

УДК 66. 047

**ГЕОМЕТРИЯ, ЦИРКУЛЯЦИЯ И ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС
ПРИ ИСПАРЕНИИ КАПЛИ НА ПОДЛОЖКЕ**

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

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

Ключевые слова и фразы: испарение капли; послеспиртовая барда; профиль капли; теплообмен капли; циркуляция в капле.

Аннотация: Приводятся зависимости для расчета профиля капли (слоя) жидкости, лежащей на твердой горизонтальной подложке для случаев смачивания и не смачивания поверхности подложки. Получены формулы расчета объема и площади наружной поверхности капли. Приведены рассчитанные и экспериментальные профили для капель жидкой послеспиртовой барды и воды, лежащих на фторопластовом диске. Показана необходимость учета точного профиля капли для расчета процессов теплообмена. Приведены результаты исследований внутренней циркуляции в каплях и высказаны соображения о влиянии на процесс сушки течений внутри капли, внешнего теплообмена и теплообмена с подложкой.

1. Процесс сушки жидких дисперсий в виде капель (свободных – парящих или движущихся; неподвижных или стекающих – лежащих, сидячих, висящих) широко распространен в технике. Это сушка продуктов химической, пищевой и других отраслей промышленности в распылительных и пневматических сушилках, в сушилках кипящего слоя, в том числе со взвешенным слоем инертных частиц, а также в барабанных, роторных трубчатых или дисковых, спиральных, со встречными закрученными потоками и др. [1–8]. В реальных условиях такие процессы сушки очень сложны: испаряется множество (ансамбль, рой) капель, взаимодействующих между собой; процесс имеет нестационарный характер и протекает в среде с неравномерной температурой и концентрацией пара испаряющейся жидкости; капли неравномерно движутся по отношению к среде, деформируются, внутри них возникает циркуляция; теплообмен между каплями, частицами и средой происходит многими механизмами (теплопроводностью, кондукцией, конвекцией, тепловым излучением, их сочетаниями); капли на подложке, инертной частице или на грануле высушенного продукта взаимодействуют с ними, смещаются, обмениваются теплом.

Испарение капель является важнейшим процессом во многих других технических устройствах (напр., двигатели внутреннего сгорания, градирни) и в природных явлениях (напр., дождь, град, туман, роса). В последние годы резко возрос

интерес к механизму явлений в капле в связи новыми физическими и физико-химическими приложениями и направлениями исследований, в том числе в области нанотехнологий, в теории самоорганизации структур [9–21].

Теория этих процессов очень сложна и должна строиться на модельном экспериментальном изучении всех основных составляющих явлений, их анализе и выделении лимитирующих факторов для конкретных случаев.

В наших предыдущих публикациях [22, 22а] был дан краткий обзор и анализ современных исследований в области испарения и структурообразования в высыхающих каплях, а также приведены результаты собственных экспериментов по сушке капель послеспиртовой барды на подложке. Продолжим изучение геометрии, циркуляции и тепломассопереноса в каплях.

2. Форма и размеры капли, лежащей на подложке, зависят от краевого угла смачивания, поверхностного натяжения, наклона подложки, фиксации (пиннинга или депиннинга) линии контакта капли с подложкой и пр. Геометрия капель, поверхности жидкости в капиллярах и порах тела, менисков и пленок представляет большой практический и общенаучный интерес не только для процессов сушки, но для всех гетерофазных процессов в природе, технике и экспериментальных исследованиях (напр., процессов смачивания, растекания, адсорбции, экстрагирования, осаждения, коагуляции, флотации, пропитки, нанесения покрытий, в электрохимических процессах, в полярографии, в топливных элементах, в почвенных и геофизических процессах и пр., вплоть до растительных и животных организмов). Исследованиями в этой области занимались крупнейшие ученые, начиная с Юнга и Лапласа и включая Ландау, Дерягина, Левича, Лыкова и др. [9–20, 23, 24]. Эти исследования продолжаются и в настоящее время.

В процессе сушки размеры и форма капли изменяются. Для экспериментального изучения мы использовали метод обрисовки формы сидячей на поверхности подложки капли. Капля жидкости дозировалась на фторопластовую (или другую) подложку и производилась макросъемка капли с оптическим двенадцатикратным увеличением. Затем форма капли анализировалась в графическом редакторе на компьютере, с измерением ее высоты и угла смачивания. Пиннинг капли обеспечивался острым углом края диска.

Смачиваемость сильно зависит от чистоты жидкости и поверхности, от наличия ПАВ и часто является весьма нестабильной. Поэтому в обычных, не строго контролируемых условиях, надежных данных по углам смачивания быть не может. В зависимости от свойств жидкости и подложки замеренные углы смачивания послеспиртовой барды и фторопласта меняются от 45 до 90°. Для воды и фторопласта угол смачивания составляет около 103°. Это соответствует немногочисленным имеющимся литературным данным [13, 25].

Изучение формы капель и слоев жидкости на разных подложках широко проводилось в работах под руководством В.И. Коновалова на кафедре ПАХТ ТГТУ (ТИХМа) и ВНИИРТмаша. Были выполнены большие циклы работ по пропитке, промазке и сушке кордных материалов и по шприцеванию, усадке и охлаждению резиновых заготовок [26–33]. Проекцию капли, края слоя или мениска на резине, ткани, шнуре или волокне фотографировали, в том числе под микроскопом, а чаще делали на экран, обрисовывали контур вручную и затем производили необходимые измерения и расчеты.

3. Характерным и наиболее надежным для измерения и анализа является слой жидкости на полубесконечной горизонтальной пластине (рис. 1). Коноваловым В.И. [28, 29] были выведены уравнения геометрии такого слоя, а также рассмотрены случаи конечной пластины, наклонной пластины, течения жидкости по пластине, слива с края пластины и гидравлического прыжка при подаче струи жидкости на пластину. Дадим на базе этих работ необходимые расчетные зависимости для наших случаев.

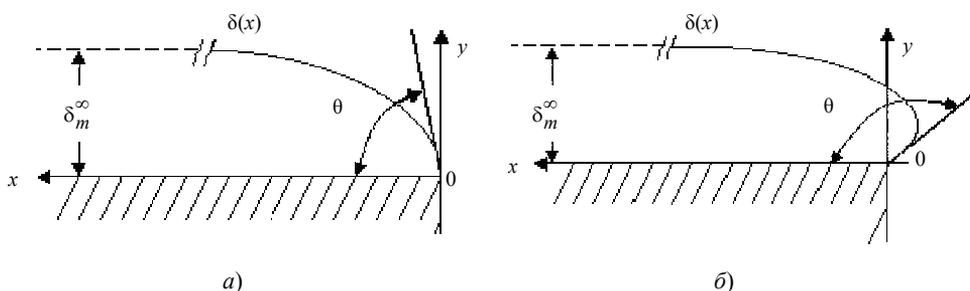


Рис. 1. Слой жидкости на полубесконечной пластине:
a – угол смачивания меньше 90° ; *б* – угол смачивания больше 90°

Постановка задачи:

статическое давление в слое $\Delta P_c = \rho g \delta(x); \quad (1)$

капиллярное давление по закону Лапласа $\Delta P_k = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right); \quad (2)$

общее давление $\Delta P_o = \Delta P_c + \Delta P_k. \quad (3)$

Поскольку при $x \rightarrow \infty, \delta \rightarrow \delta_m^\infty$ (см. рис. 1) поверхность стремится к плоской горизонтальной, то при этом $R \rightarrow \infty, \Delta P_k \rightarrow 0$. Таким образом, суммарное общее давление в любом сечении $x \geq 0$ равно одному статическому в бесконечно удаленном сечении

$$\rho g \delta(x) + \frac{\sigma}{R(x)} = \rho g \delta_m^\infty. \quad (4)$$

Для рассматриваемого цилиндрического слоя кривизна поверхности в декартовых координатах выражается формулой

$$\frac{1}{R(x)} = \frac{\frac{d^2 y}{dx^2}}{\left(1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right)^{3/2}}. \quad (5)$$

Здесь

$$\frac{dy}{dx} = \delta'(x), \quad \frac{d^2 y}{dx^2} = \delta''(x). \quad (6)$$

Подставляя выражение (5) в (4), получаем исходное уравнение для интегрирования

$$\frac{\sigma \delta''(x)}{\left(1 + (\delta'(x))^2 \right)^{3/2}} = \rho g \left(\delta_m^\infty - \delta(x) \right). \quad (7)$$

Граничными условиями будут:

$$\delta'(0) = \text{tg}(\theta); \quad (8)$$

$$\delta'(\delta_m^\infty) = 0. \quad (9)$$

Приведем вывод решения для поставленной задачи.

Из уравнения (7) с учетом (8), (9) можно получить выражение для δ_m^∞ .
Перепишем

$$\frac{\delta''(x)}{(1+(\delta'(x))^2)^{3/2}} = -\frac{\rho g}{\sigma} (\delta(x) - \delta_m^\infty). \quad (10)$$

Введем обозначения: $F = \delta(x) - \delta_m^\infty$; $a = -\frac{\rho g}{2\sigma}$.

Соответственно

$$\delta'(x) = F', \quad \delta''(x) = F''. \quad (11)$$

Из выражения (10) с учетом (11), умножив обе части на $\frac{dF}{dx}$, получим

$$\frac{dF}{dx} F'' (1+(F')^2)^{-3/2} = 2aF \frac{dF}{dx}. \quad (12)$$

Интегрируем обе части (12) по F :

$$\int F'' (1+(F')^2)^{-3/2} dF = -(1+(F')^2)^{-1/2} + C_1; \quad (13)$$

$$\int 2aF dF = aF^2 + C_2. \quad (14)$$

Приравняем уравнения (13) и (14)

$$-(1+(F')^2)^{-1/2} + C_1 = aF^2 + C_2. \quad (15)$$

Перейдем от F к δ (знаки у корня выбираем по физическому смыслу)

$$-\frac{1}{\sqrt{1+(\delta'(x))^2}} = a(\delta(x) - \delta_m^\infty)^2 + (C_2 - C_1), \quad (16)$$

$$C_2 - C_1 = C.$$

Подставляем в уравнение (16) граничные условия (9) $\delta'(\infty) = 0$; $\delta(\infty) = \delta_m$;
 $C = -1$

$$-\frac{1}{\sqrt{1+(\delta'(x))^2}} = a(\delta(x) - \delta_m^\infty)^2 + 1. \quad (17)$$

Используя граничные условия (9) $\delta'(0) = tg(\theta)$; $\delta(0) = 0$, получаем максимальную толщину лежащего слоя большой ширины в виде

$$\delta_m^\infty = \sqrt{\frac{(1 - \cos \theta)}{-a}} = \sqrt{\frac{2\sigma}{\rho g} (1 - \cos(\theta))}. \quad (18)$$

Уравнение (17), описывающее профиль слоя, относительно δ не решается. Однако его удастся проинтегрировать относительно $x(\delta)$.
С учетом

$$\delta' = \frac{d\delta}{dx} \text{ и } a = -\frac{\rho g}{2\sigma}, \quad (19)$$

обозначив

$$\frac{1}{1 + \frac{1}{\left(\frac{dx}{d\delta}\right)^2}} = B, \quad (20)$$

получим $B(\delta) = [a(\delta(x) - \delta_m)^2 + 1]^2$, откуда:

$$\frac{dx}{d\delta} = \pm \sqrt{\frac{B}{1-B}}; \quad (21)$$

$$dx = \pm \sqrt{\frac{B}{1-B}} d\delta. \quad (22)$$

Если $\theta \leq 90^\circ$ (для случая смачивания, см. рис. 1, а), то при изменении ординаты – толщины слоя от 0 до δ его абсцисса монотонно изменяется от 0 до x . Соответственно решением (22) будет

$$x = + \int_0^{\delta(x)} \sqrt{\frac{B}{1-B}} d\delta. \quad (23)$$

Если жидкость не смачивает поверхность подложки, и $\theta > 90^\circ$ (см. рис. 1, б), то при возрастании δ абсцисса сначала изменяется в отрицательную сторону, что дает

$$x = - \int_0^{\delta(x)} \sqrt{\frac{B}{1-B}} d\delta, \quad (24)$$

вплоть до точки перегиба, в которой $\left. \frac{dx}{d\delta} \right|_{\delta=\delta_1} = 0$, откуда получаем ординату точки перегиба

$$\delta_1 = \sqrt{\frac{2\sigma}{\rho g} (\sqrt{1 - \cos \theta} - 1)}. \quad (25)$$

Здесь $\cos \theta < 0$, поэтому, как и должно быть, $\delta_1 > 0$. Абсцисса точки перегиба, естественно, будет равна

$$x_1 = - \int_0^{\delta_1} \sqrt{\frac{B}{1-B}} d\delta. \quad (26)$$

Здесь $x_1 < 0$.

В диапазоне $x > x_1$, $\delta > \delta_1$, профиль рассчитывается по получаемой из выражения (22) для этого случая зависимости

$$x = x_1 + \int_{\delta_1}^{\delta(x)} \sqrt{\frac{B}{1-B}} d\delta. \quad (27)$$

Интегралы в этих уравнениях в элементарных или специальных функциях не берутся, поэтому расчеты ведутся численными методами.

4. Рассмотрим теперь слой жидкости на конечной горизонтальной пластине шириной $2b$ (рис. 2). Профиль цилиндрического слоя здесь симметричен относительно полуширины. Он будет совпадать также с профилем капли, лежащей на диске радиусом $R = b$.

Искривленный слой жидкости здесь стремится изогнуть пластину аналогично надутому пузырю. Общее давление на подложке неизвестно. Ясно только, что оно постоянно в слое, так как иначе в нем должно было бы быть самопроизвольное течение жидкости. Запишем давление в слое в виде $\rho g C_1$.

Соответственно вместо уравнения (4) получим

$$\rho g \delta(x) + \frac{\sigma}{R(x)} = \rho g C_1, \quad (28)$$

а вместо уравнения (10) производную в точке максимальной толщины слоя (высоты капли)

$$\delta'(\delta_m) = 0. \quad (29)$$

В этом случае найти в явном виде δ_m и δ_1 (при $\theta > 90^\circ$) не удастся. Используя тот же порядок решения, что и выше, получаем:

$$\delta_m = C_1 - \sqrt{\frac{a C_1^2 + 1 - \cos \theta}{a_1}}; \quad (30)$$

$$\delta_1 = C_1 - \sqrt{\frac{a_1 C_1^2 - \cos \theta}{a_1}}. \quad (31)$$

Величину C_1 здесь необходимо находить итерациями из уравнения

$$b = - \int_0^{\delta_1} \sqrt{\frac{B_1}{1-B_1}} d\delta + \int_{\delta_1}^{\delta_m} \sqrt{\frac{B_1}{1-B_1}} d\delta. \quad (32)$$

Здесь

$$a_1 = \frac{\rho g}{2\sigma}; \quad (33)$$

$$B_1 = [a_1(C_1 - \delta)^2 + \cos(\theta) - a_1 C_1^2]^2. \quad (34)$$

Далее профиль слоя или капли рассчитывается по тем же зависимостям (23), (26), (27) с подстановкой вместо B соотношения B_1 (34).

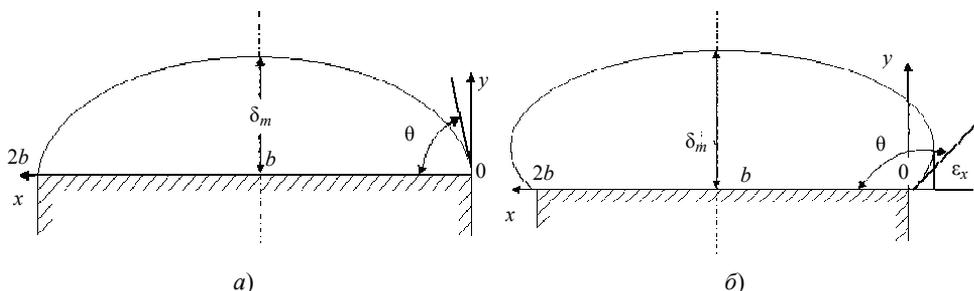


Рис. 2. Слой жидкости на ограниченной пластине (капля на диске):
 a – угол смачивания меньше 90° ; b – угол смачивания больше 90°

5. Выше рассматривались слой (капли) максимальных «равновесных» размеров, когда их форма определяется статическим равновесным краевым углом. В процессе сушки, при испарении части жидкости, объем капли уменьшается. При этом если линия контакта капли с подложкой фиксируется условиями контакта («пиннинг»), то поверхность контакта не меняется, а уменьшается высота капли и краевой угол снижается, становясь меньше статического равновесного. В условиях «депиннинга», наоборот, краевой угол может сохраняться, а уменьшается диаметр посадочной поверхности капли.

Профиль слоя или капли и в том, и в другом случаях может рассчитываться по приведенным выше зависимостям, но итерациями в двух вариантах: 1) для заданных объема капли и посадочного диаметра («пиннинг») при переменном θ (зависимости для расчета объема получены далее); 2) для заданного объема капли и угла смачивания – при переменном посадочном диаметре («депиннинг»).

Необходимые расчетные процедуры получены в настоящей работе.

Для процессов сушки смачивающих подложку дисперсий режим пиннинга вначале может определяться «острым» краем подложки ограниченных размеров или инертной частицы [21], а затем дополнительно смачиваемыми отложениями сухого остатка и образованием высохшей корки продукта (при этом от нее будет зависеть и сама форма капли).

При сушке ансамбля отдельных капель на поверхностях больших размеров (например, в трубчатых или дисковых роторных сушилках) и при плохом смачивании капли могут усыхать и по диаметру.

Какое расчетное приближение из вышеуказанных нужно использовать – следует решать на основе прямых экспериментальных данных.

6. В расчетах задач тепломассопереноса необходимо кроме профиля капли знать объем капли и площадь наружной поверхности капли. Эти формулы могут быть получены для капли как для тела вращения с использованием вышеприведенных зависимостей для профиля капли. Получим их.

а) Для $\theta \leq 90^\circ$ при профиле капли $\delta(x)$ имеем:

площадь профиля S_0

$$S_1 = b\delta_m - \int_0^{\delta_m} x(\delta)d\delta, \quad S_0 = 2S_1; \quad (35)$$

периметр, смоченный каплей,

$$P_{\text{кап}} = \pi d_{\text{кап}} = 2\pi b;$$

объем капли

$$V_{\text{кап}} = \pi \int_0^{\delta_m} (x(d_m) - x(\delta))^2 d\delta; \quad (36)$$

площадь наружной поверхности капли

$$S_{\text{кап}} = 2\pi bL = 4\pi b \int_0^{\delta_m} \sqrt{1 + (x(\delta))^2} d\delta, \quad (37)$$

где $L = 2 \int_0^{\delta_m} \sqrt{1 + (x(\delta))^2} d\delta$.

б) Для $\theta > 90^\circ$ при профиле капли $\delta(x)$ получаем:

площадь профиля S_0

$$S_1 = (b + x(d_x))\delta_m - \int_0^{\delta_m} x(\delta)d\delta, \quad S_0 = 2S_1; \quad (38)$$

периметр, смоченный каплей,

$$P_{\text{кап}} = \pi d_{\text{кап}} = 2\pi b;$$

объем капли

$$V_{\text{кап}} = \pi \int_0^{\delta_m} (x(d_m) - x(\delta))^2 d\delta; \quad (39)$$

площадь наружной поверхности капли

$$S_{\text{кап}} = 2\pi bL = 4\pi b \int_0^{\delta_m} \sqrt{1 + (x(\delta))^2} d\delta, \quad (40)$$

$$\text{где } L = 2 \int_0^{\delta_m} \sqrt{1 + (x(\delta))^2} d\delta.$$

7. При расчетах параметров лежащей капли часто принимают форму сферической чаши (сегмента сферы). Допустимость такого приближения должна оцениваться сравнением истинных профилей с приближенными сферическими. Такие наши оценки приведены ниже.

Иногда для оценки влияния массовых сил (в т.ч. сил тяжести) на искривление свободной поверхности используют число Бонда Bo (в Европе – число Этвеша $Еo$) [10, 12, 13, 20], например, в виде

$$Bo = \frac{\rho g h r_0}{2\sigma \sin \theta}.$$

При существенном влиянии поверхностных сил будет $Bo \approx$ или > 1 , и искривление сферической поверхности значительно. При лимитирующем влиянии массовых сил, наоборот, $Bo \ll 1$ и искривлением сферической поверхности можно пренебречь. Для наших случаев достаточно крупных капель обычно $Bo \geq 1$, и пренебрежение искривлением поверхности может дать существенные ошибки, что и показано ниже прямыми расчетами.

8. Приведем расчетные и экспериментальные профили для капель жидкой послеспиртовой барды и воды, нанесенных на фторопластовые диски (см. рис. 3). Расчеты проводились в MathCad.

На рис. 3 *а – в* приведены профили капли барды на фторопластовом диске при разных возможных углах смачивания $\theta = 45, 70$ и 90° . Видно увеличение высоты и объема капли при увеличении краевого угла. На фрагменте 3, *б* пунктиром приведен также экспериментальный профиль. Видно, что совпадение полное, в пределах погрешности измерения угла смачивания и поверхностного натяжения.

На рис. 3, *г* дан профиль капли воды на фторопластовом диске в условиях плохого смачивания для $\theta = 103^\circ$. Характерно «нависание» края капли над диском (см. также рис. 2, *б*).

На рис. 3 *в* и *г* пунктиром даны профили капли в сферическом приближении. Видно их существенное отличие, особенно проявляющееся в различиях вычисленных объемов и поверхностей, а именно это важно для описания сушки. Погрешность здесь составляет обычно от 20–25 % и выше, вплоть до 85 %.

Ясно, что для приемлемой точности расчетов, даже в инженерном описании, нужно использовать приведенные корректные и неупрошенные расчеты формы, поверхности и объема капель (или их аппроксимации).

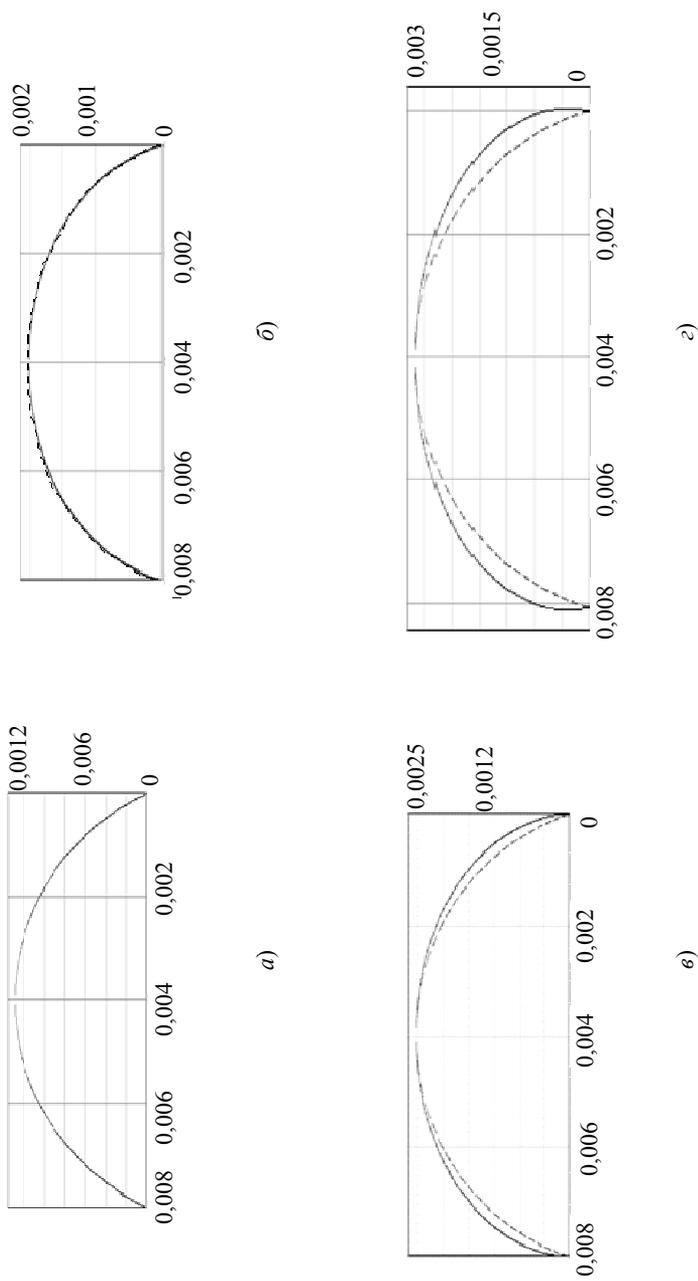


Рис. 3. Профили капли послеспиртовой барды и воды на фторопластовом диске:

$\sigma = 0,055$ Н/м для барды и $\sigma = 0,07$ Н/м для воды; радиус диска $b = 4,0$ мм; расчетный профиль – сплошная линия;
 а, б, в – капли барды, угол смачивания $\theta = 45, 70$ и 90° соответственно; г – капля воды на фторопластовом диске, угол смачивания $\theta = 103^\circ$;
 б – пунктир – экспериментальный профиль; в, г – пунктир – сферический профиль

9. При взаимодействии с обтекающим каплю или пузырь потоком внутри частицы возникает циркуляция из-за поверхностного трения. Капля ведет себя как твердое тело только при весьма малых размерах $Re \ll 1$ (так называемое «стоксово приближение»). Внутренние циркуляционные контуры в жидкой капле, естественно, имеют классический торообразный вид. Они хорошо изучены теоретически и экспериментально. Получены математические описания профилей и скоростей, например, в виде знаменитых и часто применяемых формул Рыбчинского–Адамара, реализующиеся при значительной вязкости несущей среды [12, 18, 34]. При малых значениях числа Рейнольдса они переходят в формулу Стокса. Известны также приближения Буссинеска, Гиббса, Тэйлора и др. Широко исследовалось также влияние поверхностно-активных веществ и «самопроизвольная» конвекция по типу Марангони. Описания динамики колебаний и пульсаций капли или пузыря разработаны Р.И. Нигматулиным [34].

Однако по внутренней циркуляции в обтекаемых потоком каплях на подложке работ почти нет. Ряд ссылок был дан в нашей предыдущей статье [22]. Важные эксперименты были выполнены с подвешенной каплей А.А. Долинским и К.Д. Малецкой [35–37], но по сушке капель. Важнейшая работа В.Д. Янга [38] по испарению органических растворителей в капле на подложке, но при свободной конвекции, осталась, к сожалению, мало известной и практически не цитируется. В недавней работе Л.Ю. Бараша [39] (ИТФ им. Л.Д. Ландау) приводятся численные решения и экспериментальные результаты по «свободно» возникающим в капле (толуола) внутренним вихрям, число которых может меняться. В последней работе Д. Перданы и др. [40] (Нидерланды) испарение и сушка капли на подложке рассматривается интегрально, без изучения циркуляции.

Поскольку циркуляция имеет существенное значение для интенсивности испарения и образования сухого остатка, в нашей работе выполняются эксперименты по прямому наблюдению циркуляционных течений – вихрей в испаряющейся капле на подложке в потоке воздуха.

Использовалась макровидеосъемка с визуализацией течения. На поверхность капли помещался легкий нерастворимый маркер (один или несколько). В качестве маркера была выбрана частица «сгоревшей» барды размером около 0,1 мм. Результаты анализа видеозаписей поведения маркеров представлены на рис. 4–7: рис. 4 – общая схема циркуляционных течений; рис. 5 – течения при малых скоростях обдува; рис. 6 – течения при высоких скоростях обдува и рис. 7 – сдвиг части состава с подложки при дальнейшем повышении скорости потока.

Кроме общей характерной схемы поверхностных и донных течений (см. рис. 4), представляют интерес их разновидности и варианты (см. рис. 5–7).

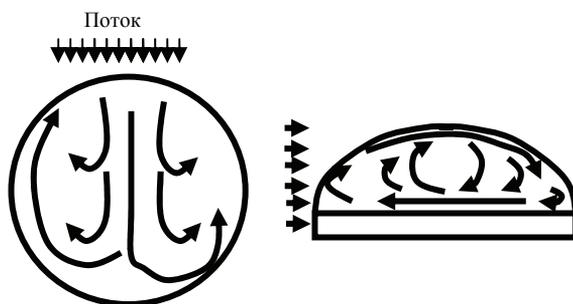


Рис. 4. Общая схема поверхностных и донных циркуляционных течений в капле барды на подложке при обдуве воздухом

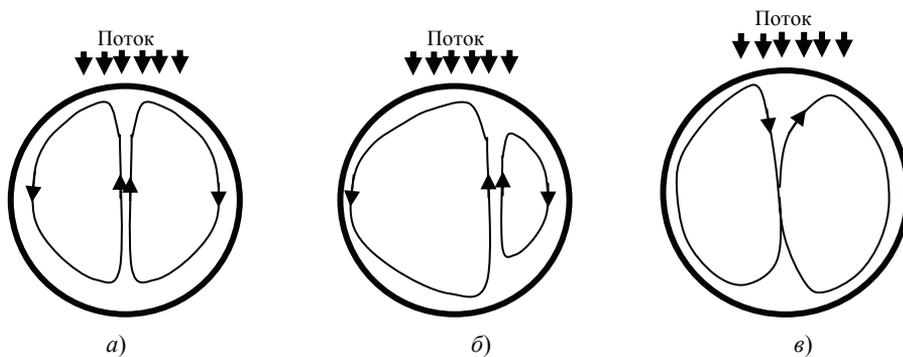


Рис. 5. Циркуляционные течения в капле барды при небольших скоростях обдува

При обдуве капли потоком при небольших скоростях воздуха, обычно до 3–4 м/с (см. рис. 5, а), наблюдаются два ярко выраженных крупных продольных по направлению потока циркуляционных течения, направленных друг к другу. Скорость течения жидкости в подобных течениях примерно одинакова.

Размер формирующихся течений может быть не одинаковым (см. рис. 5, б). Одно течение может вовлекать в себя больший объем жидкости, другое – меньший. Скорость течения жидкости в таких потоках разная, причем в большем по контуру течения наблюдается большая скорость, а в меньшем – меньшая.

Иногда изменение размеров циркуляционных течений имеет пульсирующий характер (сначала увеличение одного контура, затем его уменьшение), что приводит к взаимному пересечению вихрей и формированию сложного восьмеркообразного контура течения (см. рис. 5, в). При этом формируются мелкие вихри в остальном сечении капли, направление вращения которых может быть разным.

Увеличение скорости обдува (до 5–6 м/с) может приводить к повороту циркуляционных течений на 90° (рис. 6, а). При этом могут наблюдаться два ярко выраженных крупных циркуляционных течения направленных друг к другу, но поперек потока. Скорость течения жидкости в подобных течениях разная. Как правило, в лобовом контуре (ближнем к потоку) скорость меньше, чем в тыловом (дальнем от набегания потока).

Аналогично продольным течениям, формирующимся при малых скоростях обдува, размер формирующихся поперечных течений при высоких скоростях обдува может быть не одинаковым (рис. 6, б). Одно течение может вовлекать в себя больший объем жидкости, другое – меньший. Скорость течения жидкости в таких потоках разная, причем в большем по контуру течения наблюдаемая скорость часто больше, чем в меньшем контуре. Также, как правило, в лобовом контуре (ближнем к потоку) скорость меньше, чем в тыловом (дальнем от набегания потока).

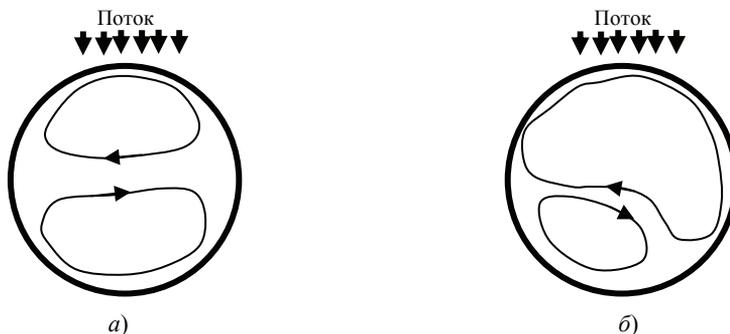


Рис. 6. Циркуляционные течения в капле при высоких скоростях обдува

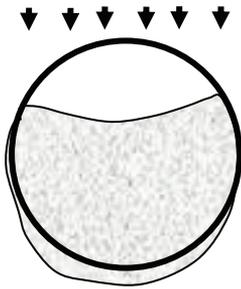


Рис. 7. Сдув части капли с подложки при скоростях обдува более 7 м/с

Наблюдаемые в ряде приведенных случаев «парадоксальные» течения подчеркивают сложность механики таких потоков и заслуживают самостоятельного изучения. Возможно, частично они объясняются наложением поверхностных и донных течений

Наконец при скоростях обдува более 7 м/с наблюдается сильное колебание поверхности капли, перемещение части капли с подложки со стороны потока в сторону тыла капли и частичное стекание жидкости с края диска (рис. 7). Маркеры собираются в тыльной стороне капли и совершают низкоамплитудные колебательные движения.

Исходя из собственного анализа характера течений в капле, можно выделить их особенности и связь со следующими факторами.

1) *Характер (фракционный состав, размеры, плотность и т.п.) дисперсной фазы в испаряющейся капле.* Чем меньше вязкость жидкой фазы, тем легче возникают вихревые течения. При этом размер этих течений меньше, чем для среды с большей вязкостью. Для воды вихревые течения более ярко выражены, чем для барды.

Чем меньше концентрация твердой фазы, тем легче формируется циркуляционное течение. Например, в сиропе практически не наблюдается циркуляционных течений.

2) *Скорость и взаимное ориентирование потока сушильного агента и поверхности капли.* В диапазоне скоростей, которые не сдувают каплю с подложки, чем выше скорость, тем легче формируется циркуляционное течение. Так, например, для воды и для барды при скорости сушильного агента 3 м/с циркуляционное течение менее интенсивное, чем при скорости 5 м/с.

3) *Интенсивность теплоподвода со стороны подложки.* Можно утверждать, что чем выше градиент температур в капле, тем легче формируется вихревое течение.

Так, например, для воды в начале процесса сушки капли интенсивность циркуляции выше, чем в первом периоде.

4) *Характер взаимодействия подложки и испаряющейся жидкости.* Можно утверждать, что чем выше адгезия жидкости к подложке, тем труднее формируются циркуляционные течения. Так, например, для воды циркуляционные течения более интенсивные, чем для барды в сходных условиях.

5) *Изменения циркуляции в процессе прогрева и испарения жидкой капли.* В начале сушки капли идет испарение жидкости с примерно постоянной скоростью, температура возрастает, но классическая температура мокрого термометра может и не фиксироваться. Концентрация дисперсной составляющей в капле и температура увеличиваются, частично начинается отложение сухого остатка на краю капли и образование корочки на поверхности капли. Вязкость, поверхностное натяжение и угол смачивания меняются в зависимости от сочетания концентрации и температуры (в разные стороны). Соответственно меняется интенсивность циркуляционных течений. При постепенном образовании корочки на поверхности она снижается, а при образовании корочки по всей поверхности циркуляция, естественно, полностью прекращается. Этому соответствует критическая точка и перелом на температурной кинетической кривой [22].

Указанные факторы могут влиять как отдельно, так и в комплексе, что требует дополнительных исследований в этой области.

10. Не все сушилки для сушки жидких дисперсий, упомянутые выше в п. 1, пригодны для сушки послеспиртовой барды.

Для классических распылительных сушилок возникают затруднения с распылением исходного продукта, поскольку после концентрирования многокорпусным выпариванием барда плохо текуча. Для ряда продуктов, например, некоторых красителей, приходится использовать даже предварительное разбавление, что соответственно увеличивает энергозатраты.

В последних крупнотоннажных проектах спиртовых заводов применяются роторные трубчатые или дисковые сушилки [22, 41]. Они имеют большую поверхность контакта и весьма производительны, но чрезвычайно металлоемки, тяжелы и сложны в обслуживании. Сушка должна происходить в виде гранул, поэтому используется предварительно получаемая затравка из высушенного продукта, подаваемая в сушилку, на которую потом уже распределяется высушиваемая барда.

Весьма привлекательны сушилки с подвижным слоем инертных частиц [42], особенно для небольших и средних производительностей. Они имеют намного меньшую металлоемкость по сравнению с роторными сушилками и весьма высокий удельный съем по испаренной влаге C , м³ объема. Исходный продукт перед сушкой может быть от жидкой дисперсии до густой пасты. В качестве инерта обычно используются фторопластовые кубики или шарики [22]. На кафедре ПАХТ ТГТУ был также разработан и запатентован «бинарный» инерт из смеси фторопластовых и алюминиевых частиц, обладающий рядом преимуществ [33, 43, 44]. Однако обычные сушилки кипящего слоя с инертном без побудителя [45] оказываются ненадежными из-за опасности залипания. Более надежны сушилки с инертном, побуждаемым каким либо способом. Наиболее известна и испытана серия сушилок «СИН» НИИХиммаша [46], с механической мешалкой в слое инерта, с производительностями до 1000 кг/ч по испаренной влаге. Для сушки барды они пока не применялись. Имеется также ряд предложений по другим схемам сушильных установок с побуждаемым слоем инертного материала, например:

– установки виброкипящего слоя, серия ОАО НИИ «Мир-Продмаш», до 175 кг/ч по испаренной влаге [47];

– установки с двумя встречно-закрученными потоками, разработка Санкт-Петербургского государственного университета низкотемпературных и пищевых технологий, изготовитель компания «Портал-Инжиниринг», производительностью до 120 кг/ч по испаренной влаге [48];

– установки с вращающимся слоем инерта «Торнадо», с распылением продукта форсунками внутрь слоя, компании «Consit Pro», малой производительности – от 15 кг/ч по испаренной влаге [49].

Мы ориентируемся на сушилки кипящего слоя с побуждаемым инертным носителем, наиболее приемлемые для предприятий небольшой и средней производительности.

11. Определяющим для успешного и экономичного применения сушилок с инертном для барды, кроме условий залипания, удаления высохшего продукта и его качества, является удельный теплосъем с единицы объема сушилки. Он определяется интенсивностью тепло- и массообмена в слое между продуктом, инертном и сушильным агентом и между сидящими каплями и подложкой. Для расчета необходимо знать средние величины коэффициентов массо- и теплоотдачи при испарении капли, теплоотдачи для высохшей капли и продукта, теплоотдачи между средой и подложкой – инертном. Обзоры собственных и литературных результатов по внешнему тепло- и массообмену регулярно давались в публикациях и диссертациях кафедры ПАХТ ТГТУ, выполняемых под руководством В.И. Коновалова [50, 26, 30–33].

Данные по внутренней циркуляции в каплях и по локальному тепло- и массообмену представляют значительный общенаучный интерес, однако, для инженерных расчетов необходимы среднеинтегральные зависимости.

Классическими для небольших капель являются широко применяемые (часто без необходимой проверки для конкретных случаев) критериальные уравнения типа $Nu = A_1 + A_2 Re^{A_3} Pr_{\text{диф}}^{A_4}$. Иногда их называют уравнениями Шервуда и используют обозначения вместо Nu – число Шервуда Sh и вместо $Pr_{\text{диф}}$ – число Шмидта Sc . Величины коэффициентов надо определять или уточнять экспериментально для конкретных случаев.

В нашем случае можно ожидать величины A_1 – пренебрежимыми, показатель при Re – порядка 0,5–0,8, показатель при $Pr_{\text{диф}}$ – порядка 0,3–0,4.

Обычно [26, 30, 50] коэффициенты теплоотдачи при испарении в 1,2–1,8 (в среднем – в 1,5) раза больше, чем при «сухой» теплоотдаче.

Часто возможна кусочно-постоянная аппроксимация коэффициентов теплоотдачи по времени сушки: в начале $\alpha \approx \alpha_{\text{исп}}$, затем после критической точки $\alpha \approx \alpha_{\text{сух}}$.

* * *

Изложенные результаты и соображения используются в дальнейших работах кафедры ТПА ТГТУ по механизму переноса в каплях и по созданию современного оборудования для сушки дисперсий, в том числе – для послесушительной барды.

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. Сажин, Б.С. Научные основы техники сушки / Б.С. Сажин, В.Б. Сажин. – М. : Наука, 1997. – 448 с. 4. Фролов, В.Ф. Моделирование сушки дисперсных материалов / В.Ф. Фролов. – Л. : Химия, 1987. – 208 с. 5. Муштаев, В.И. Сушка дисперсных материалов / В.И. Муштаев, В.М. Ульянов. – М. : Химия, 1988. – 352 с. 6. Mujumdar, A.S. Handbook of Industrial Drying / A.S. Mujumdar. – 3rd Ed. – New York : Taylor & Francis, 2007. – 1280 p. 7. Strumillo, C. Drying: Principles, Applications and Design / C. Strumillo, T. Kudra. – New York : Gordon and Breach, 1986. – 448 p. 8. Keey, R.V. Drying of Loose and Particulate Materials / R.V. Keey. – New York : Hemisphere, 1992. – 504 p. 9. Ландау, Л.Д. Гидродинамика / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – 3-е изд. – М. : Физматлит, 1986. – 736 с. 10. Лыков, А.В. Тепло массообмен : справочник / А.В. Лыков. – 2-е изд. – М. : Энергия, 1978. – 480 с.

11. Адамсон, А. Физическая химия поверхностей / А. Адамсон. – М. : Мир, 1979. – 568 с. 12. Левич, В.Г. Физико-химическая гидродинамика / В.Г. Левич. – 2-е изд., доп. и пер. – М. : Физматиздат, 1959. – 700 с. 13. Сумм, Б.Д. Физико-химические основы смачивания и растекания / Б.Д. Сумм, Ю.В. Горюнов. – М. : Химия, 1976. – 232 с. 14. 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. 15. Макрокинетика процессов в пористых средах. Топливные элементы / Ю.А. Чизмаджев [и др.]. – М. : Наука, 1971. – 364 с. 16. Хейфец, Л.И. Многофазные процессы в пористых средах / Л.И. Хейфец, А.В. Неймарк. – М. : Химия, 1982. – 320 с. 17. Химическая гидродинамика / А.М. Кутепов [и др.]. – М. : Бюро Квантум, 1996. – 336 с. 18. Нелинейная динамика и термодинамика обратимых процессов в химии и химической технологии / Э.М. Кольцова [и др.]. – М. :

Химия, 2001. – 408 с. **20.** 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.

21. 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. **22.** Пахомова, Ю.В. Особенности механизма и кинетики сушки капель дисперсий (на примере сушки послеспиртовой барды) / Ю.В. Пахомова, В.И. Коновалов, А.Н. Пахомов // Вест. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2011. – Т. 17, № 1. – С. 70–82. **22а.** Пахомова, Ю.В. Оценка качества готового продукта при сушке жидких дисперсных веществ / Ю.В. Пахомова, В.И. Коновалов // Вопр. соврем. науки и практики. Ун-т им. В.И. Вернадского. – 2011. – № 2(33). – С. 407–412. **23.** Гегузин, Я.Е. Капля / Я.Е. Гегузин. – 2-е изд., доп. – М. : Наука, 1977. – 176 с. **24.** Волынский, М.С. Необыкновенная жизнь обыкновенной капли / М.С. Волынский. – М. : Знание, 1986. – 144 с. **25.** Чегодаев, Д.Д. Фторопласты / Д.Д. Чегодаев, З.К. Наумова, Ц.С. Дунаевская. – Л. : ГХИ, 1960. – 57 с. **26.** 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). **27.** Оборудование для охлаждения и усадки профилированных резиновых заготовок / В.И. Коновалов [и др.]. – М. : ЦИНТИхимнефтемаш, 1988. – 42 с. **28.** 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. **29.** 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. **30.** 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.

31. 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. **32.** 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. **33.** 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. **34.** Нигматулин, Р.И. Динамика многофазных сред. Часть 1 / Р.И. Нигматулин. – М. : Наука, 1987. – 464 с. **35.** Долинский, А.А. Оптимизация процессов распылительной сушки / А.А. Долинский, Г.К. Иваницкий. – Киев : Наукова думка, 1984. – 240 с. **36.** Долинский, А.А. Кинетика и технология сушки распылением / А.А. Долинский, К.Д. Малецкая, В.В. Шморгун. – Киев : Наукова думка, 1987. – 224 с. **37.** 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). **38.** Yang, W.-J. Natural Convection in Evaporating Droplets (University of Michigan) / W.-J. Yang // Handbook of Heat and Mass Transfer. Ed. N.P. Chermisinoff. – Houston, 1986. – Vol. 1. – P. 211–229. **39.** 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. **40.** Single Droplet Experimentation on Spray Drying: Evaporation of Sessile Droplets

Deposited on a Flat Surface / J. Perdana [and others] // 17th Intern. Drying Symposium (IDS-2010), Magdeburg, Germany, 3–6 October 2010. – Magdeburg, 2010. – Vol. C. – P. 1449–1457.

41. 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. **42.** Воробьева, Ю.В. Разработка экспериментальной установки для исследования процесса сушки во взвешенном состоянии на инертных телах / Ю.В. Воробьева // Тр. молод. ученых Тамб. гос. техн. ун-та. – 2007. – Вып. 20. – С. 21–25. **43.** Кинетика сушки дисперсий на бинарном инертном носителе / В.И. Коновалов [и др.] // Доклады V-го Минского междунар. форума по тепло- и массообмену. Минск, 24–28 мая 2004 г. / Ин-т тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова. – Минск, 2004. – Т. 2. – С. 214–216. **44.** Пат. 027174 Российская Федерация, МПК G 01 N 25/18. Инертный носитель для сушки продуктов в псевдооживленном слое («бинарный инерт») / Коновалов В.И., Гатапова Н.Ц., Шихунов А.Н., Утробин А.Н., Леонтьева А.И.; заявитель и патентообладатель Тамб. гос. техн. ун-та. – № 2003125506/04; заявл. 18.08.2003; опубл. 27.01.2005, Бюл. № 3. – 7 с. **45.** Романков, П.Г. Сушка во взвешенном состоянии / П.Г. Романков, Н.Б. Рашковская. – 3-е изд., перераб. и дополн. – Л.: Химия, 1979. – 272 с. **46.** Сушильные аппараты и установки: каталог, НИИХиммаш. – М.: ЦИНТИхимнефтемаш, 1992. – 80 с. **47.** Сушильные установки ОАО НИИ «Мир-Продмаш» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mir-prodmash.ru/>. – Загл. с экрана. **48.** Сушильные агрегаты АС3-5, СПб ГУ НПП [Электронный ресурс] / «Портал-Инжиниринг». – Режим доступа: http://www.equipnet.ru/equip/equip_8329.html. – Загл. с экрана. **49.** Сушильная установка «Торнадо» [Электронный ресурс] / «Consit – Ингредиент». – Режим доступа: http://oborud.contract.ru/index.shtml?pr1_3295_18. – Загл. с экрана. **50.** К расчету внешнего тепло-массообмена при сушке и нагреве волокнистых материалов / В.И. Коновалов [и др.] // Вест. Тамб. гос. техн. ун-та. – 1997. – Т. 3, № 1–2. – С. 47–60.

Geometry, Circulation and Heat and Mass Transfer in Evaporation of Drop on the Substrate

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

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

Key words and phrases: after alcohol stillage; circulation in a drop; drop evaporation; heat and mass transfer of a drop; profile drop.

Abstract: The paper presents the dependences for the calculation of the drop profile (layer) of liquid lying on solid horizontal substrate for the cases of wetting and non-wetting of the substrate surface. The formula for calculating the volume and area of the outer surface of the drop are obtained. The calculated and experimental profiles for drops of the liquid after alcohol stillage and water, lying on a fluoroplastic disk are given. The necessity of taking into account the exact profile of the drop to calculate the heat and mass transfer is shown. The results of investigations of internal circulation in drops are given; the concerns about the impact of the flows inside the drop on the drying process, the external heat and mass transfer and heat transfer to the substrate are expressed.

Geometrie, Zirkulation und Wärmemassenübertragung bei der Verdunstung des Tropfens am Träger

Zusammenfassung: Es werden die Abhängigkeiten für die Berechnung des Profils des Tropfens (der Schichte) der Flüssigkeit, das sich am harten horizontalen Träger für die Fälle der Befeuchtung und der Nichtbefeuchtung der Oberfläche des Trägers befindet, angeführt. Es sind die Formeln der Berechnung des Volumens und der Fläche der äußeren Oberfläche des Tropfens erhalten. Es sind die gerechneten und experimentellen Profile für die Tropfen des flüssigen Nachspiritustresters und des Wassers, die sich an der Fluoroplastscheibe befinden, angeführt. Es ist die Notwendigkeit der Berücksichtigung des feinen Profils des Tropfens für die Berechnung der Prozesse der Wärmemassenübertragung gezeigt. Es sind die Ergebnisse der Untersuchungen der inneren Zirkulation in den Tropfen angeführt und die Überlegungen über der Einwirkung auf das Prozess des Trocknens der Strömungen innen des Tropfens, der äußeren Wärmemassenübertragung und des Wärmeaustausches mit dem Träger ausgesprochen.

Géométrie, circulation et transfert de chaleur et de masse lors de la vaporisation d'une goutte sur une pastille

Résumé: Sont citées les dépendances pour le calcul du profil d'une goutte (d'une couche) du liquide qui se trouve sur une pastille solide horizontale pour les cas de l'humectation et de la non humectation de la surface de la pastille. Sont reçues les formules du calcul du volume et de la superficie extérieure de la goutte. Sont cités les profils calculés pour les gouttes de la drêche après alcool liquide et de l'eau qui se trouvent sur un disque de la couche de fluor. Est montrée la nécessité de la considération du profil exacte de la goutte pour le calcul des processus du transfert de chaleur et de masse. Sont mentionnés les résultats des études de la circulation interne dans les gouttes et sont présentées les réflexions sur l'influence des courants à l'intérieur de la goutte, du transfert de chaleur et de masse et de l'échange calorifique avec une pastille sur le processus du séchage.

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