз, 1939. – 140 с.

## **Peculiarities of Mechanism and Kinetics of Drying of Dispersion Droplets (on the Example of Stillage after Ethanol is Distilled)**

**Yu.V. Pakhomova, V.I. Konovalov, A.N. Pakhomov**

*Department "Industrial Processes and Devices", TSTU; kvipri@ce.tstu.ru*

**Key words and phrases:** crust formation; depinning; evaporation of the drop; heat and mass transfer; stillage after alcohol distillation; structure formation in the drop; pinning.

**Abstract:** The paper presents the analysis of current research in the area of evaporation and pattern formation in drying drops. We describe the experimental visual drying facility and the experimental technique. The results of experiments in drying drops of stillage after alcohol distillation are presented and analyzed. Further research is discussed and announced.

---

## **Besonderheiten des Mechanismus und der Kinetik des Trocknens der Dispersionentropfen (am Beispiel der Trocknens der Nachspiritusschlempe)**

**Zusammenfassung:** Es ist die Analyse der modernen Untersuchungen auf dem Gebiet der Dämpfe und der Strukturbildung in den trocknenden Tropfen erfüllt. Es ist die geschaffene experimentelle visuelle Trockenanlage und die Methodik der Experimente beschrieben. Es sind die Ergebnisse der Experimente im Trocknen der Tropfen der Nachspiritusschlempe angeführt und analysiert. Es sind die Richtungen der Weiteruntersuchungen besprochen und annonciert.

---

## **Particularités du mécanisme et de la cinétique du séchage (à l'exemple du séchage de la drêche d'après alcool)**

**Résumé:** Est effectuée une analyse des études contemporaines dans le domaine de la vaporisation et de la formation de structure dans les gouttes séchées. Est décrite l'installation visuelle de séchage et la méthode des expériences. Sont cités et analysés les résultats des expériences sur le séchage des gouttes de la drêche d'après alcool. Sont discutées et annoncées les orientations des études futures.

---

**Авторы:** *Пахомова Юлия Владимировна* – аспирант кафедры «Технологические процессы и аппараты»; *Коновалов Виктор Иванович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологические процессы и аппараты»; *Пахомов Андрей Николаевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологические процессы и аппараты», ГОУ ВПО «ТГТУ».

**Рецензент:** *Гатапова Наталья Цибиковна* – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Технологические процессы и аппараты», ГОУ ВПО «ТГТУ».