

УДК 536.24

# Программное замораживание при условиях плавления гранул жидкофазных суспензий в процессе криогранулирования

Канд. техн. наук С. В. БЕЛУКОВ, А. В. СОКОЛОВ

Московский государственный университет инженерной экологии  
107884, г. Москва, ул. Старая Басманная, 21/4

*The purpose of the publication generalization of laws of behavior of a granule in liquid nitrogen with the subsequent record of the simplified mathematical model of behavior of a granule for revealing of base positions. The software of calculation of processes of behavior in liquid nitrogen is approved, and borders of mathematical model of its application and a substantiation are calculated.*

**Key words:** criogranulation, steam layer, the refrigerant, surface tension, boiling of cryogenic liquids.

**Ключевые слова:** криогранулирование, паровой слой, хладагент, поверхностное натяжение, кипение криогенных жидкостей.

Метод замораживания капель жидкости в криопродуктах применяется сравнительно давно в химической технологии и называется криохимическим синтезом или, по терминологии ряда авторов, криодисперсной технологией. В пищевой промышленности данный метод используется для получения гранул концентратов и различных видов молочных продуктов. Анализ аппаратов, наиболее применяемых в производстве, позволяет сделать вывод, что подавляющее количество криогрануляторов работает в режиме так называемой поверхностной грануляции, и конструкционные расчеты сводятся к оценке времени пребывания гранулы на поверхности хладагента.

Программное замораживание — это необходимый закон проведения последовательно связанных между собой технологических процессов с параметрами, обеспечивающими заданные свойства целевого материала. Лучшим образом для программного замораживателя, по мнению ряда исследователей, является криогранулятор иммерсионного типа.

Применение криогранулирования для замораживания жидкофазных систем имеет существенные особенности, связанные прежде всего с определением закона отвода тепла, показывающего конечное качество продукта. Рассмотрение процесса формирования гранул в криогенных жидкостях необходимо начинать рассматривать с процессов диспергирования жидкости и конвективного теплообмена в парах жидкого азота. Определение времени замораживания и температурных полей продуктов в виде гранул является предметом многих исследований. Задача принадлежит к классу так называемых задач с подвижной границей раздела фаз [1], а определение температурных полей и времени замораживания до заданной температуры в центре гранулы в системе тел с подвижными границами раздела фаз называют задачей Стефана. Ряд исследователей вводят различные граничные условия. В общем случае для решения задач, связанных с фазовыми переходами, в силу своей универсальности преимущество получил метод конечных разностей (метод сеток). Плаучность гранулы более плотной, чем хладагент, объясняется влиянием эффекта Лейденфро-

ста. Работы, связанные с изучением данного вопроса, можно разделить на несколько этапов.

Толщина прослойки пара  $\delta$  определяется из уравнения движения вязкого несжимаемого пара (уравнение Навье—Стокса) и уравнения неразрывности при условии, что капля поддерживается на поверхности жидкости за счет вязкого трения вытекающего пара. Дальнейшее изучение этого вопроса было продолжено в работах, где представлена модель процесса теплообмена изотермической сферы, плавающая на поверхности хладагента в режиме пленочного кипения. Толщина паровой прослойки, по утверждению А. А. Макеева, пропорциональна ( $R-1/4$ ,  $T-1/4$ ) и слабо зависит от отношения плотностей сферы и жидкости, а степень погружения сферы весьма слабо зависит от ее размера и перепада температур. Она главным образом определяется отношением плотностей сферы и жидкости. Продолжая анализировать уже «не архимедово плавание» (термин, используемый авторами в работе), применяют следующие допущения:

- толщина  $h$  пленки пара — постоянная;
- скорость движения пара настолько мала, что можно пренебречь силами инерции и считать пар несжимаемым;
- характер течения пара — ламинарный;
- жидкость находится в состоянии насыщения, т. е. весь тепловой поток, передаваемый от капли через пленку пара, идет на испарение жидкости;
- теплота через пленку пара передается исключительно вследствие теплопроводности, лучистая составляющая теплового потока мала;
- деформация сил давления и касательных напряжений незначительна;
- физические свойства капли, жидкости и пара постоянны, следовательно задача может рассматриваться как квазистационарная, т. е. скорость понижения температуры сферы заметно меньше скорости установления стационарного состояния системы, соответствующего данному перепаду между температурами капли и жидкости.

Произведенный анализ сил поверхностного натяжения и касательных напряжений приводит к определению предельного радиуса плавления (табл. 1).

Определение предельного радиуса плавления и капли

Параметр	Источник	Формула*
Предельный радиус плавления	Макеев А. А.	$\left[ \frac{18\mu''\lambda''\Delta T}{L_c\rho''\rho'g} \frac{\beta}{(\beta-1)^4} \right]^{1/3}$
	Клименко А. В.	$\left[ \frac{18\mu''\lambda''\Delta T}{L_c\rho''\rho'g} \frac{\beta^{1/2}}{(\beta^{1/2}-1)^4} \right]^{1/3}$
	Макеев А. А.	$\left[ \frac{18\mu''\lambda''\Delta T}{L_c\rho''\rho'g} \frac{1}{\beta^{1/3}(\beta^{1/3}-1)^4} \right]^{1/3}$
Предельный перепад температур	Макеев А. А.	$\frac{L_c\rho''\rho'gR^3}{18\mu''\lambda''} \frac{(\beta-1)^4}{\beta}$
	Клименко А. В.	$\frac{L_c\rho''\rho'gR^3}{18\mu''\lambda''} \frac{(\beta^{1/2}-1)^4}{\beta^{1/2}}$
	Макеев А. А.	$\frac{L_c\rho''\rho'gR^3}{18\mu''\lambda''} \beta^{1/3}(\beta^{1/3}-1)^4$

\* В приведенных формулах  $\beta = \frac{\rho_c}{\rho'}$ .

Дальнейшие работы подтверждают некорректность данных выкладок. Принятые допущения значительно упрощают задачу и находят пути ее аналитического решения, с большой степенью приближенные к реальной ситуации, что и подтверждается экспериментами [2, 3]. В данной работе получены значения  $R_{\text{пред}}$ ,  $\Delta T_{\text{пред}}$  для гранул воды.

Однако определить значение температуры, при которой в опытах фиксируется начало процесса кристаллизации, довольно сложно. Использование разности времени начала кристаллизации  $\Delta t$  позволяет исключить эту сложность [4].

Интерес к пленочному кипению в большом объеме на телах сферической поверхности в последние годы заметно возрос в связи с развитием криохимической технологии, порошковой металлургии, ядерной энергетики и др. Особенностью тел сферической геометрии является отсутствие концевых эффектов, что позволяет рассматривать соответствующие экспериментальные данные как наиболее надежные. Обобщение работ по исследованию пленочного кипения при «больших» и «малых» сферах приведены в табл. 2.

Пленочное кипение ранее изучалось как при высоких положительных, так и при отрицательных (криогенных) температурах. Однако комплекс явлений, протекающих при смене режима кипения с пленочного на пузырьковый, что имеет место при криогранулировании, является недостаточно изученным. В этом аспекте представляют большой интерес исследования, посвященные изучению развития неустойчивости и разрушения парового слоя. Они интересны тем, что относятся к редкому виду работ, рассматривающих «затухающее пленочное кипение». Приведенные авторами визуальные и температурные наблюдения, позволяют внести ясность в описание физики процесса второго кризиса кипения.

Моделирование процесса теплового взаимодействия частицы с жидким азотом представляет собой один из элементов задачи, решение которой необходимо для теоретического описания парового взрыва и аппаратного решения криогранулятора жидкофазных суспензий. Расчетные оценки и экспериментальные исследования показали, что при тепловом взаимодействии отдельной частицы с окружающей охлаждающей жидкостью имеют место интенсивные колебания давления в паровой оболочке. Интенсивность колебаний зависит от условий теплопередачи через паровой зазор. Поэтому задача решается как нестационарная. В настоящее время в литературе такие решения отсутствуют. Построение теоретической модели теплового взаимодействия одиночной частицы воды с окружающим ее жидким азотом, проведение экспериментального исследования и расчет осуществляются с учетом физических особенностей задачи. Учитываются высокий уровень суммарной плотности теплового потока от частицы, приводящий к интенсивному испарению азота, и инерция газообразного азота, движущегося под действием разности внешнего давления и переменного давления в паровой оболочке частицы. Рассматриваемые физические модели являются общими, а математический аппарат ограничен размером частиц и уровнем теплофизических параметров. Поэтому нами рассмотрены условия, представляющие интерес в связи с аппаратным решением криогранулирования.

Нестационарная задача о тепловом взаимодействии сферической частицы и окружающим жидким азотом может быть решена со следующими допущениями. Считаем, что частица свободно упала в жидкий азот, всплыла мгновенно и в начальный момент времени паровой зазор отсутствует. Предполагается, что задача сохраняет центральную симметрию. Эффекты, связанные с неустойчивостью межфазной границы «пар–жидкость», не рассматриваются.

Пленочное кипение на сферах различных форм

Признаки отличия	«Большие» сферы	«Малые» сферы
Определение «малых» и «больших» сфер.	Пар, образующейся в нижней части поверхности нагрева на «малых» сферах, стекает в единственный паровой пузырь. Удаление пара осуществляется в результате развития неустойчивости Тейлора, приводящей к образованию одиночного пузыря или группы пузырей. Наблюдается зависимость от ламинарного режима течения пара в пограничном слое и интенсивности вдува.	На «больших» сферах происходит дробление верхней части поверхности раздела за счет развивающейся тейлоровской неустойчивости и образование нескольких паровых пузырей. В образующихся паровых струях движение пара осуществляется со значительной скоростью, т. е. доминирующей становится неустойчивость Гельмгольца.
Граница между «большими» и «малыми» сферами заключена в пределах $D/b = 5,33-9,24$ .	Интенсивность испарения на внешней границе мала.  С отрывом, интенсивность испарения на внешней границе мала.	В этом случае передача теплоты от поверхности теплообмена будет осуществляться только за счет теплопроводности через паровую пленку. Полный поток теплоты, отводимый от сферы, складывается из потока теплоты через пленку пара толщиной $\delta = 0,4b$ и потока теплоты через область, занятую паровым пузырем.

Такая постановка задачи соответствует условиям процесса при диаметре частицы от 1 до 10 мм. Частица считается изотермической, так как, свободно плаывая на поверхности жидкого азота, она вращается вокруг своей оси и остывает равномерно. Все физические свойства рассчитываются по формуле состояния вещества, в данном случае — воды и азота [4]. Ниже приводится решение задачи для инженерного расчета параметров криогранулирования. Предложенная в результате решения задачи методика позволяет определить необходимые параметры криогрануляторов. При сравнении приведенных методик и расчетов задача Стефана дает возможность сделать вывод о корректности использования данных методик для гранул диаметром от 1 до 10 мм с погрешностью до 5 %.

Для описания динамики межфазной поверхности используется следующая модель: сферическая гранула диаметром  $d$  погружена в жидкий азот на глубину  $Z_p$  с начальной температурой  $T_p$  (рис. 1).

Состояние равновесия гранулы при плавании на поверхности определяется по уравнению

$$m_p \frac{dU_p}{dt} = m_p g - \rho_g \frac{\pi}{6} (d + \delta_{\min})^3 g, \quad (1)$$

где  $m_p$  — масса частицы.

При  $\delta > \delta_{\min}$  гранула плавает на поверхности жидкого азота (условие плавания).

Для решения уравнения (1) нам также понадобится уравнение для определения температуры частицы

$$C_p m_p \frac{dT_p}{dt} = S_\theta \alpha (T_p - T_s) = H_v J_v S_\theta, \quad (2)$$

где  $S_\theta = 4\pi R_p^2 \frac{\theta}{\pi}$  — площадь погруженной части гранулы.

Для закрытия системы необходимо ввести баланс давлений в паровой пленке:

$$\rho_g Z_p g = \rho n \frac{U_v^2}{2}, \quad (3)$$

где  $\rho n U_v S_\delta = J_v S_\theta$  и  $S_\delta = \pi((R_p + \delta)^2 - R_p^2)$ .

Решая систему дифференциальных уравнений, получаем график зависимости диаметра гранулы от толщины парового слоя (рис. 2).

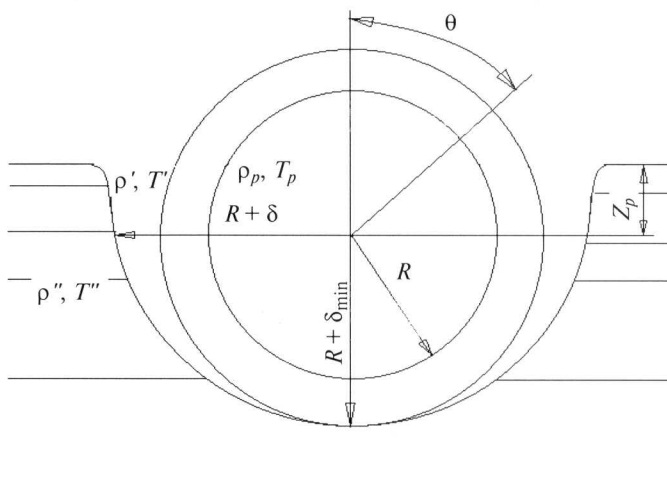


Рис. 1. Постановка задачи

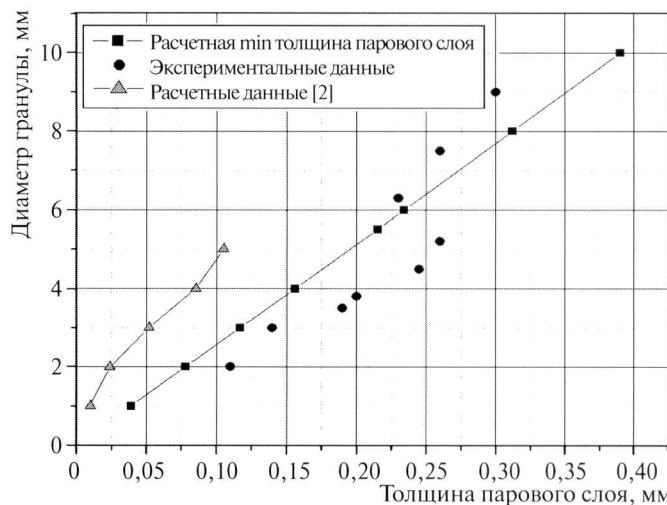


Рис. 2. График зависимости диаметра гранулы от толщины парового слоя

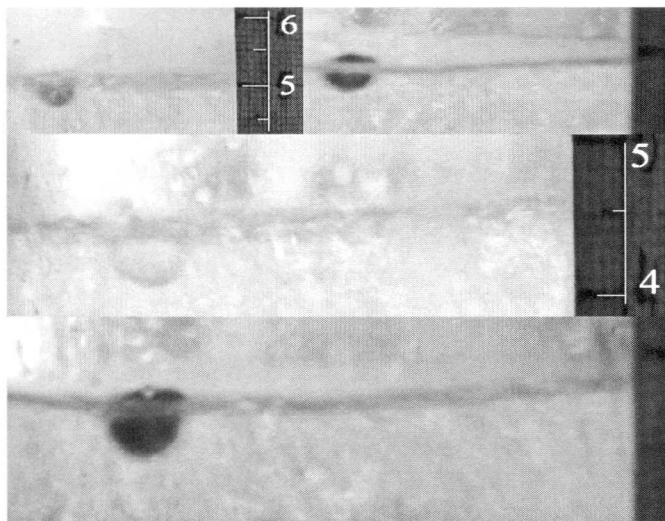


Рис. 3. Фотографии гранул диаметром 6 мм в толще жидкого азота

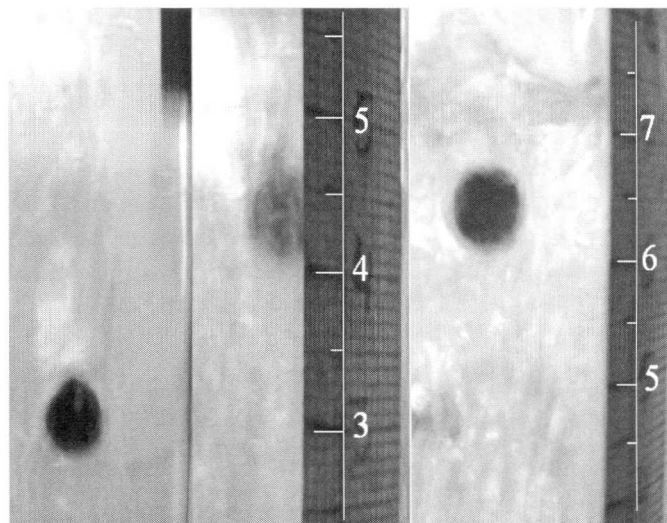


Рис. 4. Фотографии гранул диаметром до 4 мм на поверхности жидкого азота (5-я секунда погружения)

С помощью стенда из прозрачного сосуда Дьюара с вакуумной изоляцией были проведены серии опытов с набором диспергирующих устройств с высокой и низкой степенью монодисперсности по отношению к различным веществам, таким, как вода, раствор перманганата калия, глицерин, глюкоза. Результаты эксперимента с водой представлены на рис. 2. Как видно из графика, все точки диаметром меньше 5,5 мм находятся под прямой и плавают на поверхности азота, а точки с диаметром больше 6 мм находятся в толще азота и погружены на определенную глубину в зависимости от размера гранулы. Визуальная картина поведения гранул представлена на рис. 3, 4.

### Выводы

1. Сформулированы физическая и математическая модели поведения гранулы целевого продукта с учетом зависимости толщины парового зазора от полярного угла. Представлено решение нестационарной модели закрытого типа теплообмена.

2. Получены аналитические выражения для сил, действующих на сферу и поверхность криогенной жидкости

с учетом изменения толщины парового зазора вокруг замораживаемой сферы, обеспечивающие их равновесие; выполнено решение систем дифференциальных уравнений и построены графики поведения гранулы, согласующиеся с экспериментом.

3. При сравнении различных решений задачи Стефана можно говорить о корректности использования приведенных методов в диапазоне гранул от 1 до 10 мм.

### Список литературы

1. Нагорный В. С. Управляемая капля // Соросовский образовательный журнал. Т. 8. 2004.

2. Белуков С. В., Толстых Т. Н. Криогрануляция на поверхности хладагента // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 1998. № 12.

3. Белуков С. В. Криогранулирование как способ формирования структурно-функциональных свойств целевого продукта // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2007. № 10.

4. Клименко А. В., Сеницын А. Г. Экспериментальное исследование пленочного кипения на поверхности свободно плавающих сферических частиц // Моск. энерг. ин-т. 1986. Вып. 91.