

поверхность тефлона, т. е. величина свободной поверхностной энергии тефлона равна  $18 \text{ эрг/см}^2$ , в то время как у резины СКМС-10 она по нашим данным равна  $22 \text{ эрг/см}^2$ . Поэтому между резиной и поверхностью тефлона молекулярный контакт затруднен. Можно предположить, что явление прилипания имеет молекулярную природу и в случае окислительного воздействия на полимер контактируемой твердой поверхности, прилипания интенсифицируется. Этот вывод коррелирует с результатами работы, выполненной в Проблемной лаборатории физики полимеров МГПИ им. В. И. Ленина, где прямыми опытами показано акти-

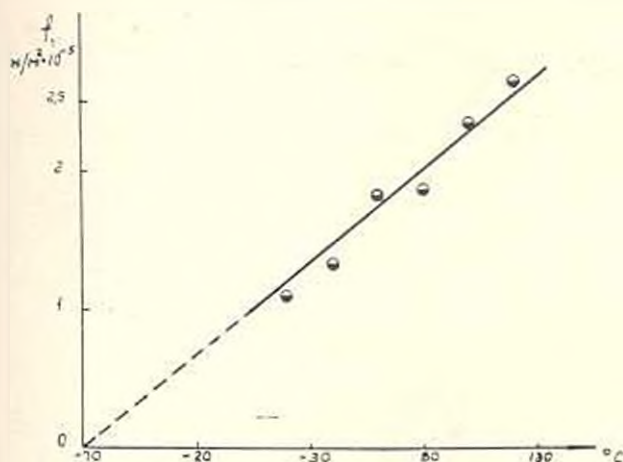


Рис. 3 Температурная зависимость удельной силы прилипания при температуре формирования контакта резины СКМС-10 к стали 1Х18Н9Т под нормальным давлением контакта  $1,7 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$  в течение 24 час при скорости движения тяги  $20 \text{ мм/мин}$

вирующее действие стальной поверхности на увеличение трения с повышением температуры: в результате окисления резины и увеличения энергии активации процесса трения.

Экстраполяция температурной зависимости удельной силы прилипания в область низких температур показывает, что с приближением к температуре стеклования резины ( $-70^\circ\text{C}$ ) удельная сила прилипания уменьшается до нуля. Это объясняется резким уменьшением площади фактического контакта вследствие увеличения жесткости резины, а также замедлением окислительных процессов на поверхности резины.

Ленинградский филиал НИИ  
резиновой промышленности

Поступило 3 I. 1969.

М. А. СТЕПАНОВА

## ТЕПЛООБМЕН ПРИ ЗАМОРАЖИВАНИИ МОРСКОЙ ВОДЫ

В работе рассмотрены вопросы теплообмена при вымораживании морской воды с целью ее опреснения. При аналитическом исследовании данного процесса был использован интегральный метод. Процесс замо-

раживания проводился на поверхности шара диаметром 100 мм в условиях отвода тепла через образующуюся твердую фазу при естественной конвекции. Рассматриваемый процесс состоит из периода достижения криоскопической температуры на поверхности и периода замораживания, при котором происходит изменение агрегатного состояния. Здесь рассматривается только второй период, т. е. первый изучен хорошо.

Процесс образования твердой фазы описывается уравнением теплопроводности, которое в сферических координатах имеет следующий вид:

$$\frac{\partial(rT)}{\partial\tau} = a \frac{\partial^2(rT)}{\partial r^2}, \quad (1)$$

где  $a$  — температуропроводность льда,  $r$  — радиус,  $T$  — температура,  $\tau$  — время.

Обозначим  $r$  через  $R_1 + X$ ,

где  $R_1$  — радиус шара,  $X$  — текущая координата.  $0 \leq X \leq \delta$ ,  $\delta$  — толщина затвердевшего слоя.

Тогда уравнение (1) можно записать в виде:

$$\frac{\partial[(R_1 + X)T]}{\partial\tau} = a \frac{\partial^2[(R_1 + X)T]}{\partial X^2}. \quad (2)$$

Начальные и граничные условия запишутся в виде:

$$1. \delta = 0 \quad \text{при } \tau = 0,$$

$$2. \frac{\partial T}{\partial X} = \frac{q_{\text{хл}}}{\lambda_{\text{л}}} \quad \text{при } X = 0,$$

где  $q_{\text{хл}}$  — удельный тепловой поток от хладоагента,  $\lambda_{\text{л}}$  — теплопроводность льда.

$$3. T = T_{\text{зат.}} \quad \text{при } X = \delta(\tau),$$

где  $T_{\text{зат.}}$  — температура затвердевания раствора

$$\frac{\partial T}{\partial X} = \frac{\rho}{\lambda_{\text{л}}} \frac{d\delta}{d\tau} + \frac{q_{\text{л}}}{\lambda_{\text{л}}} \quad \text{при } X = \delta(\tau),$$

где  $\rho$  — плотность льда,  $\rho$  — теплота затвердевания,  $q_{\text{л}}$  — удельный тепловой поток со стороны раствора к поверхности шара,  $\frac{d\delta}{d\tau}$  — скорость затвердевания.

Умножив обе части соотношения (2) на

$$dV = 4\pi(R_1 + X)^2 dX$$

и проинтегрировав в пределах  $x = 0$  до  $x = \delta$ , получим

$$\int_0^\delta (R_1 + X)^2 \frac{\partial[(R_1 + X)T]}{\partial\tau} dX = a \int_0^\delta (R_1 + X)^2 \frac{\partial^2[(R_1 + X)T]}{\partial X^2} dX. \quad (3)$$

Ввиду того, что стационарное решение пропорционально  $1/r$  предполагаемый нами профиль температур имеет вид:

$$T = \frac{b}{R_1 + X} + K.$$

Коэффициенты  $B$  и  $K$  находятся из граничных условия 2 и 3, поэтому

$$T = T_{\text{затв.}} + \frac{q_{\text{хл.}} R_1^2 (X - \delta)}{\lambda_{\text{л.}} (R_1 + \delta) (R_1 + X)}. \quad (4)$$

Подставляя в левую часть (3) уравнение (4) и учитывая, что  $\delta$  является функцией  $\tau$ , после интегрирования получим

$$\int (R_1 + X)^2 \frac{d[(R_1 + X)T]}{d\tau} dX = - \frac{q_{\text{хл.}} R_1^2}{(R_1 + \delta)^2 \lambda_{\text{л.}}} \left. \frac{d\delta}{d\tau} \right| \frac{(R_1 + \delta)^4 - R_1^4}{4}. \quad (5)$$

Правая часть уравнения (3) после интегрирования примет вид:

$$a \left[ (R_1 + \delta)^3 \frac{\partial \delta}{\partial \tau} + (R_1 + \delta)^2 \frac{d\delta}{d\tau} - \frac{R_1^2 q_{\text{хл.}}}{\lambda_{\text{л.}}} \frac{\delta}{(R_1 + \delta)} - \frac{R_1^3 q_{\text{хл.}}}{\lambda_{\text{л.}}} \right]. \quad (6)$$

Таким образом, получаем обыкновенное дифференциальное уравнение:

$$[a(R_1 + \delta)^3 \frac{\partial \delta}{\partial \tau} + R_1^2 q_{\text{хл.}} \delta] d\delta = [a R_1^4 q_{\text{хл.}} (R_1 + \delta)^2 + a R_1^3 q_{\text{хл.}} (R_1 + \delta) \delta - a(R_1 + \delta)^2 q_{\text{хл.}}] d\tau. \quad (7)$$

После интегрирования (7) с учетом условия  $\delta(0) = 0$  и оставляя только члены, содержащие  $\delta$  в первой степени, получим следующее приближенное выражение, позволяющее определить время образования слоя льда заданной толщины

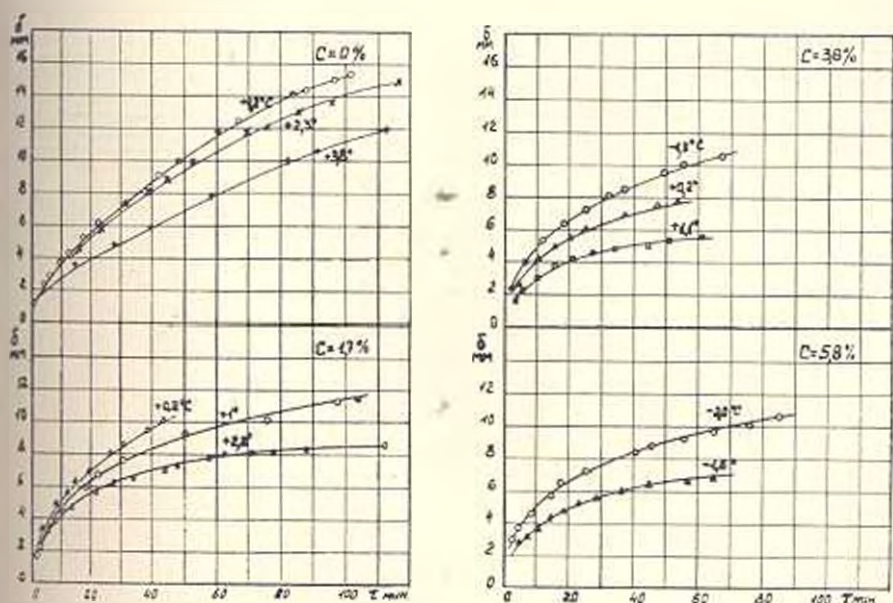


Рис. 1. Зависимость толщины намораживаемого слоя от времени для различных температур при постоянной концентрации раствора.

$$= \frac{(5az_0 + R_1 q_{x,1})^2}{3a(q_{x,1} - 1,66 q_x)} \left| 1 - \frac{R_1 z_0}{3(q_{x,1} - 1,66 q_x)} \right| - \frac{R_1(q_{x,1} - q_x)(5az_0 + R_1 q_{x,1})}{9a(q_{x,1} - 1,66 q_x)^2} \left| \ln \left| 1 - \frac{3(q_{x,1} - 1,66 q_x)}{R_1(q_{x,1} - q_x)} \right| \right| \quad (8)$$

При экспериментальном исследовании были проведены серии опытов, отличающихся между собой концентрацией раствора. На рис. (1) приведены результаты опытов, показывающие зависимость толщины намораживаемого слоя от времени.

Из рис. 1 видно, что при постоянной концентрации раствора увеличение температуры раствора приводит к уменьшению толщины затвердевшего слоя и снижению скорости затвердевания.

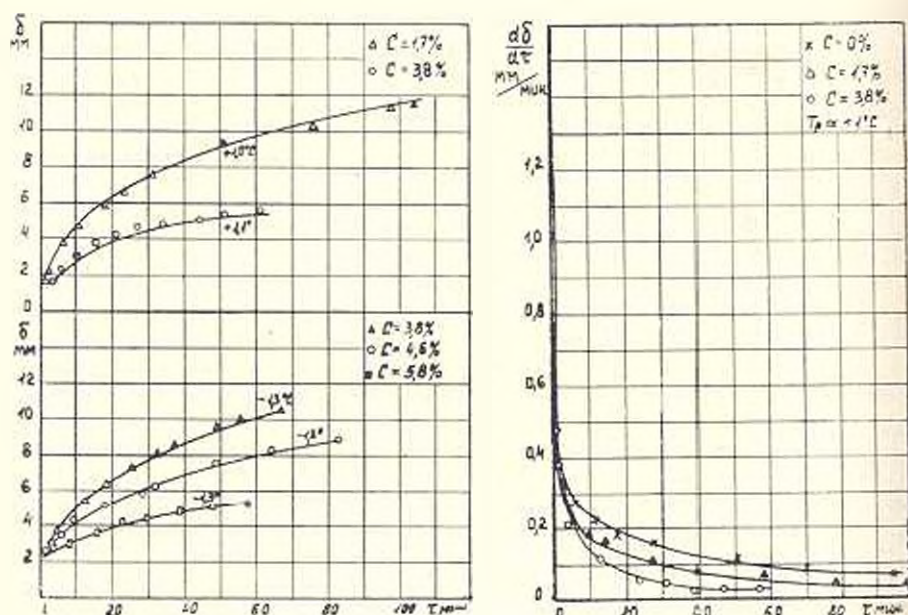


Рис. 2. Зависимость толщины намораживаемого слоя от времени для различных концентраций при постоянной температуре раствора.

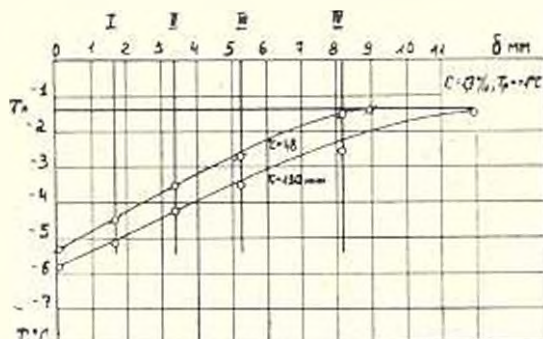


Рис. 3. Распределение температур по толщине пограничного слоя с течением времени.

Из опытов также установлено (рис. 2), что при постоянной температуре раствора увеличение концентрации приводит к уменьшению толщины затвердевшего слоя и снижению скорости замораживания.

На рис. 3 дано распределение температур в пограничном слое с течением времени.

В результате кипения в шаре фреона на его поверхности имеет место уменьшение температуры раствора, вызывающее увеличение плотности поверхностных слоев. Одновременно наблюдается понижение температуры криоскопии на  $0.4 : 0.55$  градуса, что является результатом увеличения солёности, а следовательно, и плотности, которое произошло в процессе льдообразования.

Ввиду того, что и в пограничном слое плотность выше, чем в основной массе раствора, возникает свободная конвекция.

Коэффициенты теплоотдачи определены для растворов с разными температурами и концентрациями. Величины коэффициентов теплоотдачи от раствора к образующейся твердой фазе находили по формуле:

$$\alpha = \frac{Q}{F} = \frac{\frac{d\tau}{dt}}{T_p - T_n},$$

где  $Q$  — тепловой поток,  $F$  — поверхность замораживания,  $\frac{d\tau}{dt}$  — скорость затвердевания,  $T_p$  — температура раствора,  $T_n$  — температура поверхности льда.

Анализ экспериментальных данных позволил установить, что в начале процесса, когда толщина льда мала и скорость его образования велика, коэффициент теплоотдачи от жидкой к твердой фазе имеет значительно большую величину по сравнению с случаем теплоотдачи без изменения агрегатного состояния, что находится в полном соответствии с физической картиной процесса теплоотдачи, изучавшегося А. Г. Ткачевым на чистой воде.