

мулируют сердце и надпочечники (адреналин и норадреналин), что приводит к усилению циркуляции крови и её перераспределению в пользу интенсивно работающих органов. Индивидуальность проявляется и в интенсивности реакции, и в значимости стрессирующего фактора. О личности и о её качествах можно говорить, когда объект исследования выступает и в роли исследователя, изменяющего своё поведение, несмотря на общепринятые образцы поведения, не соответствующие индивидуальным возможностям и потребностям организма. Сопоставительное изучение индивидуальности в групповой работе, изучение собственных сильных и слабых сторон, способов их коррекции, оптимальных для данных условий, является базой для развития личности и формирования культуры здоровья. Таким образом, индивидуальная (а не массовая усредненная) форма взаимодействия индивида с современной средой обитания, осознанно воспринятая личностью как образ жизни, выступает частью культуры здоровья.

Литература

1. Методы исследования вегетативных функций при изучении надсегментарных систем мозга. / Сост. А.Д.Соловьева. Под ред. А.М. Вейна. М: ММИ им. И.М.Сеченова, 1980.
2. Хомская Е.Д., Батова Н.Я. Мозг и эмоции (нейропсихологическое исследование). М.: Издательство "Российское педагогическое агентство", 1998. 268 с.
3. Клиническая токсикология детей и подростков. / Под ред. И.В. Марковой и др. СПб.: Интермедика, 1998, 304 с.
4. Ковешников В.Г., Никитюк Б.А. Медицинская антропология. К.: Здоровья, 1992. 2000 с.
5. Лесиовская Е. Е. Повышение индивидуальной устойчивости организма к комплексу экстремальных воздействий с помощью новых фармакологических средств: Автореферат дисс. д-ра мед. наук. СПб, 1993.-48 с.
6. Лесиовская Е.Е., Пастушенков Л.В. Фармакотерапия с основами фитотерапии. М.: ГЭОТАР-МЕД, 2003. 592 с.
7. Биохимические основы патологических процессов. / Под ред. Е.С. Северина. М.: Медицина, 2000. 304 с.

Математическое определение температурного поля дисперсной частицы при ее охлаждении в криогенной жидкости

к.т.н. проф. Белуков С.В., к.ф.-м.н. Некрасов А.К., Кименс П.Ю.
Университет машиностроения
8(499)267-07-14

Аннотация. Рассмотрены математические модели одномерной и двумерной задач температурного режима заморозания дисперсных частиц в криогенной жидкости.

Ключевые слова: криогранулирование, замораживание, задача теплопроводности, расчет.

Основным процессом многих технологий является замораживание. Если необходимо получить высокую скорость замораживания, которая обеспечит структурно-функциональные свойства продуктов, то лучше всего использовать метод криогранулирования. Этот метод применяют в таких областях, как нанотехнологии, медицина, биотехнологии, пищевые технологии.

Основными системами процесса криогранулирования выступают система получения и подготовки исходного продукта, система диспергирования, система криогранулирования, включающая в себя криоконсервирование и сублимационное обезвоживание и вспомогательные системы (обеспечение азотом и упаковка).

Одним из главных процессов методики расчета криогранулятора является определение

времени замораживания заданного объема продукта [1].

Необходимо установить, как меняется температура в процессе замораживания для капля жидкости (вода) разного диаметра в жидком азоте.

В качестве расчетной области для процесса замораживания рассмотрим сферические капли жидкости разного радиуса в жидком азоте при однородном теплообмене на поверхности. В процессе охлаждения образуется область с твердой фазой, граница которой перемещается в пространстве с течением времени, другая же часть расчетной области представляет собой жидкость.

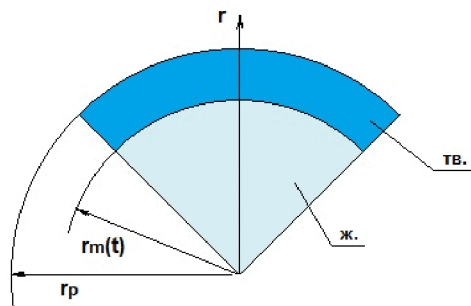


Рисунок 1 – Расчетная область для одномерной задачи

Задача теплопроводности с фазовым переходом классифицируется как задача с подвижной границей или задача Стефана. Классическая задача Стефана может быть использована только при моделировании процессов кристаллизации чистых веществ. Исследование процесса кристаллизации бинарных расплавов с использованием термодиффузионных моделей показало наличие определенных затруднений и противоречий при использовании фронтальной модели кристаллизации бинарных расплавов: диффузионное переохлаждение перед фронтом фазового перехода; неустойчивость решения фронтальной задачи в случае концентрационного переохлаждения [5].

В начальный момент капля имеет однородную температуру T_0 . На поверхности капли при r_p происходит конвективный теплообмен со средой с постоянной температурой T_g , под воздействием которого происходит кристаллизация, протекающая без переохлаждения и с пренебрежимо малым объемным эффектом.

Уравнение теплопроводности для рассматриваемой задачи имеет вид:

$$(C_p(T)c(T))_i \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_i(T) r^2 \frac{\partial T_i}{\partial r} \right),$$

где: $i = 1, 2$ – соответственно для твердой и жидкой фаз;

λ – коэффициент теплопроводности;

c – массовая плотность.

Условия сопряжения для отверждения:

$$r = r_m, \quad T = T_m = \text{const}, \quad \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} \right)_{i=1} - \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} \right)_{i=2} = c(T) L_m \frac{dr_m}{dt},$$

где: L_m – удельная теплота затвердевания (плавления).

Начальные условия при $t = 0$: $T = T_0$.

$$\text{Граничные условия: } r = 0: \frac{\partial T}{\partial r} = 0, \quad r = r_p: -\lambda \frac{\partial T}{\partial r} = \delta (T_g - T).$$

Учет теплоты фазового перехода при отверждении капли в уравнении теплопроводности выполняется путем использования эффективной теплоемкости $C_{pэф}$.

При неравномерном распределении температуры в сечении затвердевающей жидкости каждому локальному объёму V_o (контрольный объём в двухфазной зоне) соответствует равное количество твёрдой фазы, определяемое по правилу рычага для локальной температуры

T в данном объёме. То есть для $T_k \leq T \leq T_n$:

$$C_p(T)c(T)\frac{\partial T}{\partial t} = C_{p\phi}(T)c(T)\frac{\partial T}{\partial t}$$

$$C_{p\phi}(T) = \begin{cases} C_{pж}(T), T > T_n \\ C_p(T_k) - L\frac{dш}{dt}, T_k \leq T \leq T_n \\ C_{птв}(T), T < T_k \end{cases}$$

где относительное количество твёрдой фазы, находящейся в равновесии с жидкостью при температуре T , определяется формулой:

$$ш = \frac{V_{тв}}{V_0} = \frac{C_{пж} - C_{п0}}{C_{пж} - C_{птв}} = ш(T)$$

Для решения нестационарной задачи теплопроводности с разрывными коэффициентами применен численный, экономичный по числу операций конечно-разностный метод. Математической основой метода является вариационное исчисление. Дифференциальные уравнения и соответствующие граничные условия, описывающие процесс теплообмена, используются для постановки вариационной задачи, которая затем решается численно. Для решения системы однородных уравнений применялась консервативная неявная схема сквозного счета и метод прогонки.

Задаваясь коэффициентами теплопередачи и массовой теплоемкости на диаграмме видно их распределение в двухфазной области лед-жидкость:

Задаваясь коэффициентами теплопередачи и массовой теплоемкости на диаграмме видно их распределение в двухфазной области лед-жидкость:

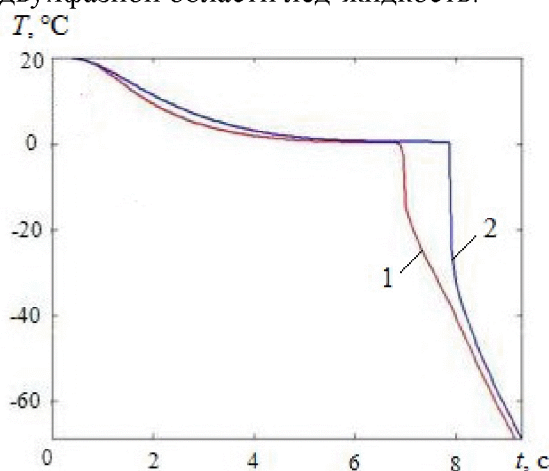


Рисунок 2 – Изменение температуры с течением времени в капле диаметром 2,5 мм и $\alpha=165$ Вт/(м²К): 1 – граничный слой, 2 – центр капли

Фиксируя коэффициент теплоотдачи α , зависимость которого рассчитывалась по значениям времени, найденным из аппроксимирующих функций, и меняя диаметры капли в программе, с помощью которой рассчитывается распределение температур, выдается массив данных для сектора, поделенного на 50 отрезков по оси $OX(r)$.

Анализируя данные для центра сферы и ее поверхности, можно составить график зависимости температуры от времени, а именно рассмотреть, как меняется температура в центре капли жидкости и на границе фаз от времени протекания процесса отверждения. Срыв характеристик показывает момент перехода капли в твердое состояние.

Для характеристики всего процесса сведем все диаграммы в одну:

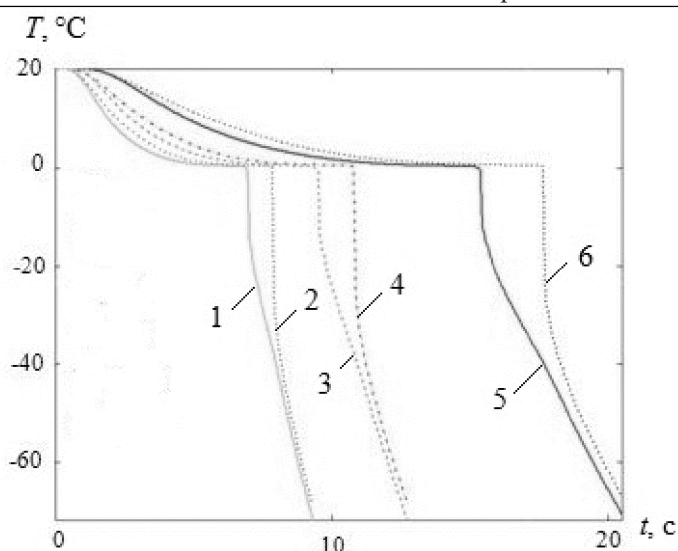


Рисунок 3 – Изменение температуры с течением времени для капель жидкости разного диаметра: 1 – диаметр 2,5 мм и $\alpha=165$ Вт/(м²К) (граничный слой); 2 – диаметр 2,5 мм и $\alpha=165$ Вт/(м²К) (центр капли); 3 – диаметр 3 мм и $\alpha=145$ Вт/(м²К) (граничный слой); 4 – диаметр 3 мм и $\alpha=145$ Вт/(м²К) (центр капли); 5 – диаметр 4 мм и $\alpha=120$ Вт/(м²К) (граничный слой); 6 – диаметр 4 мм и $\alpha=120$ Вт/(м²К) (центр капли)

Срыв характеристик показывает момент перехода капли в твердое состояние.

Как видно из диаграммы, чем больше диаметр капли, тем ниже температура отверждения и тем дольше продолжается процесс.

Постоянное расширение областей применения криодисперсной технологии обуславливает все более жесткие требования к качеству получаемого продукта, которое во многом определяется параметрами режима замораживания диспергированной смеси. Обычно для охлаждения используется жидкий криоагент, попадая в который капли довольно продолжительное время плавают на поверхности, отделенные от криогенной жидкости пленкой пара [2, 3].

Расчеты температурного режима и связанного с ним временем плавления капель воды при их охлаждении с отверждением в жидком азоте, выполненные ранее в предположении однородного теплообмена на поверхности капли по одномерной модели, дают заниженные значения данных величин по сравнению с экспериментальными данными. Наблюдения за движением сферических капель, свободно плавающих в криогенной жидкости, показывают, что независимо от отношения плотности капли к плотности криогенной жидкости (для водяной капли и азота $\beta = \rho_s / \rho_l = 1,24$), образующаяся на поверхности капли пленка пара удерживает каплю на плаву так, что она не полностью погружена в жидкость [6]. Часть капли, как показано на рис. 3, выступает над поверхностью криогенной жидкости. Следовательно, на поверхности капли теплообмен неоднородный. На погруженной в криогенную жидкость части поверхности капли интенсивность конвективного теплообмена (коэффициент теплоотдачи α_2) при пленочном кипении будет значительно выше, чем на выступающей над поверхностью криогенной жидкости части капли (коэффициент теплоотдачи α_1). На выступающей из криогенной жидкости поверхности капли, кроме конвективного теплообмена с газовой средой (пары криогенной жидкости), с температурой мало отличающейся от температуры криогенной жидкости T_f , будет происходить теплообмен излучением с окружающим пространством, со значительно более высокой температурой, чем у криогенной жидкости T_0 . Таким образом, математическое моделирование охлаждения капли в криогенной жидкости необходимо проводить как минимум по двумерной модели, позволяющей учесть существенно неоднородные условия теплообмена на поверхности капли [5].

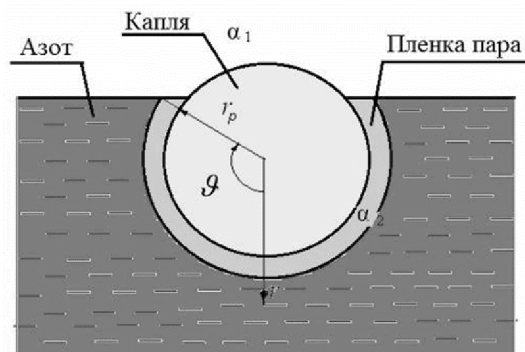


Рисунок 4 – Расчетная область для двумерной задачи

Распределение температуры в дисперсной частице $T(r, \vartheta, \tau)$ при неоднородном по поверхности теплообмене определялось из решения двумерного квазилинейного уравнения теплопроводности при $0 < r < r_p, 0 < \vartheta < \pi, \tau > 0$

$$C_{p'эф} \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{r^2} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{\sin \vartheta} \frac{\partial}{\partial \vartheta} \left(\sin \vartheta \frac{\partial T}{\partial \vartheta} \right) \right],$$

с начальным: при $\tau = 0: T = T_0$,

и граничными условиями: при $r \rightarrow 0: \frac{\partial T}{\partial r} = 0$,

при $0 < r < r_p, \vartheta = 0, \vartheta = \pi: \frac{\partial T}{\partial r} = 0$,

при $r = r_p, 0 < \vartheta < \vartheta_1: -\lambda \frac{\partial T}{\partial r} = \alpha_1(T - T_f) + \varepsilon \sigma (T^4 - T_0^4)$,

при $r = r_p, \vartheta_1 < \vartheta < \pi: -\lambda \frac{\partial T}{\partial r} = \alpha_2(T - T_f)$,

где: r – текущий радиус в капле, м;

ϑ – текущий угол, рад.;

$C_p(r, \vartheta, T)$ – эффективная объемная теплоемкость капли, Дж/(м³·К);

$\lambda(r, \vartheta, T)$ – коэффициент теплопроводности капли, Вт/(м·К);

T_f, T_0 – соответственно, температуры криогенной жидкости и начальная температура капли, К;

α_1, α_2 – коэффициенты теплоотдачи, соответственно, на сухой и смоченной поверхностях капли, Вт/(м²·К);

ε – степень черноты для сферической капли;

σ – постоянная Стефана-Больцмана, Вт/(м²·К⁴);

r_p – радиус капли, м.

Решение поставленной выше нестационарной нелинейной двумерной задачи теплопроводности получено численно методом конечных разностей экономичным методом суммарной аппроксимации. Этот метод сводящий решение многомерной задачи к последовательному решению одномерных задач теплопроводности по каждому из пространственных направлений. Для решения одномерных задач теплопроводности с разрывными коэффициентами применялась консервативная неявная абсолютно устойчивая по времени конечно-разностная схема сквозного счета и экономичный метод прогонки.

Учет теплоты фазового перехода при отверждении капли в уравнении теплопроводности выполняется путем использования эффективной теплоемкости $C_{pэф}$.

Разработан алгоритм и на языке программирования Фортран-90 в системе Compak Visual Fortran составлена программа для ЭВМ.

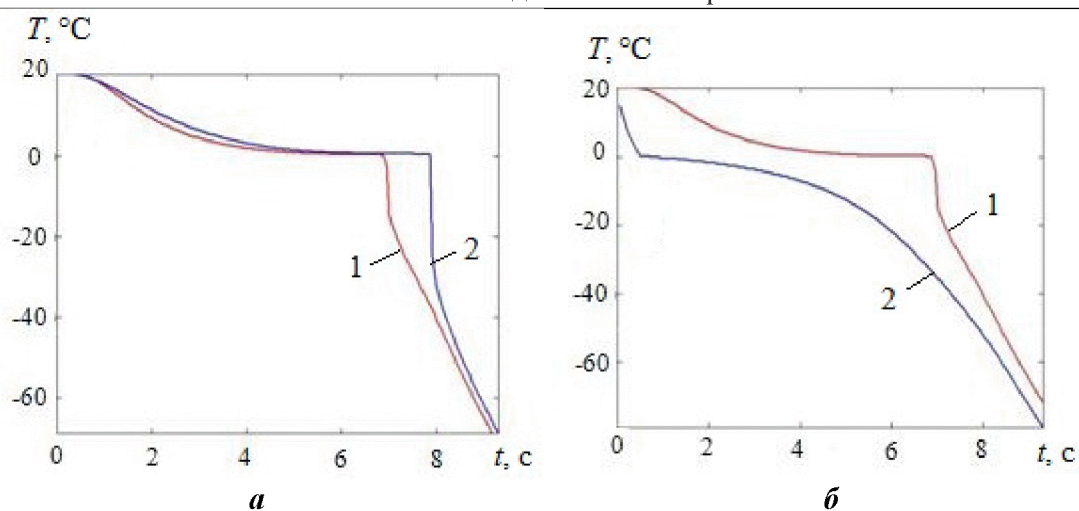


Рисунок 5 – Изменение температуры с течением времени в капле диаметром 2,5 мм и $\alpha=165$ Вт/(м²К): 1 – граничный слой, 2 – центр капли; а – сегмент 1; б – сегмент 45.

Для характеристики всего процесса сведем все три диаграммы в одну:

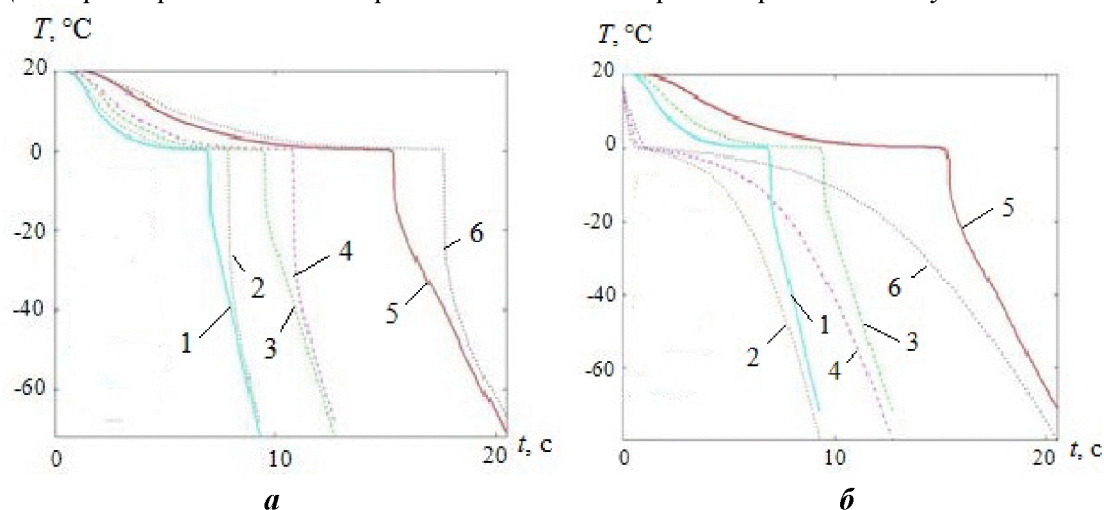


Рисунок 6 – Изменение температуры с течением времени для каплей жидкости разного диаметра: а – сегмент 1; б – сегмент 45. 1 – диаметр 2,5 мм и $\alpha=165$ Вт/(м²К) (граничный слой); 2 – диаметр 2,5 мм и $\alpha=165$ Вт/(м²К) (центр капли); 3 – диаметр 3 мм и $\alpha=145$ Вт/(м²К) (граничный слой); 4 – диаметр 3 мм и $\alpha=145$ Вт/(м²К) (центр капли); 5 – диаметр 4 мм и $\alpha=120$ Вт/(м²К) (граничный слой); 6 – диаметр 4 мм и $\alpha=120$ Вт/(м²К) (центр капли)

Анализ полученных в данной работе результатов, позволяет предположить, что соотношение площадей поверхности контактирующей с газом S_1 и поверхности капли погруженной в жидкость S_2 , с различными условиями теплообмена, изменяется в зависимости от диаметра капель. Так как с уменьшением диаметра капель расчетные времена охлаждения, вычисленные с одинаковым отношением этих поверхностей S_1/S_2 для капель всех диаметров, больше отличаются от экспериментальных значений, то для уменьшения расхождений, это отношение должно увеличиваться, т.е. более мелкие капли плавают в азоте с меньшим погружением. В этом случае средний по поверхности капли теплообмен, зависящий от отношений этих площадей, будет уменьшаться, а время отверждения увеличиваться.

Двумерная постановка задачи определения температурного режима капель при их криогенном охлаждении в азоте позволяет более полно учесть особенности теплообмена на поверхности капли и повысить точность теплофизических расчетов при получении частиц

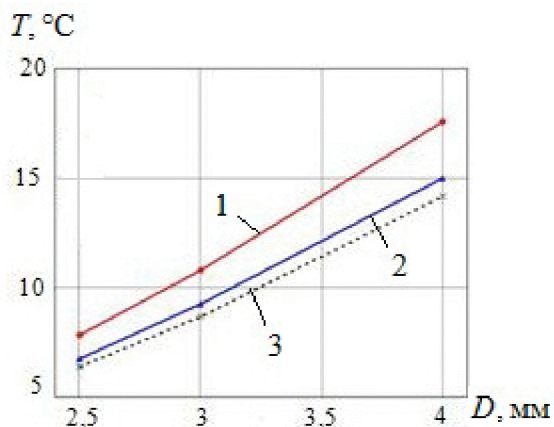


Рисунок 7 – Время полного отверждения капель воды в азоте. 1, 2 – время фазового перехода для 1 и 45 сегмента соответственно для двумерной задачи; 3 – время фазового перехода для одномерной задачи

Из-за интенсивного теплообмена при кипении криогенной жидкости, между поверхностью сферической капли и жидкостью образуется паровая прослойка толщиной δ (см. рисунок 4). Под действием этого парового слоя гранулы плавают, перемещаясь по поверхности жидкости, а затем по мере промерзания – тонут. Тепловой поток от более нагретого тела отводится через слой паровой пленки криогенной жидкости, который имеет малую теплопроводность. [4]

Капля удерживается наплаву некоторое время избыточным давлением пара, которое возникает так как газообразный хладагент имеет вязкость. Для возникновения подъемной силы толщина прослойки должна быть $\delta < r\theta$.

Толщина паровой прослойки определяется следующим образом при предположении, что она равномерно распределена по поверхности: V_k – объем капли; $V_{\text{п}}$ – объем паровой прослойки; V_{N_2} – объем азота. Тогда массы: $M_k = \rho_k V_k$ – капли; $M_{\text{п}} = \rho_{\text{п}} V_{\text{п}}$ – паровой прослойки; $M_{\text{N}_2} = \rho_{\text{N}_2} (V_k + V_{\text{п}}) = M_k + M_{\text{п}}$. Значит, объем паровой прослойки:

$$V_{\text{п}} = V_k \frac{\rho_k - \rho_{\text{N}_2}}{\rho_{\text{N}_2} - \rho_{\text{п}}} \rightarrow \delta. V_{\text{п}} = 0,25 \frac{\pi d^3}{6} = \frac{\pi (d + 2\delta)^3}{6} - \frac{\pi d^3}{6}. \delta = 0,0386d.$$

Для капель различного диаметра можно построить графическую зависимость толщины паровой пленки от диаметра (рисунок 8):

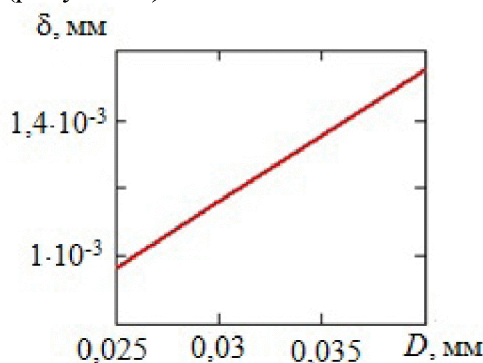


Рисунок 8 – Зависимость толщины паровой пленки от диаметра капли

Тепловой поток и массовый расход можно определить из следующих уравнений:

$$q = \alpha (t_w - t_{\text{N}_2}) = -\lambda \frac{dt}{dr}$$

$$S_k q_k = Q = L_{\text{N}_2} \dot{m},$$

где: α – коэффициент теплоотдачи поверхности капли, Вт/(м·К); t_w ; t_{N_2} – температуры соответственно на поверхности капли и азота; λ – коэффициент теплопроводности капли; S_k – площадь поверхности капли; L_{N_2} – теплота фазового перехода азота.

Из данных соотношений можно получить зависимости теплового потока и расхода от температуры капли (рисунок 9).

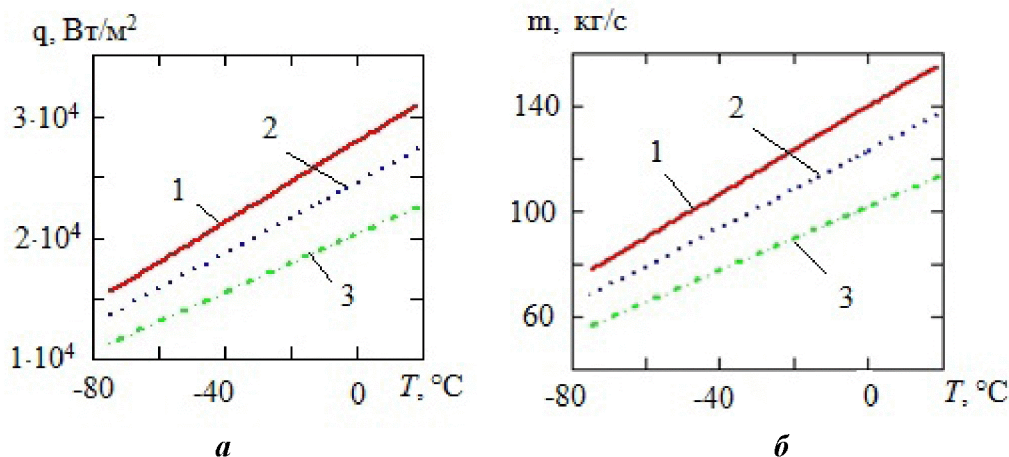


Рисунок 9 – Графики зависимости теплового потока (а) и массового расхода (б) от температуры на поверхности капель разного диаметра

На основании полученных данных можно будет исследовать математическую модель взаимодействия сферы с поверхностью криогенной жидкости с учетом зависимости толщины паровой прослойки от полярного угла. Тем самым расчетные данные будут более полно отражать нашу картину и приблизятся к эксперименту.

Литература

1. Белуков С.В., Соколов А.В. Многофункциональный криогранулятор программного типа для нано-, био- и пищевых технологий. Холодильная техника. 2012. № 2. с. 48 – 51.
2. Белуков С.В., Соколов А.В. Программное замораживание при условиях плавления гранул жидкофазных суспензий в процессе криогранулирования. Вестник международной академии холода. 2012. Выпуск 1. с. 15 – 18.
3. Белуков С.В., Соколов А.В. Криогранулирование в жидком азоте как способ получения заданных параметров материалов: инженерный подход. Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2012. № 8. с. 30 – 33.
4. Генералов М.Б. Криохимическая нанотехнология. Учебное пособие для вузов. М.: ИКЦ Академкнига. 2006. 325с.
5. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Численные методы решения задач конвекции-диффузии. М.: Едиториал УРСС, 2004. 248 с.

Новое применение вторичных полимерных композиционных материалов

к.т.н. проф. Скопинцев И.В., Мелешкина А.М., Камшад Ф.
 Университет машиностроения
 8 (499) 267-07-31, iskopincev@mail.ru

Аннотация. Проведен ряд экспериментов в области влияния химической природы и состава смесей полимера, основанных на повторно используемых упаковочных материалах (например, полиолефины и отходы упаковки "Tetra Pak"), температурных условий и других параметров их совместной переработки с некоторыми дисперсными наполнителями на физико-химические и физико-механические свойства соединений. Полученные образцы композитов, основанных на отходах упаковочных материалах, изучали на поглощение нефтепродук-