

### 13. Расчет сепараторов-сливкоотделителей

Для выделения из молока молочного жира используют явление естественного отстоя, когда в спокойно стоящем сосуде с молоком жировые шарики всплывают к поверхности сосуда, образуя слой сливок.

$$\text{Скорость всплытия: } v = g\tau \quad (6.1)$$

где  $g$  — ускорение свободного падения,  $\text{м/с}^2$ ;  $\tau$  — фактор разделения, с.

Значение  $\tau$  определяется по формуле:

$$\tau = \frac{2(\rho_{\text{п}} - \rho_{\text{ж}})r^2}{9\eta_{\text{п}}}, \quad (6.2)$$

где  $\rho_{\text{п}}, \rho_{\text{ж}}$  — плотности плазмы и жира,  $\text{кг/м}^3$ ;  $r$  — радиус жирового шарика, м;  $\eta_{\text{п}}$  — вязкость, Па·с.

Медленный процесс отстоя резко убыстряется в молочных сепараторах. Определим производительность сепаратора-сливкоотделителя по Г. И. Бремеру. Схема движения молока в межтарелочном пространстве показана на рисунке 6.6, а.

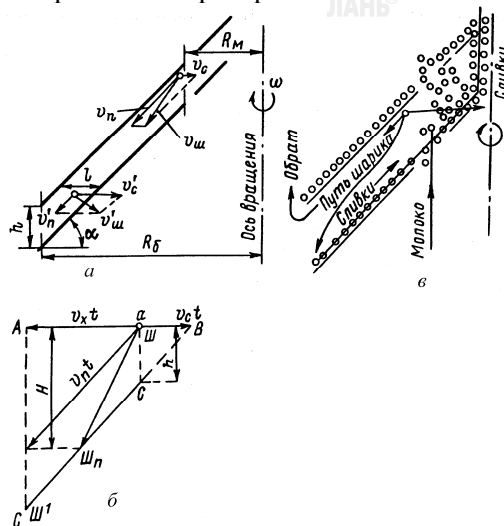


Рис. 6.6

*Движение молока в межтарелочном пространстве барабана сепаратора:*

*а — выделение жирового шарика; б — токи обраты и сливок; в — план скоростей.*

Разделяемый поток молока, состоящий из частиц плазмы плотностью  $\rho_{\text{п}}$  и жировых шариков плотностью  $\rho_{\text{ж}}$ , направляется во вращающийся барабан сепаратора, где возникает поле действия центробежных сил и происходит отстойное центрифугирование. При этом на каждую взвешенную частицу действует центробежная

сила  $F_{ц}$ , отбрасывающая частицу от центра к периферии со скоростью  $v_c$ , равной скорости осаждения (отстоя).

Для оценки эффективности отстоя в центробежных устройствах сравним центробежную силу  $F_{ц}$  с силой тяжести  $P$ , действующих в поле гравитации при естественном отстое по соотношению  $F_{ц}/P = m\omega^2 R/mg = \omega^2 R/g$ . Откуда

$$F_{ц} = P\omega^2 R/g = \tau P, \quad (6.3)$$

где  $\tau = \omega^2 R/g$  — фактор разделения, показывающий во сколько раз действие центробежной силы превосходит силу тяжести. Чем больше фактор разделения, тем выше разделяющая способность сепаратора;  $R$  — радиус барабана, м.

Выразим угловую скорость  $\omega$ ,  $c^{-1}$ , через частоту вращения,  $n$ ,  $c^{-1}$ , барабана сепаратора, и примем  $\pi^2 \approx g$ . Тогда выражение для фактора разделения

$$\tau = 4n^2 R. \quad (6.4)$$

Из полученного выражения видно, что *эффективность сепарирования выгоднее увеличивать за счет частоты вращения*, а не радиуса барабана, так как частота вращения в квадрате.

По вертикальным каналам пакета тарелок в межтарелочное пространство поступает молоко с находящимися в нем жировыми шариками (рис. 6.6, б). Здесь жировые шарики участвуют в сложном движении. Одна составляющая движения определяется скоростью  $v_n$  потока молока и направлена по образующей тарелки, другая — центробежной силой в относительном движении со скоростью  $v_c$  и направлена перпендикулярно оси вращения (скорость «всплывания» шариков). Скорость  $v_n$  потока молока в межтарелочном пространстве (рис. 6.6, а):

$$v_n = \frac{V_t}{2\pi Rlz}, \quad (6.5)$$

где  $V_t$  — объемный расход сепаратора,  $m^3/c$ ;  $l$  — расстояние между соседними тарелками по горизонтали, м;  $z$  — число межтарелочных пространств в барабане.

При ламинарном режиме движения скорость  $v_c$  осаждения определится по формуле Стокса с учетом фактора разделения:

$$v_c = \frac{d^2 g (\rho_n - \rho_{ж}) \omega^2 R}{18\eta_n g} = \frac{d^2 \omega^2 R (\rho_n - \rho_{ж})}{18\eta_n}, \quad (6.6)$$

где  $d$  — диаметр жирового шарика, м.

В процессе центробежного осаждения значения  $\tau$  и  $v_c$  изменяются, как зависящие от  $R$  расстояния от оси вращения барабана до рассматриваемой частицы. Радиус вращения изменяется от  $R_m$  до  $R_b$  (рис. 6.6, а).

Исследованиями установлено, что в диапазоне температур от 238 до 343 К физические свойства плазмы и молочного жира связаны зависимостью  $(\rho_n - \rho_{ж})/\eta_n = 2900(T - 273)$ , где  $T$  — температура молока, К.

Тогда скорость всплывания шариков определится

$$v_c = 161d^2 \omega^2 R(T - 273). \quad (6.7)$$

Абсолютная скорость движения жирового шарика  $\bar{v}_{ш}$  равна геометрической сумме переносной и относительной скоростей:  $\bar{v}_{ш} = \bar{v}_n + \bar{v}_c$ .

Как следует из анализа формул для определения скоростей  $\bar{v}_n, \bar{v}_c$  при продвижении жирового шарика в межтарелочном пространстве барабана относительная скорость будет возрастать, так как возрастает  $R$ , а переносная — уменьшаться, так как с увеличением  $R$  увеличивается сечение потока молока. Эти изменения приводят к изменению величины и направления результирующей скорости движения шариков  $\bar{v}_m$ . В результате этого жировые шарики оседают на верхних поверхностях тарелок и непрерывно продвигаются к оси вращения барабана.

Потоки сливок и обрата схематично показаны на рисунке 6.6, б. При их анализе видно, что чем мельче жировой шарик, тем ближе к внешнему краю тарелки он опустится. Часть мелких жировых шариков, не достигших поверхности тарелки, выносятся с потоком обрата. Жировые шарики, опустившиеся на верхнюю поверхность нижней тарелки, движутся к центру вращения, в направлении к общему потоку обрата. Сепараторы имеют устройство, позволяющее настраивать их на такой режим работы, при котором потери жировых шариков будут сведены к минимуму. Эта регулировка называется настройкой сепаратора на «остроту разделения».

Предельное положение жирового шарика, который при данном режиме работы сепаратора достигнет сливочного потока на краю нижележащей тарелки, показано на рисунке 6.6, в. Пусть средняя переносная скорость будет  $\bar{v}_n$ , относительная  $\bar{v}_c$ , время движения в межтарелочном пространстве  $t$ . В выбранном масштабе нанесем на чертеж пути движения шарика в переносном и относительном движениях за время  $t$ . Длина пути, проходимая потоком, равна рабочей длине образующей усеченного конуса тарелки. Высоту тарелки обозначим через  $H$ , а расстояние между тарелками по высоте обозначим через  $h$ . Проекция пути шарика при переносном движении на горизонтальную ось обозначим через  $v_x t$ . Так как  $\Delta ABC \approx \Delta abc$  и  $v_c = v_n \cos \alpha$ , то мы можем записать соотношения:  $v_x/v_c = v_n \cos \alpha/v_c = H/h$ .

С учетом значений  $\bar{v}_n, \bar{v}_c$  в формулах (6.6) и (6.7) получим:

$$\frac{v_x}{v_c} = \frac{9V_t \cos \alpha \eta_n}{\pi R l z d^2 \omega^2 R (\rho_n - \rho_{ж})}. \quad (6.8)$$

По рекомендациям В. Н. Стабникова и В. И. Баранцева для определения подачи сепаратора рассмотрим элементарный кольцевой объем  $dV$  сепарирующей части барабана, ограниченной толщиной кольца  $dR$ . При этом  $dV = 2\pi h z R dR$ , где  $h$  — расстояние между тарелками по вертикали, м.

Продолжительность пребывания молока в объеме  $V$  составит  $dt = dV/V = 2\pi h z R dR/V$ .

За это время находящийся в молоке жировой шарик, двигаясь со скоростью осаждения  $v_c$ , переместится в направлении к оси вращения на расстояние

$$dl = v_c dt = \frac{2\pi h z d^2 \omega^2 (\rho_n - \rho_{ж}) R^2 dR}{18V \eta_n}. \quad (6.9)$$

За время прохождения полного рабочего объема барабана, ограниченного радиусами  $R_m$  и  $R_b$  (рис. 6.6, а), жировой шарик должен успеть переместиться в потоке на расстояние  $l$ .

Проинтегрируем последнее выражение в пределах от 0 до  $l$  и от  $R_m$  и  $R_b$ , получим:

$$l = \frac{2\pi h z d^2 \omega^2 (\rho_{\text{п}} - \rho_{\text{ж}}) (R_{\text{б}}^3 - R_{\text{м}}^3)}{18V\eta_{\text{п}}} \cdot \frac{1}{3}. \quad (6.10)$$

После подстановки в это выражение значения  $l = h/\text{tg}\alpha$  и упрощения получим формулу для расчета производительности  $V_t$  (м/с) сепаратора

$$V_t = \frac{d^2 \omega^2 z \text{tg}\alpha (R_{\text{б}}^3 - R_{\text{м}}^3) (\rho_{\text{п}} - \rho_{\text{ж}}) \eta_{\text{с}}}{8,6\eta_{\text{п}}}, \quad (6.11)$$

где  $\eta_{\text{с}}$  — КПД сепаратора ( $\eta_{\text{с}} = 0,5-0,7$ ).

Эта формула дает хорошее совпадение теоретической производительности очистителя с паспортной лишь при расчетном диаметре частиц от 2 до 2,5 мк.

В барабанах некоторых сепараторов-очистителей расстояние между тарелками 1–2 мм, в других же 8–10 мм.

При расстоянии между тарелками,  $\delta = 1-2$  мм:

$$V_t = \frac{z \cdot V_{\text{расч}} \cdot \omega^2}{35 \cdot 10^6}, \quad (6.12)$$

где  $V_{\text{расч}}$  — расчетный объем барабана, м<sup>3</sup>.

При расстоянии между тарелками  $\delta = 8-10$  мм:

$$V_t = \frac{z \cdot V_{\text{расч}} \cdot \omega^2}{11 \cdot 10^6}. \quad (6.13)$$

Теоретическая производительность молокоочистителя при условии несмыывания выделенной грязевой частицы в очищенный продукт:

$$V_t = \frac{0,116d_{\text{ч}} \omega^2 R_{\text{б}}^2 \delta^2 z (\rho_{\text{п}} - \rho_{\text{ж}}) d \cos \alpha}{\eta_{\text{п}}}, \quad (6.14)$$

где  $\delta$  — расстояние между тарелками, м.

Оптимальное расстояние между тарелками очистителя:

$$\delta_{\text{опт}} = \frac{1,71}{R_{\text{м}}} \sqrt[4]{\frac{V_t \eta_{\text{п}} (R_{\text{б}}^3 - R_{\text{м}}^3) \text{tg}\alpha}{\omega^2 z (\rho_{\text{п}} - \rho_{\text{ж}}) \cos^2 \alpha}}, \quad (6.15)$$

где  $V_t$  — секундный расход сепарируемой жидкости через барабан, м<sup>3</sup>/с.

Движение молока в межтарелочном пространстве определяется зависимостью

$$Q'_{\text{сеп}} = \frac{V_t}{z} < \frac{442}{\delta} + 64, \quad (6.16)$$

где  $Q'_{\text{сеп}}$  — действительная средняя нагрузка на межтарелочный канал, см<sup>3</sup>/с.

Поток молока, поступающий с периферии барабана в межтарелочное пространство, увлекает в него лишь такие частицы загрязнений, стоксова скорость которых на границе тарелки оказывается менее скорости потока при входе в пакет тарелок.

Критический размер увлекаемых в пакет дисперсных частиц

$$d_{\text{кр}} = \frac{1,691}{\omega R_{\text{max}}} \sqrt{\frac{V_t \eta_{\text{п}} \cos \alpha}{\delta z (\rho_{\text{п}} - \rho_{\text{ж}})}}, \quad (6.17)$$

где  $R_{\text{max}}$  — наружный радиус тарелки, м.

Частицы крупнее  $d_{кр}$  оседают на стенки барабана, не проникая в межтарелочные пространства.

Минимальный размер частиц, выделяемых очистителем в межтарелочном пространстве

$$d_{\min} = \frac{2,93}{\omega} \sqrt{\frac{V_t \eta_{\Pi}}{\beta z (R_6^3 - R_M^3) (\rho_{\Pi} - \rho_{ж}) \operatorname{tg} \alpha}}, \quad (6.18)$$

где  $R_6$  и  $R_M$  — радиусы тарелки, м;  $\alpha$  — угол наклона образующей тарелки к горизонту, °;  $\omega_6$  — угловая скорость барабана,  $\text{с}^{-1}$ .

Минимальный размер выделившихся частиц, несмываемых потоком с грязевого слоя в межтарелочном пространстве

$$d'_{\min} = \frac{17,2 \cdot V_t \eta_{\Pi}}{z \omega^2 R_6^2 \delta^2 (\rho_{\Pi} - \rho_{ж}) \cos \alpha}. \quad (6.19)$$

Время, необходимое для радиального перемещения расчетной частицы от  $R_6$  до  $R_M$ :

$$\tau_{\text{рад.ч}} = \frac{41,5 \eta_{\Pi}}{d^2 \omega^2 \delta^2 (\rho_{\Pi} - \rho_{ж})} \operatorname{lg} \frac{R_6}{R_M}. \quad (6.20)$$

Время пребывания молока в барабане

$$\tau_6 = \frac{V_6}{V_t}, \quad (6.21)$$

где  $V_6$  — объем барабана,  $\text{м}^3$ ;  $H$  — рабочая высота кольца жидкости в барабане, м.

Критический размер выделяемой грязевой частицы из условия  $\tau_6 = \tau_{\text{расч}}$ :

$$d_{\text{гр}} = \frac{3,65}{\omega} \sqrt{\frac{V_t \eta_{\Pi} \operatorname{lg} \frac{R_6}{R_M}}{(R_6^2 - R_M^2) h (\rho_{\Pi} - \rho_{ж})}}. \quad (6.22)$$

Длительность непрерывной работы сепаратора-очистителя должна обеспечить обработку молока в течение одного времени доения  $t_d$  без разборки сепаратора:

$$t_d = V_{\text{гр}} \cdot 100/P, \quad (6.23)$$

где  $V_{\text{гр}}$  — объем грязевого пространства барабана,  $\text{м}^3$ ;  $P$  — процент отложения сепараторной слизи от общего объема очищенного молока,  $P = 0,03-0,06\%$ .

Расстояние между тарелками не должно приближаться к критическому, при котором возможна турбулизация потока. Объем грязевого пространства молокоочистителей принимают из расчета 1 л на 1000 л часовой производительности. Молокоочиститель может работать непрерывно 3–4 ч. В этом случае отложения в грязевом пространстве достигают 0,03% от объема пропущенного молока. Угол наклона образующей тарелок к горизонтали принимают равным 60–50°.

Энергия, затрачиваемая при работе сепаратора, используется на сообщение кинетической энергии выбрасываемой жидкости  $N_1$ , преодоление трения барабана о воздух  $N_2$ , в подшипниках  $N_3$ , в редукторе  $N_4$ .

Мощность, необходимую для сообщения кинетической энергии выбрасываемой жидкости, определяют по формуле (для открытых сепараторов):

$$N_1 = \varphi_c Q_c r^2 \omega_6^2, \quad (6.24)$$

где  $Q_c$  — производительность сепаратора, кг/с;  $\omega_6$  — угловое ускорение барабана,  $c^{-1}$ ;  $r$  — расстояние от оси вращения до выходного отверстия, м;  $\varphi_c$  — коэффициент, учитывающий радиальную скорость струи ( $\varphi_c = 1, 1-1, 2$ ).

При расчёте мощности, необходимой для работы герметических и полугерметических сепараторов, вместо мощности на выбрасывание продуктов сепарирования из барабана учитывают потребную мощность для напорных дисков.

Мощность, потребную для преодоления трения барабана о воздух, рассчитывают по формуле

$$N_2 = \gamma_v F_{\text{бар}} v_{\text{бар}}^3, \quad (6.25)$$

где  $\gamma_v$  — удельный вес воздуха,  $кг/м^3$ ;  $F_{\text{бар}}$  — площадь боковой поверхности барабана,  $м^2$ ;  $v_{\text{бар}}$  — окружная скорость барабана,  $м/с$ .

Мощность, используемую на преодоление трения в опорных подшипниках вала барабана, вычисляют по формуле

$$N_3 = \frac{C_{\text{тр}} G_i v_{\text{бар}}^3}{d_i}, \quad (6.26)$$

где  $G_i$  — нагрузка на подшипники,  $кг$ ;  $d_i$  — диаметр цапфы,  $м$ ;  $C_{\text{тр}}$  — коэффициент ( $C_{\text{тр}} = 0,002$ ).

Мощность на преодоление трения в редукторе определяют исходя из к. п. д. приводного механизма  $\eta$ .

При червячной передаче

$$\eta = \frac{\text{tg}(\alpha_n + \varphi)}{\text{tg} \alpha} (1 - 0,26f) \eta_0, \quad (6.27)$$

где  $\alpha_n$  — угол подъёма винтовой линии,  $^\circ$ ;  $\varphi$  — угол трения (для стального вала и бронзового колеса  $\varphi = 4^\circ$ );  $f$  — коэффициент трения ( $f = 0,07$ );  $\eta_0$  — коэффициент, учитывающий потери на трение в опорах (при шарикоподшипниках  $\eta_0 = 0,97$ ).

Общая потребляемая мощность

$$N_{\text{общ}} = \frac{N_1 + N_2 + N_3}{\eta}. \quad (6.28)$$

Мощность  $N_{\text{разг}}$ , необходимую для разгона барабана сепаратора до номинальной частоты вращения, определим

$$N_{\text{разг}} = \frac{J \cdot \omega^2}{1000 \cdot t}, \quad (6.29)$$

где  $\omega$  — номинальная угловая скорость барабана,  $c^{-1}$ ;  $t$  — время разгона барабана,  $с$  ( $t = 60-180$  с).

Мощность  $N_v$  на преодоление трения барабана о воздух

$$N_v = \frac{C \cdot \rho \cdot v^3 \cdot F}{8000}, \quad (6.30)$$

где  $C = 0,3$  — постоянный коэффициент;  $\rho = 1,2$   $кг/м^3$  — плотность воздуха при  $T = 293$  К;  $v$  — окружная скорость барабана,  $м/с$ ;  $F$  — площадь боковой поверхности барабана,  $м^2$ .

Пусковая мощность сепаратора

$$N_{\text{п}} = \frac{(N_{\text{разг}} + N_{\text{в}})}{\eta}, \quad (6.31)$$

где  $\eta = 0,8-0,85$  — к. п. д. сепаратора.

В период разгона сепаратора мощность необходима и для преодоления трения в пусковом механизме (фрикционных муфтах с колодками или с раздвигающимися кулачками, либо при сдвигании ремня с холостого шкива на рабочий).

В среднем в период разгона сепаратора пусковым приспособлением поглощается около 40% потребной мощности.

Мощность, потребная сепаратором в период рабочего хода, распределяется примерно следующим образом:

- на трение в пусковом механизме — 25%;
- на трение барабана о воздух — 50%;
- на сообщение кинетической энергии выбрасываемой жидкости и преодоление гидравлических сопротивлений — 25%.

Число оборотов современных сепараторов обычно ниже верхнего критического числа. Фактическое число оборотов барабана в пределах от 6000 до 12 000 мин<sup>-1</sup>. При наличии дебалансирующих масс (загрязнений), неправильной или некомплектной сборки, обязательно возникают значительные биения барабана, что может привести к аварии сепараторов.

**Практическое занятие.** Барабан молокоочистителя вращается со скоростью  $n = 7200$  мин<sup>-1</sup> ( $\omega_6 = 754$  с<sup>-1</sup>). Число тарелок пакета  $z = 28$ ; расчетные радиусы тарелок:  $R_6 = 95$  мм и  $R_m = 39$  мм, угол наклона образующей конуса тарелки  $\alpha = 55^\circ$  ( $\text{tg}\alpha = 1,43$ ;  $\text{cos}\alpha = 0,574$ ), расстояние между тарелками  $\delta = 2$  мм. Производительность очистителя  $Q_d = 4000$  л/ч, температура молока  $t = 40^\circ\text{C}$ .

Определить теоретический минимальный размер грязевой частицы, выделяемой в межтарелочном пространстве, и соотношение между разделяющим фактором молокоочистителя и сопротивляемостью молока выделению грязевой частицы наименьшего размера.

*Решение.* Секундная объемная производительность очистителя

$$Q_d = \frac{4000}{1000 \cdot 3600} = 0,00111 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Теоретический минимальный размер выделяемых очистителем грязевых частиц

$$\begin{aligned} d_{\text{min}} &= \frac{2,93}{\omega} \sqrt{\frac{V_t \eta_{\text{п}}}{z(R_6^3 - R_m^3)(\rho_{\text{п}} - \rho_{\text{ж}}) \text{tg}\alpha}} = \\ &= \frac{2,93}{754} \sqrt{\frac{0,00111}{28 \cdot (0,095^3 - 0,039^3) \cdot 29\,200 \cdot 1,43}} = 1,33 \text{ мк}, \end{aligned}$$

где  $V_t$  — секундный расход сепарируемой жидкости через барабан, м<sup>3</sup>/с;  $\rho_{\text{п}}$ ,  $\rho_{\text{ж}}$  — плотности грязевой частицы и молока, кг/м<sup>3</sup>;  $\eta_{\text{п}}$  — динамическая вязкость молока, Н·с/м<sup>2</sup>.

Значения дисперсионной среды, дисперсной фазы и коэффициента динамической вязкости молока в зависимости от температуры при температуре молока 40°C:

$$\frac{(\rho_{\text{п}} - \rho_{\text{ж}})}{\eta_{\text{п}}} = 292\,000 \text{ м/с}^2.$$

Минимальный размер частиц, несмываемых потоком очищенного молока с грязевого слоя в межтарелочном пространстве, определим по формуле

$$d_{\text{мин}} = \frac{8,58V_t\eta_{\text{п}}}{z\omega^2 R_{\text{макс}}^2 \delta^2 (\rho_{\text{п}} - \rho_{\text{ж}}) \cos \alpha} = \frac{8,58 \cdot 0,00111}{28 \cdot 754^2 \cdot 0,039^2 \cdot 0,002^2 \cdot 292\,000 \cdot 0,754} = 0,6 \text{ мк},$$

где  $z$  — количество тарелок, шт.;  $\delta$  — расстояние между тарелками, мм.

Следовательно, выделяемая очистителем наименьшая грязевая частица  $d_{\text{мин}} = 1,33 \text{ мк}$  больше частицы  $d_2 = 0,6 \text{ мк}$ , смываемой потоком. Это означает, что все частицы размером от 0,6 до 1,3 мк, оказавшиеся ближе к поверхности верхней тарелки и достигшие поверхности, не будут смываться и могут переместиться в грязевое пространство барабана.

Сопротивляемость молока выделению частиц

$$F_{\text{м}} = \frac{1}{\tau} = 18 \frac{\eta_{\text{п}}}{(\rho_{\text{п}} - \rho_{\text{ж}}) \cdot d^2} = \frac{18}{292\,000 (1,33 \cdot 10^{-6})^2} = 35,8 \cdot 10^6.$$

Разделяющий фактор очистителя

$$F = \frac{2\pi}{3} \cdot \frac{\omega_c^2}{V_t} z (R_6^3 - R_{\text{м}}^3) \cdot \text{tg} \alpha = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 754^2 \cdot 28 \cdot (0,095^3 - 0,039^3) \cdot 1,43}{3 \cdot 0,00111} = 62,5 \cdot 10^6.$$

Разделяющий фактор сепаратора

$$\frac{F}{F_{\text{м}}} = \frac{62,5 \cdot 10^6}{35,8 \cdot 10^6} = 1,75 \text{ раза.}$$

Сопоставление факторов разделения молокоочистителя показывает, что разделяющий фактор ( $F = 62,5 \cdot 10^6$ ) больше сопротивляемости молока выделению частиц в 1,75 раза, а следовательно молокоочиститель с заданными параметрами работоспособен.

**Практическое занятие.** Определить минимальные размеры жировых частиц, выделяемых сепаратором, и проверить соответствие межтарелочного расстояния теоретически оптимальному, если барабан делает  $n = 6500 \text{ мин}^{-1}$ , максимальный расчетный радиус тарелки  $R_{\text{макс}} = 138 \text{ мм}$ , а минимальный  $R_{\text{мин}} = 49 \text{ мм}$ , угол наклона образующей тарелки  $\alpha = 55^\circ$ , величина межтарелочного зазора  $\delta = 0,4 \text{ мм}$ , число тарелок  $z_{\text{т}} = 88$ , производительность сепаратора  $Q_{\text{д}} = 3000 \text{ л/ч}$ , технологический к. п. д.  $\beta = 0,461$ , температура молока  $t = 37^\circ\text{C}$ .

*Решение.* Угловая скорость барабана

$$\omega_c = 0,1046 \cdot 6500 = 680 \text{ с}^{-1}.$$

Секундная производительность:

$$V_t = \frac{3000}{1000 \cdot 3600} = 0,000834 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Предельно-минимальный размер выделяемых жировых частиц:

$$d_{\min} = \frac{2,93}{\omega} \sqrt{\frac{V_t \eta_{\Pi}}{\beta z (R_6^3 - R_m^3) (\rho_{\Pi} - \rho_{ж}) \operatorname{tg} \alpha}} =$$

$$= \frac{2,93}{680} \sqrt{\frac{0,000834}{0,461 \cdot 88 \cdot 1,43 (0,137^3 - 0,049^3) 2900 \cdot 37}} = 1 \text{ мк.}$$

Минимальный размер несмываемого в обрат жирового шарика:

$$d'_{\min} = \frac{17,2 \cdot V_t \eta_{\Pi}}{z \omega^2 R_{\max}^2 \delta^2 (\rho_{\Pi} - \rho_{ж}) \cos \alpha} =$$

$$= \frac{17,2 \cdot 0,000834}{680^2 \cdot 0,138^2 \cdot 0,0004^2 \cdot 88 \cdot 2900 \cdot 37 \cdot 0,573} = 1,88 \text{ мк.}$$

Как видно,  $d_{\min} < d'_{\min}$  почти в два раза. Из этого следует, что часть жировых частиц (диаметром  $d < 1,88$  мк), успевших пересечь межтарелочное пространство и достичь слоя сливок, смывается с поверхности этого слоя в грязевую камеру барабана. Чтобы этого избежать (теоретически), необходимо изменить межтарелочный зазор до оптимальной величины.

Оптимальное расстояние между тарелками:

$$h = \frac{2,43}{R_6} \sqrt{\frac{V_t \eta_{\Pi} \beta (R_6^3 - R_m^3) \operatorname{tg} \alpha}{\omega_c^2 \cdot z (\rho_{\Pi} - \rho_{ж}) \sin \alpha}} =$$

$$= \frac{2,43}{R_6} \sqrt{\frac{0,000834 \cdot 0,461 \cdot (0,138^3 - 0,0149^3) t \cdot 1,43}{680^2 \cdot 88 \cdot 2900 \cdot 37 \cdot 0,573^2}} = 2,55 \text{ мк.}$$

Полученное значение расстояния между тарелками встречается в барабанах молокоочистителей. В барабанах сепараторов-сливкоотделителей межтарелочные зазоры не превосходят 0,6–0,8 мм.

**Практическое занятие.** Определить время пребывания молока в межтарелочном пространстве барабана и на какую оптимальную жирность сливок он рассчитан, если производительность сепаратора  $Q_d = 5000$  л/ч, число тарелок  $z_T = 124$ , расчетные радиусы тарелок  $R_{\max} = 138$  мм и  $R_{\min} = 35$  мм, расстояние осей отверстий в тарелке до оси барабана  $R_0 = 65$  мм, угол наклона образующей  $\alpha = 55^\circ$ , расстояние между тарелками  $\delta = 0,52$  мм.

*Решение.* Секундная производительность сепаратора

$$V_t = \frac{5000}{1000 \cdot 3600} = 0,00139 \text{ м}^3/\text{с.}$$

Максимальное время пребывания молока между тарелками при движении от  $R_{\min}$  до  $R_{\max}$ :

$$\tau = \frac{\pi z \delta (R_{\max}^3 - R_{\min}^3)}{V_t \cdot \sin \alpha} = \frac{3,14 \cdot 124 \cdot 0,00052 \cdot (0,138^2 - 0,035^2)}{0,0139 \cdot 0,574} = 4,65 \text{ с.}$$

Время перемещения молока между тарелками от отверстий  $R_0$  до наружного края  $R_{\max}$ :

$$\tau' = \frac{3,14 \cdot 124 \cdot 0,00052 \cdot (0,138^2 - 0,065^2)}{0,0139 \cdot 0,574} = 3,87 \text{ с,}$$

т. е. 83% от максимально возможного.

За время  $\tau' = 3,87 \text{ с}$  жировая частица должна пройти в радиальном направлении путь:

$$\Delta R = \frac{\delta}{\sin \alpha} = 0,634 \text{ мм,}$$

перемещаясь со средней радиальной скоростью

$$v = \frac{\Delta R}{\tau'} = 0,000164 \text{ м/с.}$$

Среднегеометрическое радиальное расстояние от  $R_{\min}$  до  $R_{\max}$  при полученной скорости:

$$R_{\text{ср}} = \frac{R_{\max} - R_{\min}}{2,31 \lg \frac{R_{\max}}{R_{\min}}} = \frac{0,138 - 0,065}{2,31 \lg \frac{0,138}{0,065}} = 0,097 \text{ м.}$$

Минимальный диаметр жировых шариков

$$d_{\text{мин}} = \frac{2,93}{680} \sqrt{\frac{18 \cdot 0,000164}{628^2 \cdot 0,097 \cdot 2900 \cdot 35}} = 0,875 \text{ мк.}$$

Как видно, теоретически барабан может выделять до 0,9 мк, создавая высокую остроту сепарирования.

**Практическое занятие.** Определить ориентировочную производительность сепаратора высокожирных сливок по следующим данным: скорость барабана  $n = 7200 \text{ мин}^{-1}$ , максимальный расчетный радиус тарелки  $R_{\max} = 108 \text{ мм}$ , минимальный радиус  $R_{\min} = 55 \text{ мм}$ , угол наклона образующей конуса  $\alpha = 55^\circ$ , число тарелок  $z = 80$ , минимальный диаметр выделяемой частицы жира  $d = 1,0 \text{ мк}$ , температура сепарируемых сливок  $t = 82^\circ\text{C}$ , жирность сливок  $C_{\text{нач}} = 35\%$ , жирность получаемых сливок  $C_{\text{кон}} = 83\%$ . Технологический к. п. д. сепаратора  $\beta = 0,65$ .

**Решение.** Определяем производительность сепаратора при выделении сливок из молока температурой в  $35^\circ\text{C}$  при угловой скорости барабана  $753 \text{ с}^{-1}$ :

$$V_t = 121 \cdot 10^4 \cdot \beta \cdot \omega^2 \cdot z \cdot \text{tg} \alpha (R_{\max}^3 - R_{\min}^3) \cdot t \cdot d = \\ = 121 \cdot 10^4 \cdot 0,65 \cdot 753^2 \cdot 80 \cdot 1,43 \cdot (0,108^3 - 0,055^3) \cdot 35 \cdot 11 \cdot 10^{-12} = 1,94 \text{ м}^3/\text{с,}$$

где  $t$  — температура молока,  $^\circ\text{C}$ .

Производительность сепаратора при выделении высокожирных сливок по исходному сырью (сливки жирностью 35%):

$$V_c = \frac{0,2 V_t}{\lg \frac{C_{\max} - C_{\text{нач}}}{C_{\max} - C_{\text{кон}}}} = \frac{0,2 \cdot 1,94}{\lg \frac{90 - 35}{90 - 83}} = 0,436 \text{ м}^3/\text{с,}$$

где  $C_{\max}$  — максимально возможная жирность, % ( $C_{\max} = 90\%$ );  $C_{\text{нач}}$  — жирность исходных сливок, %;  $C_{\text{кон}}$  — жирность высокожирных сливок, %.