

В.М. Собин, канд. техн. наук,
М.Д. Устинов, канд. физ. -
мат. наук, А.С. Семенов,
канд. техн. наук

ЗАДАЧА МАССООБМЕНА ПРИ ОБЕЗВОЗДУШИВАНИИ ВИСКОЗЫ В СТЕКАЮЩЕМ СЛОЕ

Обезвоздушивание вискозы — важная составная часть процесса получения вискозного волокна, которой определяются такие физико-механические свойства, как толщина и прочность нитей, а в конечном счете и качество продукции. Для получения качественного волокна из вискозы должен быть удален весь диспергированный воздух, а содержание растворенного должно быть меньше 3—4 мл на литр раствора [1].

При прочих равных условиях время, необходимое для удаления воздуха, определяется толщиной слоя вискозы. Для повышения производительности процесса необходимо уменьшение толщины слоя в сочетании с движущимся слоем, что позволяет процесс обезвоздушивания производить непрерывно.

Этим требованиям отвечает способ обезвоздушивания вискозы в конусных аппаратах со стекающим слоем под вакуумом. Однако в настоящее время методика его расчета для данного случая практически отсутствует.

Существующие методики расчета процесса обезвоздушивания [2] в основном построены на анализе закономерностей всплытия и диффузии одиночного пузырька. При таком подходе полностью исключаются динамика взаимодействия пузырьков и другие побочные явления, что далеко не соответствует действительным условиям. Для процесса обезвоздушивания вискозы в тонком слое под воздействием вакуума вскипание жидкости происходит по всему слою. И здесь взаимодействие пузырьков (ввиду их многочисленности) явно носит статистический характер. В этой связи процесс выделения воздуха из жидкости можно охарактеризовать эффективным коэффициентом диффузии и описать уравнением диффузии с соответствующими граничными условиями. Для решения этого уравнения необходимо найти толщину слоя и распределение скоростей в нем.

Рассмотрим ламинарное течение слоя вискозы по внутренней поверхности конуса (рис. 1).

Обозначим через u и v соответственно продольную и поперечную составляющие скорости в слое. Тогда для стабили-

зирования течения при стекании слоя по вертикальной стенке под действием силы тяжести легко получить,

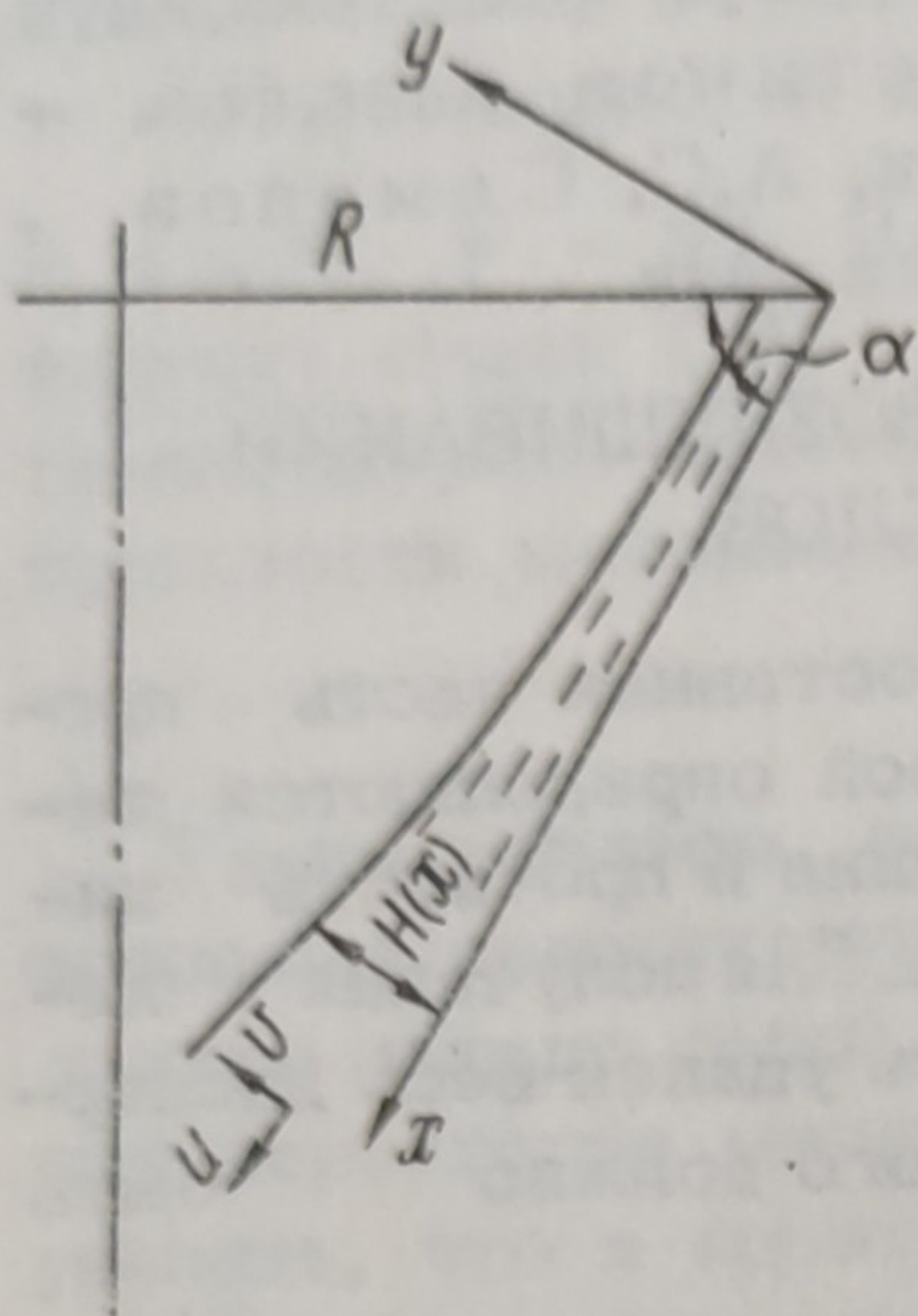


Рис. 1. Система координат и схема течения слоя вязкоз: x и y — соответственно продольная и поперечная координаты; R — радиус полураствора конуса; α — его угол; $H(x)$ — толщина слоя.

$$u = \frac{\gamma}{2\mu} (2Hy - y^2), \quad (1)$$

где γ и μ — удельный вес и динамическая вязкость. Толщина H находится из условия

$$Q = 2\pi R \gamma \int_0^H u(y) dy, \quad (2)$$

(Q — весовой расход).

Из уравнений (1) и (2) находим толщину слоя H при вертикальном течении:

$$H = \sqrt[3]{\frac{3\mu Q}{2\pi R \gamma^2}} \equiv H_0. \quad (3)$$

При наклонном течении вязкоз (см. рис. 1) считаем, что составляющая скорости u вдоль оси x является квадратичной функцией y и в соответствии с (1) имеет вид

$$u(x, y) = \frac{\gamma}{2\mu} [2H(x)y - y^2] a(x), \quad (4)$$

где $H(x)$ и $a(x)$ — неизвестные функции.

Уравнение расхода вязкоз в интегральной форме

$$Q = \frac{\gamma}{2\mu} \int_0^{H(x)} (2Hy - y^2) a(x) 2\pi(R - x \cos \alpha) dy$$

дает связь между функциями $H(x)$ и $a(x)$:

$$H^3(x) a(x) = \frac{3\mu Q}{2\pi\gamma^2(R-x\cos\alpha)} \quad (5)$$

Из уравнения неразрывности

$$\frac{\partial}{\partial x} [(R-x\cos\alpha)u] + \frac{\partial}{\partial y} [(R-x\cos\alpha)v] = 0 \quad (6)$$

с учетом граничного условия $v|_{y=0} = 0$ определяем составляющую скорости

$$v(x,y) = -\frac{\gamma}{2\mu} \cdot \frac{(Hy^2 - \frac{y^3}{3}) \left[(R-x\cos\alpha)a \right]' + Hy^2 \left[(R-x\cos\alpha)a \right]'}{R-x\cos\alpha} x \quad (7)$$

На свободной поверхности касательное напряжение отсутствует, т.е. $-\frac{\partial}{\partial n} (\sqrt{u^2 + v^2})|_{y=H} = 0$,

$$\text{или} \left[u \frac{\partial u}{\partial y} + v \frac{\partial v}{\partial y} - H' \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] |_{y=H} = 0. \quad (8)$$

На свободной поверхности

$$\frac{v}{u} |_{y=H} = H'(x)$$

Далее, из (4) следует, что

$$\frac{\partial u}{\partial y} |_{y=H} = 0.$$

Считая $v \frac{\partial v}{\partial x} H'$ малым по сравнению с остальными членами в (8), получим

$$\frac{\partial v}{\partial y} |_{y=H} = \frac{\partial u}{\partial x} |_{y=H} \quad (9)$$

Подставляя (4), (7) в (9), после несложных преобразований и интегрирования получим:

$$H^2(x) a(x) = \frac{C}{\sqrt{R-x\cos\alpha}}, \quad (10)$$

где C — постоянная интегрирования.

Равенства (5) и (10) позволяют определить функции $H(x)$ и $a(x)$. Используя (3), а также условие $H(x)/x=0 = H_0$, находим

$$H(x) = \frac{H_0}{\sqrt{1-x/R\cos\alpha}}, \quad a(x) = \sqrt{1-x/R\cos\alpha}. \quad (11)$$

(Первое из равенств (11) дает зависимость толщины слоя вискозы от координаты x).

Уравнение диффузии в данной системе координат в предположении, что $\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \ll \frac{\partial^2 c}{\partial y^2}$ и эффективный коэффициент диффузии $D = \text{const}$, имеет вид

$$u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} = D \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} - \frac{D}{R-x\cos\alpha - y\sin\alpha} x$$

$$x \left(\frac{\partial c}{\partial x} \cos\alpha + \frac{\partial c}{\partial y} \sin\alpha \right). \quad (12)$$

Концентрация воздуха $c(x,y)$ удовлетворяет следующим граничным условиям:

$$c|_{x=0} = c_0; \quad \frac{\partial c}{\partial y}|_{y=0} = 0; \quad D \frac{\partial c}{\partial y}|_{y=H} = -\frac{\beta}{m_c} (c-0), \quad (13)$$

где c_0 — концентрация воздуха на входе; β — коэффициент массоотдачи на границе раздела фаз; $m_c = 165$ — константа фазового равновесия.

Поскольку процесс обезвоздушивания осуществляется под вакуумом и абсолютное содержание воздуха в вискозе незначительно, то концентрацию воздуха в газовой фазе можно принять постоянной по длине и равной нулю. Это подтверждается и расчетами. На основании сказанного третье условие записывается уравнением (13).

Для коэффициента β примем зависимость, которая логична подобным задачам тепло- и массообмена, т.е.

$$\beta = k_1 \frac{D}{H(x)},$$

где k_1 — коэффициент, определяемый из опыта. С учетом последней зависимости третье условие в (13) запишется:

$$\frac{\partial c}{\partial y} /_{y=H} = -k_2 \frac{c}{H(x)}, \quad k_2 = \frac{k}{m \cdot c} \quad (14)$$

Решение уравнения (12) находим в виде

$$c = c_0 \left[\varphi_0(x) + \varphi_1(x) \frac{y}{H_0} + \varphi_2(x) \frac{y^2}{H^2} \right] \quad (15)$$

Второе условие из (13) дает:

$$\varphi_1(x) \equiv 0.$$

Из (12) на основании второго условия в (13) имеем:

$$\frac{2\varphi_2(x)}{H_0^2} - \frac{\cos \alpha}{R - x \cos \alpha} \frac{d\varphi_0(x)}{dx} = 0 \quad (16)$$

Из граничного условия (14) получим:

$$\varphi_2(x) = - \frac{k_2 \varphi_0(x)}{(2+k_2) \frac{H^2}{H_0^2}} \quad (17)$$

Подставляем (17) в (16):

$$\frac{d\varphi_0(x)}{dx} = - \frac{2k_2 R(1-x/R \cos \alpha)}{(2+k_2) \cos \alpha H^2} \varphi_0(x) \quad (18)$$

Интегрируя (18) и учитывая (17), из (15) имеем:

$$c(x,y) = A c_0 e^{B(1-x/R \cos \alpha)^3} \cdot \left[1 - \frac{k_2 y^2}{(2+k_2) H^2(x)} \right] \quad (19)$$

где A — постоянная интегрирования, а

$$B = \frac{2k_2 R^2}{3 \cos^2 \alpha \cdot (2+k_2) H_0^2} \quad (20)$$

Введем среднюю концентрацию по сечению слоя:

$$c(x) = \frac{\int_0^H u(x,y) c(x,y) 2\pi(R-x \cos \alpha) dy}{Q \cdot c_0} \quad (21)$$

Подставляя (4), (19) и Q из (3) в (21), после вычисления интеграла получаем:

$$c(x) = \frac{40 + 11k_2}{20(2 + k_2)} A e^{B(1 - x/R \cos \alpha)^3} \quad (22)$$

При $x = 0$ $c = 1$, т.е.

$$A = \frac{20(2 + k_2)}{40 + 11k_2} e^{-B} \quad (23)$$

С учетом (23) и (22) окончательно имеем

$$c(x) = e^{-B(1 - \xi)^3}, \quad (24)$$

где $\xi = 1 - x/R \cos \alpha$, а B определяется по (20).

По (24) проведена серия расчетов при различных $k_1 < 1$

для следующих исходных данных: $R = 0,865$ мм; $x = 3430$ мм; $\alpha = 79^\circ 50'$; расход вискозы $Q = 15$ м³/ч; динамическая вязкость вискозы $\mu = 40$ пз; остаточное давление $P = 15$ мм р.ст.; концентрация воздуха в вискозе на входе $c_0 = 20$, на выходе $c_k = 3$ мм/л; удельный вес $\gamma = 1,13$ г/см³.

Установлено, что сходимость теории с действительной концентрацией воздуха на выходе обеспечивается при $k_1 = 0,5 \cdot 10^{-2}$. Малая величина k_1 свидетельствует о том, что в слое вискозы возникает большое дополнительное сопротивление массообмену, вызванное одновременным испарением воды, десорбцией сероуглерода и сероводорода, а также расширением слоя от вскипания. В дальнейшем предполагается учесть расширение слоя от вскипания.

В ы в о д ы

Получена зависимость для толщины слоя вискозы, стекающей по конической поверхности.

Найдена приближенная зависимость для концентраций воздуха в вискозе.

Л и т е р а т у р а

1. Михлин И.А., Пакшвер А.В. Непрерывное обезвоздушивание вязких растворов. - "Изв.вузов. Технология легкой промышленности", 1963, №5, с. 51. 2. Матвеев В.С. и др. Дегазация и контроль газосодержания вязких жидкостей, М., ч.1, 1971; ч. 2 и 3, 1972.