

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Кемеровский государственный сельскохозяйственный институт»

На правах рукописи

Храпов Александр Александрович

**ГРАНУЛИРОВАНИЕ ЛЬДА
В ЦИРКУЛЯЦИОННОМ КИПЯЩЕМ СЛОЕ**

Специальность 05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель – д.т.н., профессор Полтавцев В.И.

Кемерово – 2016

СОДЕРЖАНИЕ

Условные обозначения.....	4
Введение.....	5
1 Современное состояние теории и практики намораживания льда	10
1.1 Физико-химические свойства воды.....	10
1.2 Формула Р. Планка.....	13
1.3 Задача Стефана.....	14
1.4 Организация кипящего слоя в промышленности.....	16
1.5 Способы получения искусственного льда в кипящем слое.....	18
1.6 Практическое использование льда.....	19
1.7 Ледовые переправы.....	20
1.8 Выводы по разделу 1.....	24
2 Математическое моделирование процесса гранулирования льда в аппарате с циркуляционным кипящим слоем.....	26
2.1 Основные особенности намораживания льда в кипящем слое.....	27
2.2 Математическая модель адиабатического намораживания воды на грануле льда как задача Стефана.....	29
2.3 Максимальный радиус гранулы.....	37
2.4 Численное решение математической модели намораживания льда на грануле за счет внутреннего холода.....	38
2.5 Математическая модель процесса гранулирования льда в циркуляционном кипящем слое.....	46
2.6 Выводы по разделу 2.....	55
3 Экспериментальные исследования процесса гранулирования льда.....	57
3.1 Особенности конструкции и режима псевдооживления аппаратов с плоским и циркуляционным кипящим слоем.....	57
3.2 Характеристика твердой и газовой фаз.....	62
3.3 Характеристика процесса орошения.....	64
3.4 Кинетика намораживания льда в кипящем слое.....	68

3.5 Тепловое воздействие капель на гранулы.....	70
3.6 Изменение фракционного состава гранул льда.....	74
3.7 Намораживание льда в статических условиях.....	75
3.8 Исследование подвижности снеговодяной суспензии	79
3.9 Несущая способность ледяных блоков на основе гранул льда.....	80
3.10 Выводы по разделу 3.....	81
4 Аппаратурное оформление процесса.....	83
4.1 Приготовление заправки.....	83
4.2 Форма и размеры рабочей камеры и частиц заправки.....	85
4.3 Сравнительная характеристика льдогенераторов.....	90
4.4 Ускорение строительства ледовых переправ.....	92
4.5 Расширение срока эксплуатации ледовых переправ.....	90
4.6 Выводы по разделу 4.....	99
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	101
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	103
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Кинетика роста гранул льда в статических условиях	119
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Показатели роста гранул льда в кипящем слое	137
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Несущая способность ледяных брусков	141

Условные обозначения

- p – атмосферное давление, Па;
 t – температура льда по шкале Цельсия, °С;
 ρ – плотность льда, кг/м³;
 q – удельная теплота плавления льда, кДж/кг;
 c – удельная теплоемкость льда, кДж/(кг • К);
 λ – коэффициент теплопроводности льда, Вт/(м • К)
 ΔH – энтальпия кристаллизации, кДж/моль;
 $\rho_{\text{ж}}$ – плотность воды, кг/м³;
 $t_{\text{вх}}$, – температура воздуха на входе в рабочую камеру, °С;
 $t_{\text{вых}}$ – температура воздуха на выходе из рабочей камеры, °С;
 $\rho_{\text{г}}$ – плотность воздуха, кг/м³;
 $c_{\text{г}}$ – удельная теплоемкость воздуха, кДж/(кг • К);
 $\lambda_{\text{г}}$ – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м • К)
 R_0 – начальный радиус гранулы, м;
 R, r – радиус гранулы, м;
 m – масса ледяных гранул, кг;
 n – число гранул, шт;
 S – площадь поверхности гранул, м²;
 ψ – доля смоченной поверхности гранул, м²/м²;
 α – коэффициент теплоотдачи к воздуху, Вт/(м² • К);
 $\alpha_{\text{м}}$ – коэффициент теплоотдачи от смоченной поверхности, Вт/(м² • К);
 $\alpha_{\text{с}}$ – коэффициент теплоотдачи от сухой поверхности, Вт/(м² • К);
 ε – порозность псевдооживленного слоя,
 N – мощность вентилятора, кВт;
 V – расход воздуха, м³/с;
 G – удельная производительность аппарата, кг/(с • кВт);
 τ – время намораживания, с.

Введение

В настоящее время Россия в различных отраслях промышленности использует тысячи тонн искусственного водного льда: создание изотермических условий химических реакций, использование ледяных моделей будущих отливок в металлургии, охлаждение скоропортящихся продуктов пищевой промышленности, строительство объектов социального назначения - катки, ледяные скульптуры, а также ледовые переправы, количество и значение которых на примере Кузбасса возрастает ежегодно.

Химическая промышленность издавна использует лёд как холодильный агент при работе химических реакторов.

Так, ледовая переправа в г. Юрга сокращает длину трассы Новосибирск – Мариинск на 100 км, при этом за одни только сутки здесь проходит до 900 машин, суммарная экономия пробега которых в несколько раз превышает длину земного экватора. С учётом ежегодного числа возводимых в России ледовых переправ (порядка 1000 единиц) значимость подобного рода сооружений многократно возрастает. На очереди строительство глыб льда объёмом 1 млн.куб.м для охлаждения оборотных вод электростанций в летнее время, которые проблематично наморозить методом полива воды, как показали работы института ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева в г. С.-Петербург.

Благодаря холодному климату, в России водный лёд заготавливают с использованием естественного холода атмосферы в зимний период года на большей части её территории. К сожалению, скорость замерзания воды мала даже при низких температурах. Выходом из сложившейся ситуации является осуществление процесса намораживания льда в виде сферических гранул в аппарате с кипящим слоем. Неограниченное количество холодного воздуха в зимнее время года и высокий коэффициент теплоотдачи в кипящем слое позволяют получить высокую удельную производительность аппаратов и требуемое количество льда в виде запаса на летний период.

Высокая производительность льдогенератора кипящего слоя при температуре атмосферного воздуха от -7°C и ниже позволяет заготавливать гранулированный лед не только зимой, но и поздней осенью и ранней весной при соответствующей температуре атмосферы. Использование ледяных гранул в качестве наполнителя при строительстве ледовых переправ сокращает сроки возведения и позволяет вводить их в эксплуатацию значительно раньше. Весной при оттаивании верхнего слоя ледового полотна гранулированный лед является лучшим связующим компонентом для ремонта образовавшихся промоин.

Работа выполнялась в соответствии с планом НИР КГСХИ, зарегистрированном во ВНИИЦ (Всеросс. науч.-техн. информ. центр), по теме: «Применение физико-математических методов в решении прикладных задач». Регистрационный номер 01.2.00 104937.

Цель работы. Разработка процесса гранулирования льда в аппарате с циркуляционным кипящим слоем.

Задачи исследования.

1. Анализ и обобщение существующих технологий и аппаратуры для гранулирования естественного и искусственного льда и его промышленного применения.
2. Исследование способа адиабатического намораживания льда и создание математической модели процесса.
3. Разработка процесса гранулирования льда атмосферным воздухом в аппарате с циркуляционным кипящим слоем и его математической модели.
4. Разработка аппаратного оформления технологических стадий получения овально-сферических гранул льда в циркуляционном кипящем слое (орошение, гранулирование, раскалывание).
5. Усовершенствование оборудования и способа применения овально-сферических гранул льда при создании промышленных объектов (ледовые переправы, мульды запасов льда и т.п.) и удлинении сроков их эксплуатации.

Научная новизна.

1. Разработана и решена численным методом математическая модель класса нелинейной задачи Стефана движения межфазной границы при кристаллизации воды на сферической грануле льда в адиабатических условиях.

2. Решена математическая модель процесса намораживания массы ледяных гранул в аппарате с циркуляционным кипящим слоем при заданных параметрах процесса и установлена зависимость максимальной производительности аппарата от входных параметров потоков: температуры воздуха, размера кристаллов затравки и степени орошения.

3. Впервые осуществлён процесс гранулирования льда с удельной производительностью, превышающий данный показатель подобных процессов для класса аппаратов с кипящим слоем.

Объект и методы исследований.

Объектом исследования является процесс гранулирования льда в циркуляционном кипящем слое с использованием холодного атмосферного воздуха. Решение поставленных задач осуществлялось методами экспериментальных исследований химической технологии, а также методами математической физики путем постановки теоретических моделей и экспериментального их подтверждения.

Практическая значимость.

1. Экспериментально определен в адиабатических условиях интервал скорости намораживания льда на сферических гранулах диаметром 30 мм от $0,011 \text{ кг/с}\cdot\text{м}^2$ при $-5 \text{ }^\circ\text{C}$ до $0,190 \text{ кг/с}\cdot\text{м}^2$ при $-42 \text{ }^\circ\text{C}$, соответствующий расчетному значению.

2. Впервые найдена верхняя граница температуры воздуха ($-5 \text{ }^\circ\text{C}$) области устойчивого намораживания воды на гранулах льда в условиях циркуляционного кипящего слоя без дополнительного охлаждения воздуха.

3. Получены исходные данные и разработана методика расчета и

конструирования аппарата по намораживанию гранулированного льда в циркуляционном кипящем слое.

4. Разработаны технологическое оборудование в виде комплекса (гранулятор, раскалыватель, форсунка) для получения гранулированного льда с производительностью 4,8 т/ч•куб.м рабочего объема аппарата и способы заливки ледяных покрытий, армированных овально-сферическими гранулами льда.

5. Установлено, что прочность ледяных брусков-композитов из гранул льда выше по сравнению с брусками монолитной структуры при замораживании слоя воды на 32 – 38 %.

6. Применение гранулированного льда овально-сферической формы сокращает срок строительства ледовых переправ (с 21-го дня до 9-ти) и увеличивает период эксплуатации (до 4-х месяцев вместо 3-х).

Положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель адиабатического намораживания льда на сферической ледяной грануле как задача Стефана.

2. Математическая зависимость намораживания массы ледяных гранул в аппарате с циркуляционным кипящим слоем и зависимость максимальной эффективной производительности аппарата от температуры воздуха на входе $t_{вх}$ и диаметра частиц d .

3. Результаты экспериментального исследования процесса кристаллизации воды на сферических гранулах льда в адиабатических условиях и условиях кипящего слоя.

Достоверность полученных результатов подтверждается удовлетворительным согласованием расчетных и фактических значений показателей намораживания гранул льда.

Личный вклад автора в работы, выполненные в соавторстве и включенные в список литературы, состоит в постановке задач и их решении; обобщении результатов исследования и установлении закономерностей процесса льдообразования в кипящем слое; а также в осуществлении

экспериментов по намораживанию гранулированного льда в адиабатических условиях и в кипящем слое.

Апробация работы.

Основные положения и результаты исследований, приведенные в работе, доложены и обсуждены на: конференции молодых ученых «Проблемы рационального природопользования техногенного региона» (г. Кемерово, 2005); - 11-й всероссийской науч.-техн. конф. «Энергетика: экология, надежность, безопасность» (г. Томск, 2005); - обл. науч. практ. конф. «Исследовательская и инновационная деятельность учащейся молодежи: проблемы, поиски, решения» (г. Кемерово, 2006); - междунар. конф. «Теоретические аспекты использования сорбционных и хроматографических процессов в металлургии и химической технологии» (г. Екатеринбург, 2006); - всерос. конкурсе молодых учёных (г. Красноярск 2007); - науч.-практ. конф. «Тенденции и факторы развития агропромышленного комплекса Сибири» (г. Кемерово, 2006, 2010); всерос. заоч. конф. «Устойчивое развитие: вопросы управления проектами» (СПб, 2013).

Публикации. Результаты проведенных исследований опубликованы в 35 работах, в том числе в 3 статьях в изданиях, входящих в перечень рецензируемых журналов и изданий. Получено 2 патента РФ на изобретение, 4 патента на полезную модель.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, списка цитируемой литературы, содержащего 149 наименований, и 3-х приложений. Объем диссертации составляет 141 страниц основного текста и содержит 61 рисунок, 7 таблиц.

1 Современное состояние теории и практики намораживания льда

1.1 Физико-химические свойства воды

Вода – H_2O покрывает большую часть земной поверхности. Она имеет огромное значение в жизни растительного и животного мира. Так, в состав человеческого тела вода входит по весу больше чем наполовину. В атмосфере вода содержится в парообразном состоянии и при охлаждении осажается в виде тумана, облаков, дождя, росы, снега и града [6, 9].

Природная вода никогда не бывает химически чистой. В зависимости от происхождения она содержит различные растворенные, а иногда и суспендированные вещества. Морская вода содержит много солей. Дождевая вода содержит незначительные количества нитрата аммония, а наряду с ним часто и следы других солей. Грунтовые воды и воды источников содержат составные части пород, по которым они протекают. Чистая вода не имеет ни запаха, ни вкуса и бесцветна, однако в толстом слое она имеет голубоватый оттенок.

При достаточно сильном охлаждении вода замерзает – превращается в лед. Температура, при которой лед и вода образуют при нормальном давлении (101325 Па) устойчивую систему, принята за нулевую точку шкалы Цельсия. Температура 100 °С соответствует точке кипения воды при нормальном давлении [141].

Многие другие физические величины также отнесены к соответствующим величинам для воды. Так, за единицу массы первоначально принимали килограмм (1 кг) – массу одного кубического дециметра воды при 3,98 °С, т.е. при температуре ее наибольшей плотности. При комнатной температуре и даже при 0 °С вода обладает заметным давлением пара [74].

Эти и другие физико-химические константы воды и льда приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Физико-химические константы воды

Параметр	Значение
Температура, °С	
замерзания (101325 Па)	0,00
кипения (101325 Па)	100,00
максимальной плотности	3,98
Критические константы	
температура, °С	374,15
давление, МПа	22,143
плотность, кг/м ³	325
Теплота плавления при нормальных условиях, кДж/кг	332,4
Теплота сублимации льда, 0 °С, кДж/кг	2834
Удельная теплоемкость (101325 Па), кДж/(кг • К)	
льда (0 °С)	2,039
воды (15 °С)	4,187
водяного пара (100 °С)	2,039
C_p/C_v (15 °С)	1,32
Удельная теплопроводность, Вт/(м • К)	
льда (0 °С)	~ 2,34
воды (0 °С)	0,599
воды (45 °С)	0,637
пара (100 °С)	0,0231
Термодинамические величины	
теплоемкость (25 °С), Дж/моль	76,07
теплота образования ($-\Delta H$, газ, 101325 Па, 25 °С), кДж/моль	241,989
теплота плавления (101325 Па), кДж/моль	6,012
теплота испарения (101325 Па), кДж/моль	44,041
энтропия (S, газ, 101325 Па, 25 °С), кДж/(моль • К)	188,846
свободная энергия ($-\Delta S$, газ, 101325 Па), кДж/моль	228,750

Лед. Максимальная плотность воды при 3,98 °С обусловлена особенностями ассоциации молекул H₂O. Тамману в 1926 году удалось установить, что ассоциация молекул в жидкой воде частично близка к структуре обычного льда. Затем Эйкен в 1948 г показал, что ассоциация воды осуществляется в результате образования ди- и тетрамеров (очевидно, и три- и пента- меров), и кроме того, вблизи 0 °С образуются агрегаты из восьми молекул, показанные на рисунке 1.1, которые обладают «льдоподобной» структурой. Они занимают наибольший объем, и в основном с их образованием связана термическая аномалия воды [135].

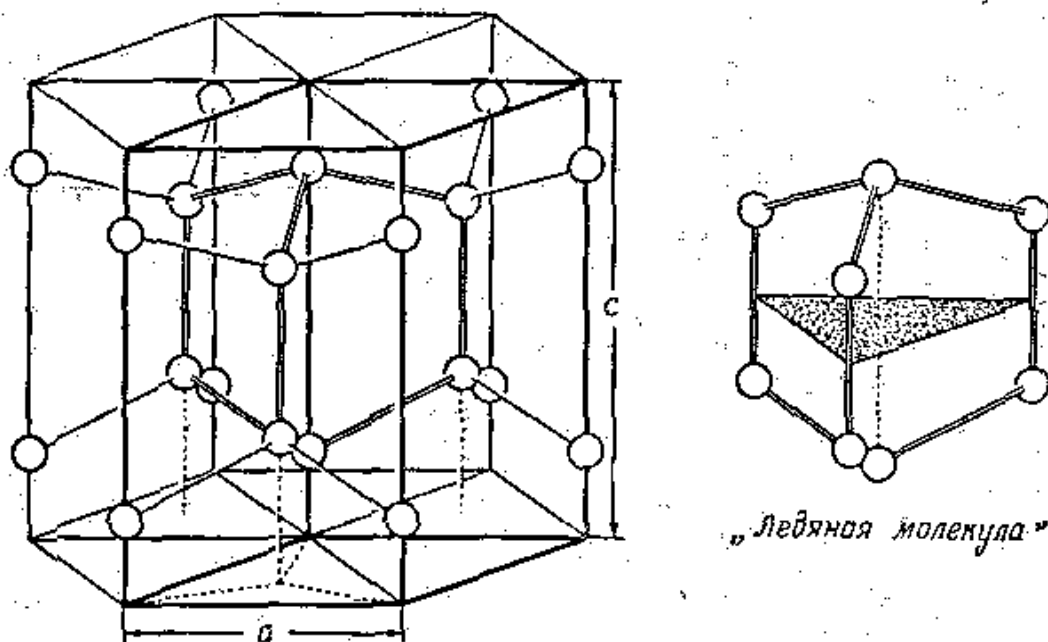
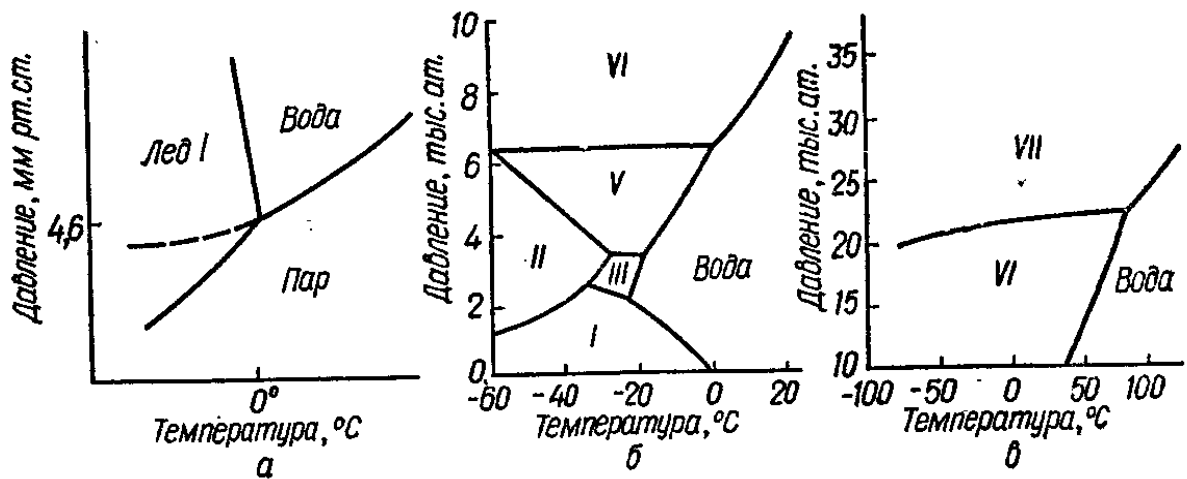


Рисунок 1.1 – Кристаллическая решетка льда и структура молекулы (H₂O)₈ («ледяной молекулы»); $a=4,5$, $c=7,3$ Å

Диаграмма состояния воды. На рисунке 1.2 приведена диаграмма состояния воды. Согласно правилу фаз Гиббса [85], для любой системы, находящейся в равновесии, имеет силу формула:

$$P + F = B + 2, \quad (1.1)$$

где P – число фаз; F – число степеней свободы; B – число компонентов системы.



а – при низком давлении; б – при высоком давлении;

в – при предельно высоком давлении

Рисунок 1.2 – Диаграмма состояния воды

Рассматриваемая система имеет только один компонент – H_2O , поэтому наибольшее число фаз, которые могут одновременно находиться в равновесии, равно 3. Число степеней свободы равно 0, поэтому нельзя менять ни давление, ни температуру, чтобы не исчезла ни одна из фаз. Например, лед I (обычный лед), жидкая вода и водяной пар могут существовать в равновесии одновременно только при одной температуре и при одном давлении, а именно при $p=4,58$ мм рт. ст. и $t=0,0075$ °С. Температура 0 °С соответствует равновесию воды со льдом при атмосферном давлении [57].

1.2 Формула Р.Планка

В холодильной технологии продолжительность намораживания льда определяют по методу Р. Планка [46, 69].

Приближенное время замораживания τ слоя льда толщиной Δr может быть определено по формуле:

$$\tau = \frac{q \rho \Delta R}{t_2} \left(\frac{k_R \Delta R}{\lambda} + k_p \alpha \right), \quad (1.2)$$

где q – количество теплоты, отводимой при получении 1 кг льда, кДж/кг;

ρ – плотность льда, кг/м³; ΔR – толщина слоя льда, м; t_r – температура воздуха, °С; k_R и k_P – коэффициенты, зависящие от размеров блока льда и условий замораживания; λ – коэффициент теплопроводности льда, Вт/(м • К); α – коэффициент теплоотдачи к воздуху, Вт/(м² • К).

Для плоскопараллельной пластины (плиты) с толщиной одного порядка R и с бесконечной протяженностью при одностороннем отводе теплоты $k_P=1$ и $k_R=0,5$, при двухстороннем отводе теплоты $k_P=0,5$ и $k_R=0,125$.

Количество теплоты, отводимой от 1 кг воды с начальной температурой $t_{ж}$ для получения льда со средней конечной температурой t , определяют по формуле [46]:

$$q = 4,19t_{ж} + 332,4 - 2,1t \quad (1.3)$$

Лед при замораживании охлаждают до температуры $-5\dots-4$ °С, при которой он будет храниться в льдохранилище.

Скорость замораживания воды зависит больше всего от толщины замораживаемого слоя ΔR , коэффициента теплоотдачи α к охлаждающей среде и температуры охлаждающей среды t_r . Роль коэффициента теплоотдачи наиболее заметна при малой толщине замораживаемого слоя. При малых значениях α относительное влияние ΔR уменьшается [52, 78].

1.3 Задача Стефана

В задаче Стефана рассматривается процесс распространения тепла в средах с изменяющимся фазовым состоянием и подвижной границей между фазами, например, задача о кристаллизации расплава; образовании слитка; о растворении пузырька газа в жидкости; и множество других важных задач науки, техники и производства [56].

Задача состоит в определении температуры твердой и жидкой фаз, а также в определении точного положения $x = y(\tau)$ границы раздела фаз. Как показал И. Стефан, подсчет теплового баланса приводит к условию, называемому условием Стефана [83]. Фазовый переход происходит на границе

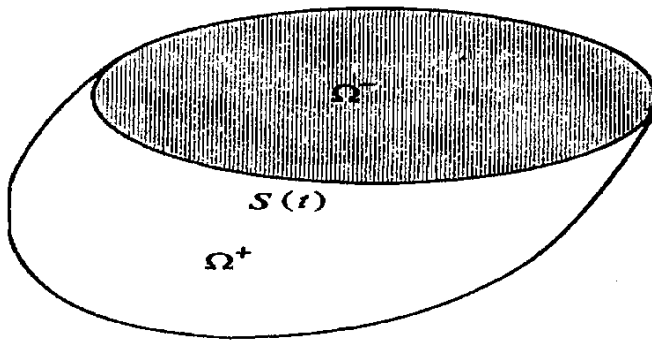


Рисунок 1.3 – Фазовые области

раздела фаз $S(\tau)$, причем он происходит при постоянной температуре t^* . Расчётная область Ω разделена на две подобласти [56]. Подобласть $\Omega^-(\tau)$, занята твердой фазой, температура которой ниже температуры фазового перехода $\Omega^-(\tau) = \{(x, y, z) | (x, y, z) \in \Omega, t(x, y, z, \tau) < t^*\}$. Соответственно, подобласть $\Omega^+(\tau)$, занята жидкой фазой $\Omega^+(\tau) = \{(x, y, z) | (x, y, z) \in \Omega, t(x, y, z, \tau) > t^*\}$ (рисунок 1.3).

Выпишем соответствующее уравнение теплопроводности. В твердой фазе имеем:

$$c^- \rho^- \frac{\partial t^-}{\partial \tau} = \text{div}(k^- \text{grad } t^-) + f^-, \quad (x, y, z) \in Q^-, \quad (1.4)$$

Учитывая конвективный перенос в жидкой фазе, получим:

$$c^+ \rho^+ \left(\frac{\partial t^+}{\partial \tau} + v \text{grad } t^+ \right) = \text{div}(k^+ \text{grad } t^+) + f^+, \quad (x, y, z) \in Q^+, \quad (1.5)$$

где $Q^+(\tau) = \{(x, y, z) | (x, y, z) \in \Omega^+, 0 < \tau < \tau_{\text{max}}\}$.

Нас интересуют условия на границе фазового перехода S . Прежде всего, на этой границе контакта двух сред справедливы предположения о непрерывности температуры, то есть:

$$[t] = 0, \quad (x, y, z) \in S. \quad (1.6)$$

Фазовый переход сопровождается выделением (поглощением) определенного количества тепла [45]. Поэтому тепловой поток на границе фазового перехода разрывен и определяется величиной:

$$\left[k \frac{\partial t}{\partial n} \right] = -\Delta H \cdot V_n, \quad (x, y, z) \in S. \quad (1.7)$$

где ΔH – энтальпия фазового перехода; V_n – скорость фазового перехода по нормали.

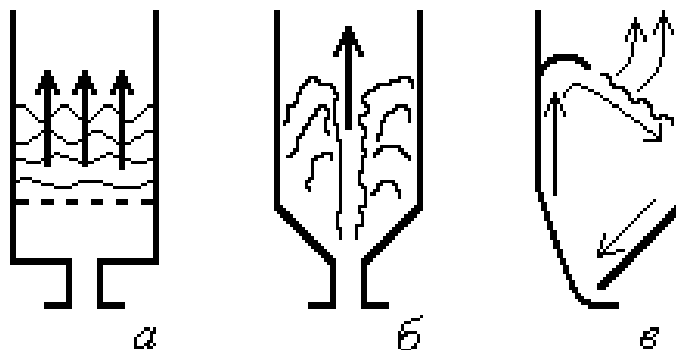
Сама граница фазового перехода S определяется на каждый момент времени следующим образом: $S = S(\tau) = \{(x, y, z,) \in \Omega, t(x, y, z, \tau) = t^*\}$ или, в другой форме, на границе фазового перехода выполнены условия первого рода:

$$t(x, y, z, \tau) = t^*, \quad (x, y, z,) \in S(\tau). \quad (1.8)$$

Условия (1.6), (1.7) и (1.8) есть условия Стефана, а соответствующая задача для уравнений (1.4), (1.5) называется задачей Стефана [80].

1.4 Организация кипящего слоя в промышленности

Разработаны многочисленные варианты аппаратов с псевдооживленным слоем, учитывающие специфические особенности взаимодействующих веществ [22, 72, 96]. Из многочисленных примеров реализации кипящего слоя выделяют три основных типа: плоский, фонтанирующий, тангенциальный (рисунок 1.4).



а – плоский кипящий слой; б – фонтанирующий;

в – тангенциальный

Рисунок 1.4 – Способы псевдооживления гранул веществ

На основе принципа тангенциального подвода газа была успешно разработана промышленная установка для дегидратации гипса, а также для грануляции KCl и $C_6H_5(SO_3)_2Na$ [79].

Теплоотдача в кипящем слое в первую очередь зависит от скорости

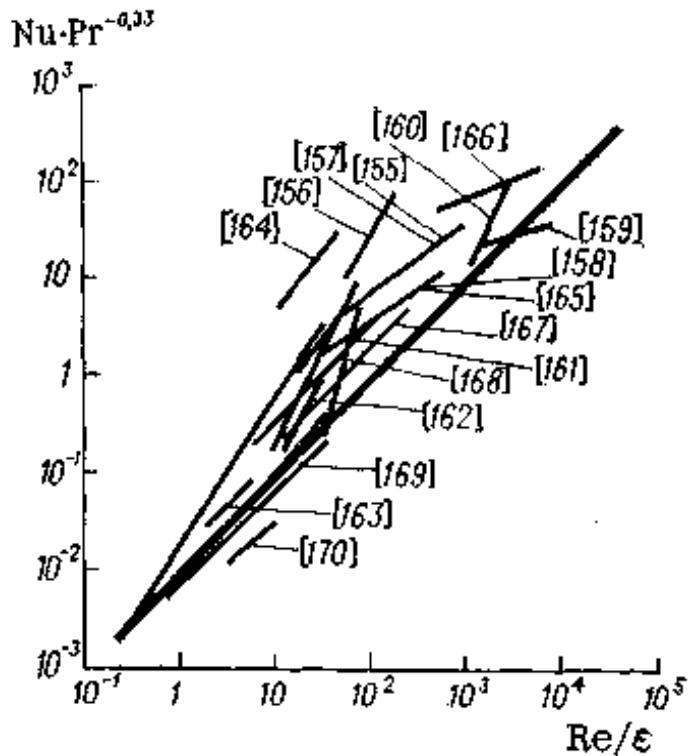


Рисунок 1.5 – Зависимость коэффициента межфазного теплообмена в кипящем слое

изменения Re/ϵ , достигающем пяти порядков [96]. Эта область состоит из двух частей. Для крупных частиц при $Re/\epsilon > 200$ используется корреляция:

$$Nu = 0,4(Re/\epsilon)^{2/3} \cdot Pr^{1/3}. \quad (1.9)$$

Для мелких же частиц при $Re/\epsilon < 200$, у которых критерий Нуссельта снижается в тысячу раз по сравнению с минимальным значением для одиночной частицы $Nu_{min}=2$ [16], коэффициент теплоотдачи является «эффективным». В этом случае используется более «крутая» корреляция (1.10).

В качестве возможных причин столь низких значений указывается на попадание частицы в тепловой след предыдущих микропрорывов газа:

$$Nu = 1,6 \cdot 10^{-2} (Re/\epsilon)^{1,3} \cdot Pr^{1/3}. \quad (1.10)$$

ожижающего агента.

Поэтому выделяют два основных режима: при $Re/\epsilon < 200$ и $Re/\epsilon > 200$ (О.Д. Тодес и др. авторы) [61].

Режим, когда $Re/\epsilon > 200$ характеризуется более

интенсивной теплопередачей, называют коэффициентом истинной теплопередачи.

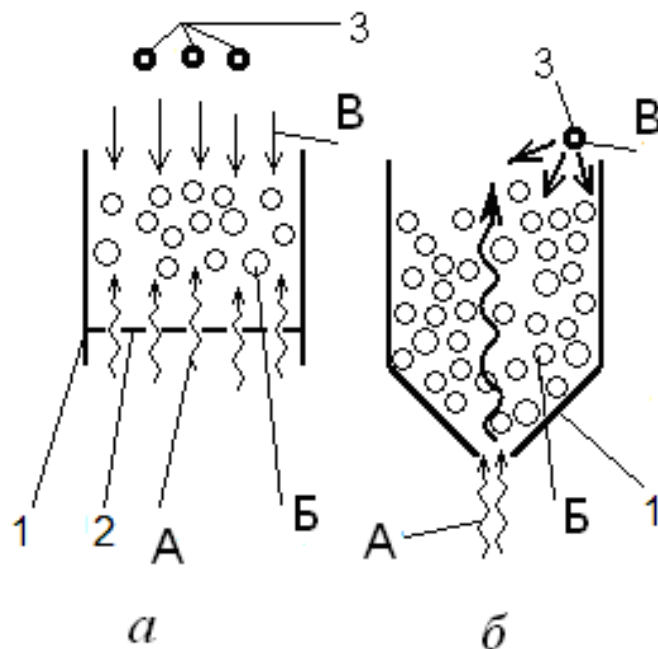
На рисунке 1.5 приведена экспериментальная зависимость $Nu \cdot Pr^{-0,33}$ от Re/ϵ в очень широком интервале

Поскольку точность данных корреляций составляет 100–200%, то для оценок можно ограничиться проведенной на том же рисунке 1.5 усредненной прямой [96] с уравнением:

$$Nu = 10^{-2}(Re/\varepsilon) Pr^{1/3} \quad (1.11)$$

1.5 Способы получения искусственного льда в кипящем слое

В настоящее время известно два способа намораживания гранулированного льда в кипящем слое. Намораживание в плоском кипящем слое (рисунок 1.6) было предложено к.т.н. Гончаровым С.Ю. (г. Кемерово).



а – в плоском кипящем слое; б – в фонтанирующем слое;

А – холодный воздух; Б – частицы льда (затравка); В – орошающая вода;
1 – камера кипящего слоя; 2 – газораспределительная решетка; 3 – форсунка

Рисунок 1.6 – Способы намораживания гранулированного льда в кипящем слое

В камеру 1 с решеткой 2 подают холодный воздух (А), который создает кипящий слой из затравочных частиц (Б), орошаемых водой (В), через форсунку 3. Замерзание воды на кристаллах затравки приводит к их росту с

образованием гранул льда, размер которых можно довести до 44...52 мм.

Быстрый рост гранул, являющийся достоинством данного процесса, возможен в узком диапазоне скоростей воздуха вследствие уноса мелочи (недостаток процесса).

Способ намораживания льда в фонтанирующем слое [58] разработан к.т.н. Роткиным В.М. (г. Астрахань). Данный способ отличается от предыдущего тем, что псевдоожижающий агент подается по центру рабочей камеры. В этом случае удастся оживать частицы с довольно значительным разбросом размеров, что безусловно положительно характеризует данный процесс. Вместе с тем производительность данного способа ниже, чем в плоском кипящем слое, так как контакт газа с гранулами происходит в довольно узком канале (недостаток).

1.6 Практическое использование льда

Охлаждающие смеси. В химии для получения низких температур используют сам лед или различные охлаждающие смеси с ним [37]. Лед вследствие высокой теплоты плавления (332,4 кДж/кг) является исключительно ценным охлаждающим средством. Предпосылкой хорошего охлаждения является тесный контакт охлаждаемой поверхности с охлаждающим средством, что достигается измельчением больших кусков льда в мельнице, ступке или в специальном мешочке. При работе с некоторыми водными растворами, где небольшое разбавление допустимо, очень быстрого охлаждения можно достигнуть, добавляя кусочки льда непосредственно в реакционную смесь [68]. Данным способом можно приготовить охлаждающие бани с температурой от -2 до -55 °С.

Ледовые катки. Как правило, площадь ледовых катков, где осуществляется массовое катание на коньках или проводятся состязания по керлингу, не превышает 1000 м^2 [14]. Но есть катки, например, г. Алма-Ата, каток Медео – площадь – несколько тыс. м^2 , объем льда 14 млн. м^3 .

Ледяные скульптуры. Художественные композиции, выполненные из льда природного или искусственного происхождения, являются очень популярными украшениями современных новогодних площадок. Скульптура высотой от 50 см и выше при комнатной температуре не теряет своей красоты и формы от 8 до 24 часов [4].

Охлаждение оборотных вод на теплоэлектростанциях. Эту задачу можно назвать рекордной по заготовке ледяной массы. Объем равен 1 млн. м³. Такое количество льда нужно, чтобы охладить теплую воду, которая нагревается во внутреннем и внешнем контуре теплоэлектростанции.

Решением подобной задачи занимается ВНИИГ им. Веденеева в Санкт-Петербурге. Предполагается, что данный объем льда можно получить в зимнее время путем послойного намораживания по принципу строительства ледовых переправ [133].

1.7 Ледовые переправы

Ледовые переправы в России. Особенностью основной части территории России является бездорожье в летнее время года. Но из-за устойчивых и продолжительных морозов зимой грузы здесь транспортируют по зимникам [51, 134], которые тянутся на сотни и тысячи километров (рисунок 1.7).



Рисунок 1.7 – Масштабы зимников на просторах России

Зимники пересекают собой многочисленные большие и малые речки, и на каждом пересечении приходится создавать ледовую переправу [41].

Строительство ледовых переправ в России освоено с 1890 года в силу способствующих зимних условий [62, 65].

По данным МЧС, зимой 2011-2012 в России действовало 442 ледовые переправы, из которых 148 не были санкционированы. Но если учесть, что только в Приморье насчитывается 29 тысяч рек и речушек, на которых организуются санкционированные и несанкционированные ледовые переправы, то действительное количество последних значительно превышает официальные данные.

На некоторых переправах в день проходит 1-2 транспорта, а на некоторых - сотни автомашин в сутки. Одна из таких переправ показана на рисунке 1.8.



Рисунок 1.8 – Типичный вид ледовой переправы

Грузоподъемность ледовых переправ. Толщина льда, несомненно, самый важный параметр ледовых переправ, он определяет грузоподъемность

и сезонную долговечность этих сооружений. Требуемую толщину льда $h_{тр}$ (см) для пропуска нагрузки определяют по формуле:

$$h_{тр} = a \cdot n \cdot P, \quad (1.10)$$

где: P – нагрузка, т; a – коэффициент, зависящий от распределения нагрузки (при колесной – $a = 11$, при гусеничной – $a = 9$); n – коэффициент, учитывающий интенсивность движения; $n=1,0$ при количестве машин за сутки менее 500 [31].

Во всех случаях толщина льда h должна быть не меньше $h_{тр}$ [25]. Длительные стоянки на льду не допускаются.

Возведения ледовых переправ. Сроки возведения ледовых переправ существенно зависят от погоды. Резкое и раннее наступление зимы способствует быстрому за 20-25 суток строительству переправы, как правило, в ноябре и начале декабря месяца. Медленный приход морозов растягивает срок строительства на месяцы, и порой ввод в действие переправы приходится на январь [65].



Рисунок 1.9 – Намораживание ледовой переправы при помощи водяной помпы

Строительство ледяной переправы включает в себя следующие работы; подготовку ледяной поверхности реки (очистку от снега, расчистку от торосов), определение толщины льда и глубины водоема, усиление ледяного покрова, устройство съездов [31]. Слабый ледяной покров можно элементарно усилить намораживанием воды, заливаемой при помощи водяных помп (рисунок 1.9).

Чтобы вода не растекалась за пределы переправы, её ограничивают жердями с хвостом и уплотненным снегом [92] (рисунок 1.10).

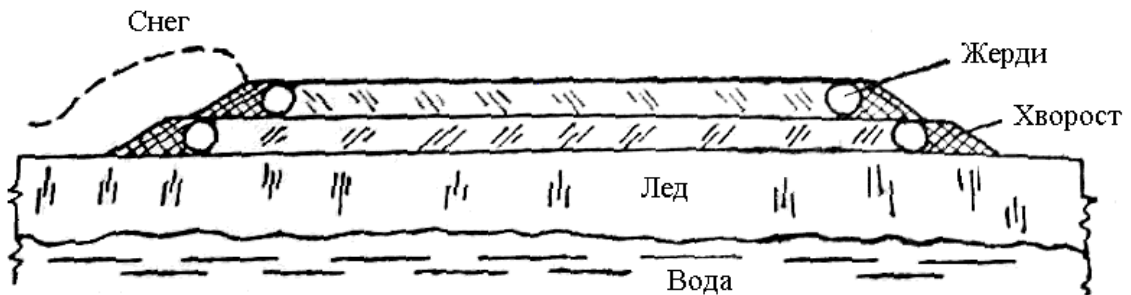


Рисунок 1.10 – Схема заливки ледовой переправы

Для придания ледовой переправе большей грузоподъемности на поверхность льда укладывают поперечный настил из бревен или бруса длиной 6...8 м, диаметром 18...20 см на расстоянии 0,5...0,7 м друг от друга [31]. Затем на этот настил сверху по длине переправы укладываются бревна диаметром 15...20 см или толстые доски длиной 6...8 м, называемые колесопроводами (рисунок 1.11).

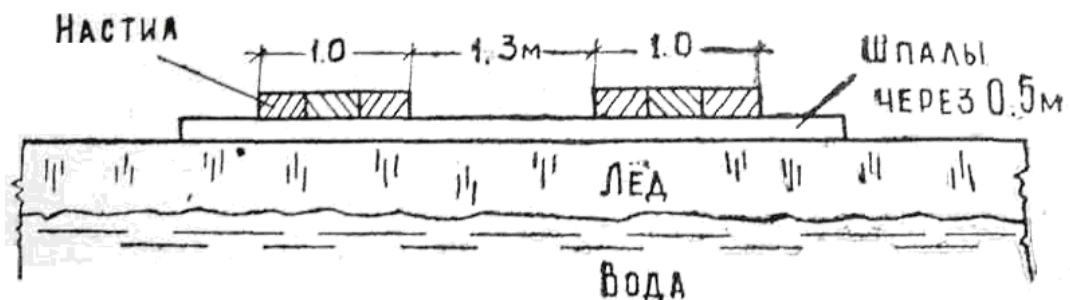


Рисунок 1.11 – Усиление деревянным настилом

Полосы дорог грузового и порожнякового движения устанавливают отдельно на расстоянии между ними 150 м. Скорость движения не должна превышать 15 км/час, причем расстояние между транспортными единицами должно быть не менее 35...40 м. Длительные стоянки на льду не допускаются [31].

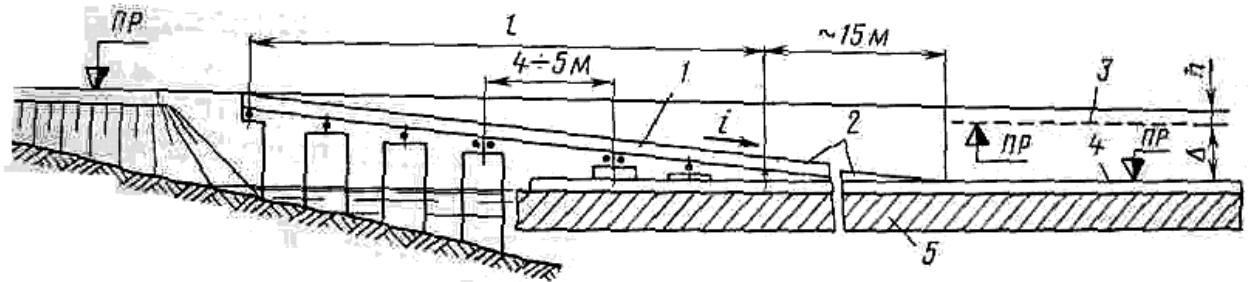


Рисунок 1.12 – Устройство свайного съезда к переправе

Для обеспечения условий движения транспорта в местах перехода со льда на берег и обратно устраивают съезды в виде лежневого настила или сооружения на клетках и сваях [51] (рисунок 1.12).

1.8 Выводы по разделу 1

1. Многочисленные примеры использования водного льда с объемом потребления от нескольких тонн до десятков тысяч тонн (ледовые переправы) характеризуют актуальность исследования процесса его получения. В химической технологии применение льда представлено процессами охлаждения реакторов.

2. Оценка скорости получения льда в технике сводится к полуэмпирическим зависимостям таким как, например, формула Р. Планка. В условиях глобального производства данные зависимости существенно помогают расчетной практике.

3. В тоже время достаточно хорошо изучен круг природных и промышленных процессов с подвижной границей раздела фаз (горение, промерзание грунта, набухание), соответствующий классу нелинейных задач

со свободной границей, именуемый задачей Стефана. В связи с этим, постановка математической модели намораживания воды на грануле льда в условиях задачи Стефана является обоснованным решением данной проблемы.

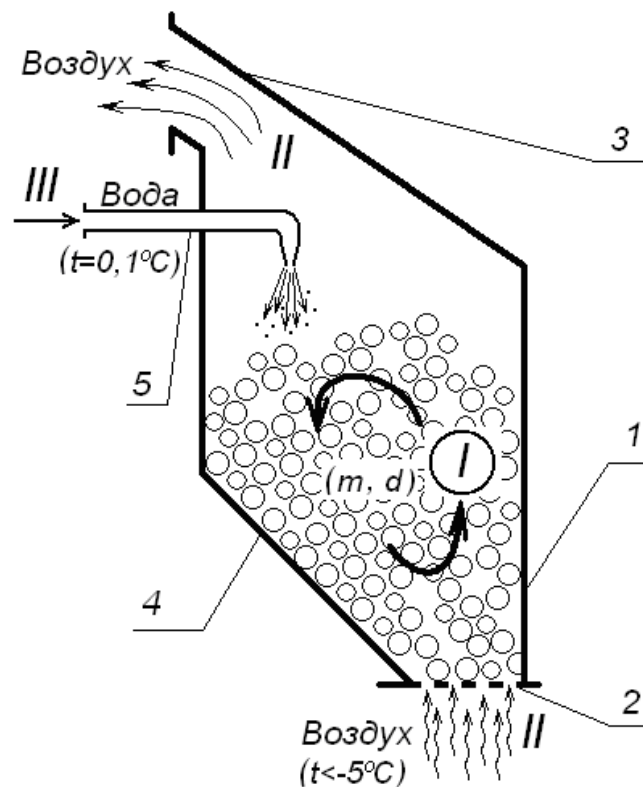
4. Кипящий слой широко используется благодаря своим многочисленным достоинствам – интенсивность кинетики процесса, высокая производительность, простота аппаратуры и т.д. Однако в настоящее время в научной литературе упоминается лишь один пример исследований подобной системы для получения гранулированного льда в фонтанирующем слое к.т.н. Роткина В.М. (Астраханский институт рыбной промышленности).

Изучение данного процесса при различных разновидностях псевдооживленного слоя и установление скорости намораживания льда определяют направления исследований в данной работе.

5. Широкое распространение ледовых переправ в России свидетельствует об эффективности данных сооружений, продление срока эксплуатации которых представляет большой практический интерес.

2 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГРАНУЛИРОВАНИЯ ЛЬДА В АППАРАТЕ С ЦИРКУЛЯЦИОННЫМ КИПЯЩИМ СЛОЕМ

При псевдооживлении холодным воздухом с температурой $t_{\text{в}} < -5$ °С ледяных частиц, имеющих приближенную к сферической форму и диаметр от 7 до 45 мм, в камере 1, содержащей скат 4, образуется циркуляционный слой из ледяных гранул [118] (рисунок 2.1).



- I – твердая фаза (гранулы льда); II – газовая фаза (холодный воздух);
 III – жидкая фаза (холодная вода); 1 – рабочая камера;
 2 – газораспределительная решетка; 3 – выхлопное окно;
 4 – скат, 5 – форсунка

Рисунок 2.1 – Схема получения гранулированного льда в кипящем циркуляционном слое

При орошении данного слоя холодной водой, температура которой равна $t_{\text{ж}} = 0,1 \dots 2,0$ °С, в зависимости от температуры воздуха на входе в рабочую

камеру возможно установить стабильное намораживание воды на поверхности твердых частиц.

Течение этого процесса зависит от состояния взаимодействующих фаз: твердой (Т), газообразной (Г) и жидкой (Ж) [1], характеризуемое:

- формой, размером и фракционным составом зернистой массы;
- температурой воздуха на входе и выходе из слоя гранул;
- степенью орошения и расходом воды.

Также на ход процесса влияют особенности процессов фазовых взаимодействий (охлаждение – Г : Т, смачивание – Ж : Т, кристаллизация (фазовый переход) – Ж : Т, нагрев – Т : Г) и их количественное выражение, определяемое соответствующим периодом времени.

Изменение конструкции аппарата влечет изменения отдельных режимов взаимодействия фаз и всего процесса в целом. Определение причины данного явления и его количественная оценка являются целью данного исследования.

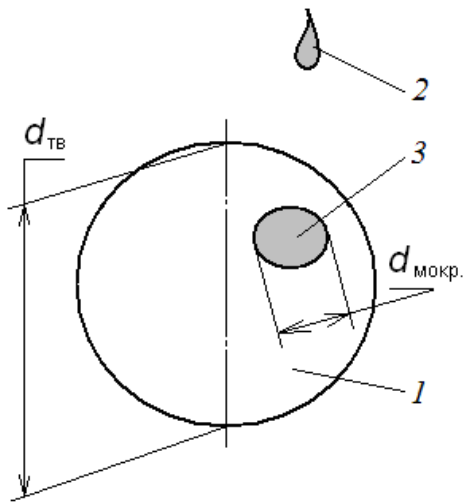
2.1 Основные особенности намораживания льда в кипящем слое

Величина смоченной поверхности. Моделирование процесса намораживания льда на поверхности гранул в кипящем слое осложнено многими причинами, из которых наиболее неопределенным фактором является акт взаимодействия факела капель воды и циркулирующего по замкнутому контуру потока гранул [131].

Разброс капель воды по размеру в факеле не дает возможности предсказать величину пятна контакта $d_{\text{мокр}}$ (рисунок 2.2), и, следовательно, площади смачивания гранул в силу стохастичности процесса. Отсюда оценку взаимодействия ансамбля капель с ансамблем гранул можно произвести лишь статистически, в данном случае по приближенной доле смоченной поверхности гранул:

$$\psi = S_{\text{ТВ}} / S_{\text{мокр}} \quad (1.1)$$

где ψ – доля смоченной поверхности; $S_{\text{ТВ}}$ – площадь гранул, м^2 ; $S_{\text{мокр}}$ – площадь смоченной поверхности, м^2 .



1 – гранула; 2 – капля воды; 3 – пятно контакта (смоченная поверхность);
 $d_{ТВ}$ – диаметр гранулы; $d_{мокр}$ – диаметр смоченной поверхности

Рисунок 2.2 – Соотношение размеров пятна контакта воды и гранулы льда

Данный параметр изменяется в пределах $0 \div 1$, причем последнее значение соответствует точке проскока капля водяного факела, поскольку площадь смачивания поверхности гранул достигает предельного значения.

Величина двусторонней кристаллизации водной пленки. Получения льда в кипящем слое заключается в процессе кристаллизации водной пленки на гранулах при их орошении.

Не зависимо от того, какова доля смоченной поверхности гранул, кристаллизация пленки воды на гранулах происходит с двух сторон. Сверху за счет холодильного агента, т.е. за счет конвекции, а снизу за счет холода самой гранулы, т.е. адиабатически (рисунок 2.3). Вклад конвективной и адиабатной кристаллизации водной пленки на гранулах в кипящем слое суммарно составляет 100 процентов, (рисунок 2.4,а). Соотношение толщины слоев внутренней и наружной кристаллизации водной пленки зависит от режима орошения (рисунок 2.4, б, в).

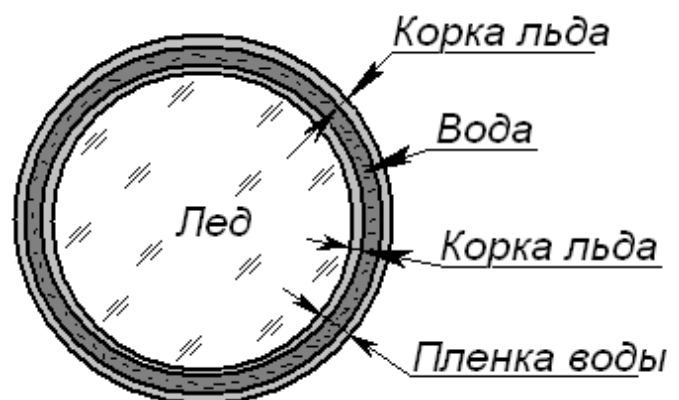
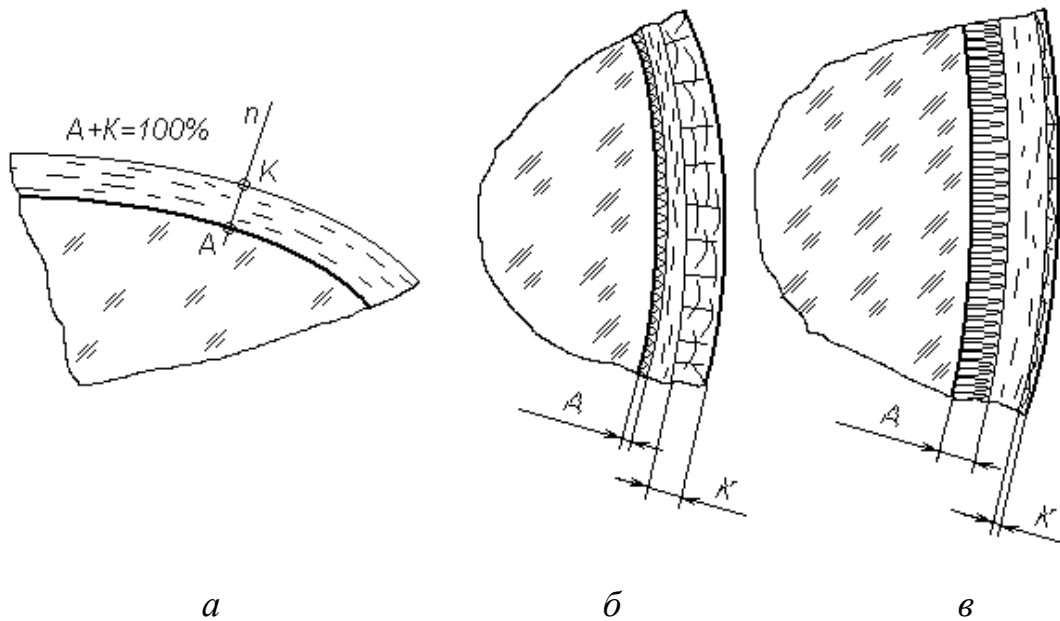


Рисунок 2.3 – Структура водной пленки на поверхности гранулы льда



а – общее соотношение; б – преобладающая кристаллизация за счет конвекции; в – кристаллизация за счет внутреннего холода

Рисунок 2.4 – Кристаллизация водной пленки на грануле в кипящем слое

Известно, что скорость кристаллизации сильно зависит от величины переохлаждения расплава, а также от числа зародышей новой фазы [17]. Также известно, что коэффициент теплопередачи при фазовом переходе на твердой поверхности на два или даже три порядка выше, чем при обтекании этой поверхности газом [61].

Следовательно, заключаем, что в основе процесса кристаллизации лежит явление адиабатно-конвективного замораживания с преобладанием кристаллизации за счет внутреннего холода гранул. Главной причиной этого явления является наличие центров кристаллизации в глобальном масштабе.

2.2 Математическая модель адиабатического намораживания воды на грануле льда как задача Стефана

Постановка математической модели – задача Стефана. Гранула льда сферической формы и начальным радиусом R_0 с температурой $t_0 = const < 0$

помещается в емкость с водой, температура которой близка к $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рисунок 2.5).

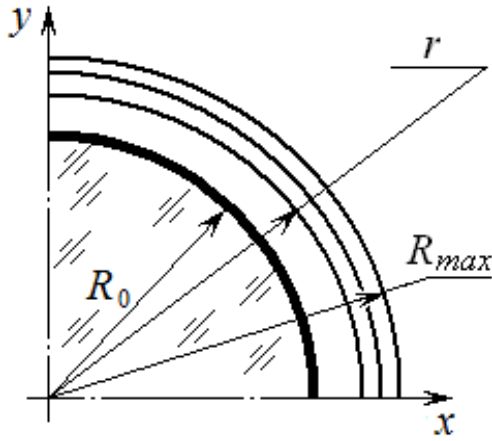


Рисунок 2.5 – Схема увеличения радиуса гранулы во времени

Принимая $t(R, \tau)$ за функцию изменения температурного поля в грануле, начальные условия запишем в виде [103]:

$$t(R,0) = \begin{cases} t_0, & \text{если } |R| \leq R_0, \\ 0, & \text{если } |R| > R_0. \end{cases} \quad (2.2)$$

Рассмотрим намораживание льда за промежуток времени $\Delta\tau$:

$$t(R, \tau) = \begin{cases} t(R, \tau), & |R| = R \leq R(\tau) - \text{лед}, \\ t(R, \tau), & |R| > R(\tau) - \text{вода}. \end{cases} \quad (2.3)$$

Всегда должно выполняться уравнение теплового баланса:

$$\int_R^{R+\Delta R} c \rho (t(R, \tau + \Delta\tau) - t(R, \tau)) 4\pi R^2 dR = \int_{\tau}^{\tau+\Delta\tau} 4\pi R^2 \lambda t_R(R, \tau) \Big|_R^{R+\Delta R} d\tau. \quad (2.4)$$

где c – теплоемкость льда, Дж/(кг · К); ρ – плотность льда, кг/м³;

$Q = -\lambda \cdot \nabla t = -\lambda \cdot t_R$ – поток тепла по закону Фурье [52].

Сделаем замену:

$$V(R, \tau) = R t(R, \tau) \Rightarrow t(R, \tau) = \frac{V(R, \tau)}{R}, \quad (2.5)$$

тогда

$$V_R = t(R, \tau) + R \cdot t_R(R, \tau) \Rightarrow t_R(R, \tau) = \frac{V_R - t(R, \tau)}{R} = \frac{V_R}{R} - \frac{V(R, \tau)}{R^2}. \quad (2.6)$$

Уравнение теплового баланса (2.4) перепишем в следующем виде:

$$\int_R^{R+\Delta R} c \rho R (V(R, \tau + \Delta\tau) - V(R, \tau)) dR = \int_{\tau}^{\tau+\Delta\tau} \lambda R^2 \left(\frac{V_R}{R} - \frac{V}{R^2} \right) \Big|_R^{R+\Delta R} d\tau = \int_{\tau}^{\tau+\Delta\tau} \lambda (V_R R - V) \Big|_R^{R+\Delta R} d\tau. \quad (2.7)$$

Из последнего вытекает, что:

$$\int_R^{R+\Delta R} c \rho \int_{\tau}^{\tau+\Delta\tau} V_{R\tau}(R, \tau) d\tau dR = \lambda \int_{\tau}^{\tau+\Delta\tau} \int_R^{R+\Delta R} V_{R\tau} dR d\tau.$$

Тогда:

$$\int_R^{R+\Delta R} \int_\tau^{\tau+\Delta\tau} [c \rho V_\tau(R, \tau) - \lambda V_{R\tau}] d\tau dR = 0. \quad (2.8)$$

Следовательно, подынтегральное выражение равно 0. Таким образом, приходим к следующему уравнению [83]:

$$V_\tau = \frac{\lambda}{c \rho} V_{R\tau}, \quad 0 \leq R < R(\tau), \quad \tau > 0. \quad (2.9)$$

Уравнение (2.9) описывает закон, по которому меняется температура внутри гранулы льда.

Уравнение теплового баланса процесса на границе раздела фаз $|R| = R(\tau)$:

$$\begin{cases} Q(\tau) = \int_0^{R(\tau)} \frac{4}{3} \pi \rho c R V(R, \tau) dR, \\ Q(\tau + \Delta\tau) = \int_0^{R(\tau + \Delta\tau)} \frac{4}{3} \pi \rho c R V(R, \tau + \Delta\tau) dR. \end{cases} \quad (2.10)$$

где $\Delta Q = Q(\tau + \Delta\tau) - Q(\tau)$ - тепло, которое выделяется в процессе кристаллизации воды, то есть:

$$\Delta Q = 4\pi \rho_1 c \left(\int_0^{R(\tau + \Delta\tau)} R V(R, \tau + \Delta\tau) dR - \int_0^{R(\tau)} R V(R, \tau) dR \right) = \frac{4}{3} q \pi \rho_2 (R^3(\tau + \Delta\tau) - R^3(\tau)), \quad (2.11)$$

или

$$R^3(\tau + \Delta\tau) - R^3(\tau) = \frac{3\rho_1 c}{q\rho_2} \left(\int_0^{R(\tau + \Delta\tau)} R V(R, \tau + \Delta\tau) dR - \int_0^{R(\tau)} R V(R, \tau) dR \right). \quad (2.12)$$

Из выражения:

$$\int_0^{R(\tau + \Delta\tau)} R V(R, \tau + \Delta\tau) dR - \int_0^{R(\tau)} R V(R, \tau) dR = \int_0^{R(\tau + \Delta\tau)} R V(R, \tau + \Delta\tau) dR + \int_0^{R(\tau)} [V(R, \tau + \Delta\tau) - V(R, \tau)] R dR, \quad (2.13)$$

получаем:

$$R^3(\tau + \Delta\tau) - R^3(\tau) = \frac{3\rho c}{q\rho_{жс}} \left(\int_0^{R(\tau + \Delta\tau)} R V(R, \tau + \Delta\tau) dR + \int_0^{R(\tau)} [V(R, \tau + \Delta\tau) - V(R, \tau)] R dR \right). \quad (2.14)$$

Представим V_τ из (2.9) в виде $V_\tau = aV_{R\tau}$, $a = \frac{\lambda}{c\rho}$, подставим в последнее

выражение:

$$R^3(t + \Delta t) - R^3(t) = \frac{3\rho c}{q\rho_{жс}} \left(V(R(\tau), \tau)R(\tau) + \int_0^{R(\tau)} aV_{R\tau} R dR \right) \Delta \tau. \quad (2.15)$$

$$\begin{aligned} RV_{R\tau} &= (RV_R)_R - V_R = \frac{\partial}{\partial R} (RV_R - V) \Rightarrow \\ \Rightarrow \int_0^{R(\tau)} a(RV_R - V)_R dR &= a(RV_R - V)|_0^R = a(RV_R|_{R=R(\tau)} - V|_{R=R(\tau)}) \end{aligned} \quad (2.16)$$

На границе раздела фаз выполнено условие $V|_{R=R(\tau)} = 0$, поэтому:

$$\int_0^{R(t)} a(RV_R - V)_R dR = aRV_R|_{R=R(\tau)},$$

ИЛИ

$$R^3(\tau + \Delta \tau) - R^3(\tau) = \frac{3\rho c}{q\rho_{жс}} aRV_R|_{R=R(\tau)} \Delta \tau. \quad (2.17)$$

Разделим на $\Delta \tau$, и $\Delta \tau \rightarrow 0$, тогда:

$$\begin{aligned} 3R^2(\tau) \frac{dR}{d\tau} &= \frac{3\rho c}{q\rho_{жс}} aRV_R|_{R=R(\tau)}, \\ \frac{dR}{d\tau} \Big|_{R=R(\tau)} &= \frac{\rho c}{q\rho_{жс}} \frac{1}{R} aV_R|_{R=R(\tau)}, \end{aligned}$$

но $a = \frac{\lambda}{c\rho}$, следовательно:

$$\frac{dR}{d\tau} \Big|_{R=R(\tau)} = \frac{\lambda}{q\rho_{жс}} \frac{1}{R} aV_R|_{R=R(\tau)}, \quad \tau > 0. \quad (2.18)$$

Уравнение (2.18) связывает скорость движения свободной границы и поток тепла через границу [109].

Таким образом, мы пришли к следующей краевой задаче в виде системы уравнений (2.19):

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{\tau} = \frac{\lambda}{c\rho} V_{R\tau}, \quad 0 \leq R < R(\tau), \quad \tau > 0, \\ R|_{\tau=0} = R_0, \\ V|_{\tau=0} = \begin{cases} t_0, & 0 \leq R \leq R_0, \\ 0, & R > R_0, \end{cases} \\ V|_{R=R(\tau)} = 0, \quad \tau > 0, \\ V|_{R>R(\tau)} = 0, \quad \tau > 0, \\ \left. \frac{dR}{d\tau} \right|_{R=R(\tau)} = \frac{\lambda}{q\rho_{жс}} \frac{1}{R} V_R|_{R=R(\tau)}, \quad \tau > 0. \end{array} \right. \quad (2.19)$$

Переход к новым переменным. Два физических явления называют подобными, если величины, характеризующие одно явление, могут быть получены из соответствующих величин другого простым умножением на одинаковые во всех «точках» множители, называемые коэффициентами подобия. Если в дифференциальных уравнениях, граничных и начальных условиях перейти от обычных размерных переменных к безразмерным, которые могут быть получены путем отнесения размерных величин к их масштабам, то как сами теперь уже безразмерные дифференциальные уравнения, так и соответствующие им безразмерные граничные и начальные условия станут одинаковыми для обоих сравниваемых явлений [80].

Уравнение теплопроводности:

$$U_{tt} = a^2 U_{xx} \quad (2.20)$$

Уравнение (2.20) остается неизменным при преобразовании переменных $x' = kx$, $t' = k^2 t$, то есть, если масштаб длины меняют в k раз, то масштаб времени следует изменить в k^2 раз. Будем искать решение уравнения теплопроводности (2.20) с начальным условием:

$$U(x,0) = \begin{cases} U_0, & \text{при } x > 0 \\ 0, & \text{при } x < 0 \end{cases}. \quad (2.21)$$

При указанном выше изменении масштабов начальное условие (2.21) остается также без изменения, поэтому для функции $U(x,t)$ должно иметь место равенство:

$$U(x,t) = U(kx, k^2t),$$

при любых значениях x, t, k .

Полагая $k = \frac{1}{2\sqrt{t}}$, получим:

$$U(x,t) = U\left(\frac{x}{2\sqrt{t}}, \frac{1}{4}\right) = U_0 f\left(\frac{x}{2\sqrt{t}}\right). \quad (2.22)$$

Таким образом, U зависит только от аргумента $z = \frac{x}{2\sqrt{t}}$. Вычисляя

производные для U и учитывая (2.21), получим:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} &= U_0 \frac{\partial^2 f}{\partial z^2} \frac{1}{4t}, \\ \frac{\partial U}{\partial t} &= -\frac{xU_0}{4t^{3/2}} \frac{\partial f}{\partial z} = -U_0 \frac{z}{2t} \frac{\partial f}{\partial z}. \end{aligned}$$

Подставляя в уравнение теплопроводности (2.20) и сокращая на множитель $\frac{U_0}{4t}$, получаем:

$$a^2 \frac{d^2 f}{dz^2} = -2z \frac{df}{dz} \quad (2.23)$$

при дополнительных условиях

$$f(-\infty) = 0, \quad f(\infty) = 1, \quad (2.24)$$

соответствующих начальному условию для функции U . Интегрируя уравнение (2.23), получим:

$$\begin{aligned} a^2 \frac{f''}{f'} &= -2z, \quad f' = C \exp^{-\frac{z^2}{a^2}}, \\ f &= C \int_{-\infty}^z \exp^{-\frac{\xi^2}{a^2}} d\xi = C_1 \int_{-\infty}^z \exp^{-\xi^2} d\xi. \end{aligned} \quad (2.25)$$

Здесь нижний предел выбран так, чтобы выполнялось первое условие (2.24). Чтобы удовлетворить второму условию (2.24), следует положить:

$$C_1 = \frac{1}{\sqrt{\pi}}.$$

Таким образом:

$$U(x,t) = \frac{U_0}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{x}{2\sqrt{a^2t}}} \exp^{-\xi^2} d\xi = \frac{U_0}{2} \left(1 + \Phi \left(\frac{x}{2\sqrt{a^2t}} \right) \right), \quad (2.26)$$

где $\Phi(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z \exp^{-\xi^2} d\xi$ интеграл ошибок. Если начальное значение имеет вид:

$$U(x,0) = \begin{cases} U_0, & \text{при } x > \bar{x} \\ 0, & \text{при } x < \bar{x} \end{cases}, \quad (2.27)$$

то:

$$U(x,t) = \frac{U_0}{2} \left(1 + \Phi \left(\frac{x - \bar{x}}{2\sqrt{a^2t}} \right) \right). \quad (2.28)$$

Задача о фазовом переходе на поверхности гранулы. Преобразуем переменные следующим образом [83]:

$$\begin{aligned} \tilde{r} &= \frac{r}{R_0}, \\ \tilde{t} &= \frac{t}{A}, \text{ где } A = \frac{-qR_0\rho_2}{kU_0}, \\ \tilde{V} &= -\frac{V}{U_0}, \end{aligned} \quad (2.29)$$

тогда новые переменные изменяются в пределах:

$$0 \leq \tilde{r} < R_1(\tilde{t}), \quad \tilde{t} > 0, \text{ где } R_1(\tilde{t}) = \frac{R(t)}{R_0}.$$

Производные переписутся в следующем виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} &= \frac{\partial \tilde{V}}{\partial \tilde{t}} \frac{1}{A} (-U_0), & \frac{\partial^2 V}{\partial r^2} &= -U_0 \frac{\partial^2 \tilde{V}}{\partial \tilde{r}^2} \frac{1}{R_0^2}, \\ \frac{\partial V}{\partial r} &= -U_0 \frac{\partial \tilde{V}}{\partial \tilde{r}} \frac{1}{R_0}, & \frac{\partial \tilde{V}}{\partial \tilde{t}} &= D \frac{\partial^2 \tilde{V}}{\partial \tilde{r}^2} \end{aligned} \quad (2.30)$$

где:

$$D = \frac{k}{c\rho_1} \frac{A}{R_0^2} = \frac{k}{c\rho_1} \left(\frac{-q\rho_2}{kU_0R_0} \right) = -\frac{q\rho_2}{c\rho_1U_0R_0}.$$

Аналогично обезразмериваются начальные и граничные условия:

$$\begin{aligned} R_1|_{\tilde{r}=0} &= 1, \\ \tilde{V}|_{\tilde{r}=0} &= \begin{cases} -R_0\tilde{r}, & 0 \leq \tilde{r} \leq 1, \\ 0, & \tilde{r} > 1 \end{cases} \end{aligned} \quad (2.31)$$

$$\begin{aligned} \tilde{V}|_{\tilde{r}=R_1(\tilde{t})} &= 0, \\ \tilde{V}|_{\tilde{r}>R_1(\tilde{t})} &= 0, \end{aligned} \quad (2.32)$$

$$\begin{aligned} \frac{R(t)}{R_0} &= R_1(\tilde{t}), \Rightarrow R(A\tilde{t}) = R_0 R_1(\tilde{t}) \\ R_0 \frac{dR_1(\tilde{t})}{d\tilde{t}} &= \frac{dR}{dt}|_{t=A\tilde{t}} \quad A = \frac{-U_0 k}{q\rho_2} \frac{A}{R_1(\tilde{t})} \tilde{V}|_{\tilde{r}=R_1(\tilde{t})}, \\ \frac{dR_1(\tilde{t})}{d\tilde{t}} &= \frac{-U_0 k A}{q\rho_2 R_1(\tilde{t}) R_0} \tilde{V}|_{\tilde{r}=R_1(\tilde{t})}. \end{aligned} \quad (2.33)$$

ИЛИ

$$\frac{dR_1(\tilde{t})}{d\tilde{t}} = \frac{1}{R_1(\tilde{t})} \tilde{V}|_{\tilde{r}=R_1(\tilde{t})}. \quad (2.34)$$

В итоге приходим к следующей задаче:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial \tilde{V}}{\partial \tilde{t}} &= D \frac{\partial^2 \tilde{V}}{\partial \tilde{r}^2}, \quad 0 \leq \tilde{r} \leq R_1, \quad \tilde{t} > 0, \\ R_1|_{\tilde{r}=0} &= 1, \\ \tilde{V}|_{\tilde{r}=0} &= \begin{cases} -R_0\tilde{r}, & 0 \leq \tilde{r} \leq 1, \\ 0, & \tilde{r} > 1 \end{cases} \\ \tilde{V}|_{\tilde{r}=R_1(\tilde{t})} &= 0, \quad \tilde{t} > 0, \\ \tilde{V}|_{\tilde{r}>R_1(\tilde{t})} &= 0, \quad \tilde{t} > 0, \\ \frac{dR_1(\tilde{t})}{d\tilde{t}} &= \frac{1}{R_1(\tilde{t})} \tilde{V}|_{\tilde{r}=R_1(\tilde{t})}, \quad \tilde{t} > 0. \end{aligned} \right. \quad (2.35)$$

Обозначим $\tilde{r} = r$, $\tilde{t} = t$, $\tilde{V} = V$, $R_1(t) = R(t)$, тогда система (2.35)

преобразуется в систему уравнений (2.36)

$$\begin{cases} \frac{\partial V}{\partial t} = D \frac{\partial^2 V}{\partial r^2}, & 0 \leq r \leq R(t), \quad t > 0, \\ R(t)|_{t=0} = 1, \\ V|_{t=0} = \begin{cases} -R_0 r, & 0 \leq r \leq 1, \\ 0, & r > 1 \end{cases} \\ V|_{r=R(t)} = 0, \quad t > 0, \\ V|_{r>R(t)} = 0, \quad t > 0, \\ \frac{dR(t)}{dt} = \frac{1}{R(t)} V_r|_{r=R(t)}, \quad t > 0. \end{cases} \quad (2.36)$$

Первое выражение в системе (2.36) отражает зависимость температурного поля от радиуса гранулы, а последнее – зависимость скорости движения границы от температурного поля. Задача является нелинейной и ее решение можно найти численным методом.

2.3 Максимальный радиус гранулы

В результате погружения гранулы в воду можно определить её максимальный радиус из общего баланса тепла при условии, что весь лёд нагрелся до температуры равной 0°C , а температура воды при этом осталась прежней, т.е. 0°C

$$t(R, \tau) = \begin{cases} 0, & \text{если } |R| \leq R_0 - \text{лед}, \\ 0, & \text{если } |R| > R_0 - \text{вода}. \end{cases} \quad (2.37)$$

Выпишем уравнение теплового баланса:

$$\Delta Q = t_0 \rho c \frac{4}{3} \pi R_0^3 = q \rho \frac{4}{3} \pi ((R_0 + \Delta R)^3 - R_0^3), \quad (2.38)$$

где ρ – плотность льда, $\text{кг}/\text{м}^3$; q – удельная теплота плавления (кристаллизации) льда, $\text{кДж}/\text{кг}$.

Уравнение (2.38) означает, что тепло затраченное на нагрев льда, равно теплу, потраченному на намораживание слоя льда равного ΔR .

Это уравнение равносильно следующему:

$$t_0 c \rho R_0^3 = r \rho_{\text{ж}} (R_0 + \Delta R)^3 - q R_0^3. \quad (2.39)$$

Из которого вытекает:

$$R_0^3 (t_0 \rho c + q \rho_{ж}) = q \rho_{ж} (R_0 + \Delta R)^3. \quad (2.40)$$

Из последнего выразим $(R_0 + \Delta R)$:

$$(R_0 + \Delta R)^3 = R_0^3 \left(\frac{t_0 \rho c}{q \rho_{ж}} + 1 \right).$$

Следовательно:

$$R_0 + \Delta R = R_0 \left(\frac{t_0 \rho c}{q \rho_{ж}} + 1 \right)^{1/3}.$$

Таким образом, максимальный радиус гранулы равен:

$$R_{\max} = R_0 + \Delta R = R_0 \left(\frac{t_0 \rho c}{q \rho_{ж}} + 1 \right)^{1/3}. \quad (2.41)$$

2.4 Численное решение математической модели намораживания льда на грануле за счет внутреннего холода

Вывод зависимости изменения объема гранулы. В настоящее время практически наиболее ценным методом приближенного решения уравнений теплопроводности является метод конечных разностей, или, как его еще называют, метод сеток [84]. Он основан на замене производных их приближенным значением, выраженным через разности значений функции в отдельных дискретных точках – узлах сетки. Дифференциальное уравнение в результате таких преобразований заменяется эквивалентным соотношением в конечных разностях, решение которого сводится к выполнению несложных алгебраических операций. Окончательный результат решения дается выражением, по которому значение «будущего» потенциала (температуры) в данной точке (узле) является функцией времени, ее «настоящего» потенциала и «настоящего» потенциала смежных узловых точек. Повторяемость одинаковых операций при расчете полей температуры создает большие удобства для применения современной вычислительной техники, благодаря чему эффективность работы во много раз увеличивается [59].

Проблема задач с фазовым переходом обусловлена, прежде всего, наличием неизвестной (свободной) границы фазового перехода, поэтому возникает проблема с определением области решения данных задач.

Рассмотрим отрезок $\Omega = (0, l)$, $l = R_{\max} + 6$, который точкой $r = R(t)$ (граница фазового перехода) разбивается на две подобласти

$$\Omega^+(t) = \{r : 0 < r < R(t)\}, \quad \Omega^-(t) = \{r : R(t) < r < l\}.$$

В области $\bar{\Omega}$ введём равномерную сетку с шагом h :

$$r = r_i = ih, \quad i = 0, 1, \dots, M, \quad Mh = l.$$

По времени также будем использовать равномерную сетку с шагом τ :

$$t = t_j = j\tau, \quad j = 0, 1, \dots, N, \quad Nh = T. \quad (\text{рисунок 2.6})$$

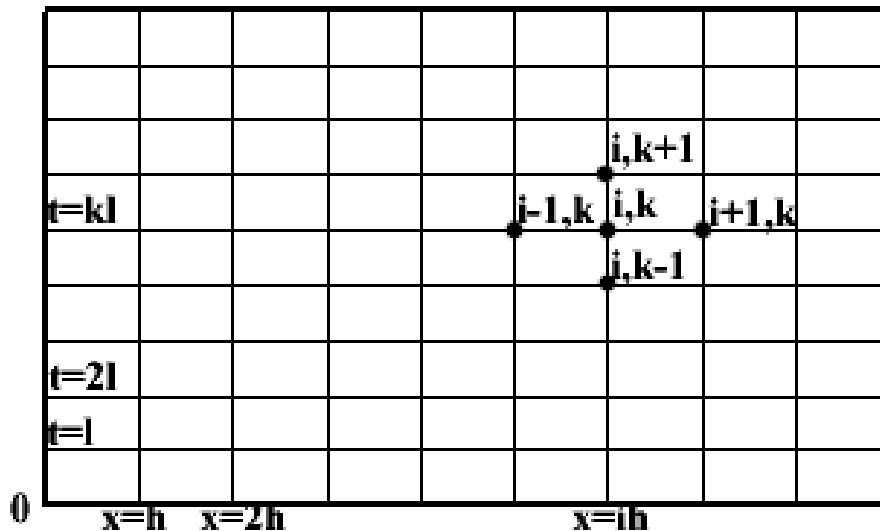


Рисунок 2.6 – Схема расчета по сетке прямоугольного типа

Вывод радиуса гранулы из интегрального закона. Составим уравнение теплового баланса на j -ом слое:

$$Q_j = 4\pi\rho_1 c \int_0^{R_j} r^2 U(r, t_j) dr = 4\pi\rho_1 c \int_0^{R_j} r V(r, t_j) dr. \quad (2.42)$$

Используя формулу прямоугольника $\int_a^b f(x) dx = \sum_{i=1}^M f(x_i) h$ с начальным

условием $V|_{t=0} = -R_0 r$, $0 \leq r \leq R_0$, уравнение (2.42) преобразуем в (2.43)

$$Q_j = 4\pi\rho_1 c \int_0^{R_j} rV(r, t_j) dr. Q_j = 4\pi\rho_1 ch^3 U_0 \sum_{k=1}^M k^2. \quad (2.43)$$

Так как $Q_0 = \frac{4}{3}\pi\rho_1 c R_0^3 U_0$, и $Q_j - Q_0 = \frac{4}{3}\pi q\rho_2 (R_j^3 - R_0^3)$, то, следовательно:

$$\frac{4}{3}\pi q\rho_2 (R_j^3 - R_0^3) = 4\pi\rho_1 ch^3 U_0 \sum_{k=1}^M k^2 - \frac{4}{3}\pi\rho_1 c R_0^3 U_0. \quad (2.44)$$

Последнее уравнение можно преобразовать следующим образом:

$$\frac{1}{3}\pi q\rho_2 (R_j^3 - R_0^3) = \pi\rho_1 ch^3 U_0 \sum_{k=1}^M k^2 - \frac{1}{3}\pi\rho_1 c R_0^3 U_0, \quad (2.45)$$

$$\frac{1}{3}q\rho_2 R_j^3 = \rho_1 ch^3 U_0 \sum_{k=1}^M k^2 - \frac{1}{3}\rho_1 c R_0^3 U_0 + \frac{1}{3}q\rho_2 R_0^3,$$

$$R_j^3 = 3 \frac{\rho_1 ch^3 U_0}{q\rho_2} \sum_{k=1}^M k^2 - R_0^3 \left(\frac{\rho_1 c U_0}{q\rho_2} - 1 \right) \quad (2.46)$$

$$R_j = \left(3 \frac{\rho_1 ch^3 U_0}{q\rho_2} \sum_{k=1}^M k^2 - R_0^3 \left(\frac{\rho_1 c U_0}{q\rho_2} - 1 \right) \right)^{1/3}.$$

Согласно методу подобия, изложенного выше:

$$\frac{R_j^3}{R_0^3} = 3 \frac{\rho_1 ch^3 U_0}{q\rho_2 R_0^3} \sum_{k=1}^M k^2 - \left(\frac{\rho_1 c U_0}{q\rho_2} - 1 \right), \quad (2.47)$$

ПОЭТОМУ:

$$R_j^3 = 3 \frac{\rho_1 ch^3 U_0}{q\rho_2 R_0^3} \sum_{k=1}^M k^2 - \left(\frac{\rho_1 c U_0}{q\rho_2} - 1 \right), \quad R_j = \left(3 \frac{\rho_1 ch^3 U_0}{q\rho_2 R_0^3} \sum_{k=1}^M k^2 - \left(\frac{\rho_1 c U_0}{q\rho_2} - 1 \right) \right)^{1/3}. \quad (2.48)$$

Кроме того, радиус можно выразить из уравнения

$$\frac{dR(t)}{dt} = \frac{1}{R(t)} V_r \Big|_{r=R(t)}. \quad (2.49)$$

следующим образом. Аппроксимируем (2.49) конечно-разностной схемой на сетке с узлами $r = r_i = ih$, $i = 0, 1, \dots, M$, $Mh = l$,

$$t = t_j = j\tau, \quad j = 0, 1, \dots, N, \quad Nh = T.$$

$$\frac{R_{j+1} - R_j}{\tau} = \frac{1}{R_j} \frac{V_j^M - V_j^{M-1}}{h}.$$

Выразим R_{j+1} , получим:

$$R_{j+1} = \frac{\tau}{R_j} \frac{V_j^M - V_j^{M-1}}{h} + R_j, \quad j = \overline{0, N-1}. \quad (2.50)$$

Определение коэффициентов фазового перехода. Мы имеем систему линейных алгебраических уравнений с трехдиагональной матрицей $A=[a_{ij}]$ (т.е. матрицей, все элементы которой, не лежащие на главной и двух побочных диагоналях, равны нулю $a_{ij}=0$ при $j>i+1$ и $j<i-1$), в общем случае вид которой [18]:

$$a_i y_{i-1} - b_i y_i + c_i y_{i+1} = F_i, \quad i = \overline{1, N-1} \quad (2.51)$$

$$y_0 = v_1 y_1 + \mu_1, \quad y_N = v_2 y_{N-1} + \mu_2. \quad (2.52)$$

Для численного решения систем с трехдиагональными матрицами применяется *метод прогонки*, который представляет собой вариант метода последовательного исключения неизвестных.

Будем искать решение системы (2.51) в виде:

$$y_i = \alpha_{i+1} y_{i+1} + \beta_{i+1} \quad \beta = \overline{0, N-1} \quad (2.53)$$

где $\alpha_{i+1}, \beta_{i+1}$ - неизвестные пока коэффициенты.

Отсюда найдем:

$$y_{i-1} = \alpha_i y_i + \beta_i = \alpha_i (\alpha_{i+1} y_{i+1} + \beta_{i+1}) + \beta_i = \alpha_i \alpha_{i+1} y_{i+1} + \alpha_i \beta_{i+1} + \beta_i, \quad i = \overline{1, N-1}$$

Подставляя полученные выражения для y_i, y_{i-1} в уравнение (2.51), приходим при $i=1, 2, \dots, N-1$ к уравнению:

$$[\alpha_{i+1}(a_i \alpha_i - c_i) + b_i] y_{i+1} + [\beta_{i+1}(\alpha_i a_i - c_i) + \alpha_i \beta_i + f_i] = 0.$$

Последнее уравнение будет выполнено, если коэффициенты $\alpha_{i+1}, \beta_{i+1}$ выбрать такими, чтобы выражения в квадратных скобках обращались в нуль. А именно, достаточно положить:

$$\alpha_{i+1} = \frac{c_i}{b_i - a_i \alpha_i}, \quad \beta_{i+1} = \frac{f_i - \alpha_i \beta_i}{\alpha_i a_i - b_i} \quad i = \overline{1, N-1} \quad (2.54)$$

Соотношения (2.60) представляют собой нелинейные разностные уравнения первого порядка. Для их решения необходимо задать начальные значения α_1, β_1 . Эти начальные значения находим из требования эквивалентности условия (2.53) при $\tau=0$, т.е. условия $y_0 = \alpha_1 y_1 + \beta_1$ к первому из уравнений (2.47). Таким образом, получаем:

$$\alpha_1 = v_1, \beta_1 = \mu_1. \quad (2.55)$$

Нахождение коэффициентов $\alpha_{i+1}, \beta_{i+1}$ по формулам (2.54), (2.55) называется *прямой прогонкой*. После того как прогоночные коэффициенты $\alpha_{i+1}, \beta_{i+1}$, $i = \overline{0, N-1}$ найдены, решение системы (2.51), (2.52) находится по рекуррентной формуле (2.54), начиная с $i=N-1$. Для начала счета по этой формуле требуется знать y_N , которое определяется из уравнений

$$y_N = v_2 y_{N-1} + \mu_2, \quad y_{N-1} = \alpha_N y_N + \beta_N$$

и равняется $(v_2 \beta_N + \mu_2) / (1 - v_2 \alpha_N)$. Нахождение y_i по формулам

$$y_i = \alpha_{i+1} y_{i+1} + \beta_{i+1} \quad i = \overline{N-1, 0}$$

$$y_N = \frac{v_2 \beta_N + \mu_2}{1 - v_2 \alpha_N} \quad (2.56)$$

называется *обратной прогонкой*. Алгоритм решения системы (2.51), (2.52), определяемый по формулам (2.54) - (2.55), называется *методом прогонки* [100].

Метод прогонки можно применять, если знаменатели выражений (2.54), (2.55) не обращаются в нуль. Для возможности применения метода прогонки достаточно потребовать, чтобы коэффициенты системы (2.57)-(2.58) удовлетворяли условиям:

$$\begin{aligned} a_i \neq 0, \quad b_i \neq 0, \quad |c_i| \geq |a_i| + |b_i|, \quad i = \overline{1, N-1}, \\ |v_1| \leq 1, \quad |v_2| \leq 1. \end{aligned}$$

Составление разностной схемы.

Аппроксимируем уравнение

$$\frac{\partial V}{\partial t} = D \frac{\partial^2 V}{\partial r^2} \quad (2.57)$$

конечно-разностной схемой на сетке с узлами $r = r_i = ih$,

$$t_j = j\tau, \quad j = \overline{0, N}, \quad i = \overline{0, M} :$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} &= \frac{V_i^{j+1} - V_i^j}{\tau}, \\ \frac{\partial^2 V}{\partial r^2} &= \frac{V_{i+1}^{j+1} - 2V_i^{j+1} + V_{i-1}^{j+1}}{h^2} \end{aligned}$$

тогда:

$$\frac{V_i^{j+1} - V_i^j}{\tau} = D \frac{V_{i+1}^{j+1} - 2V_i^{j+1} + V_{i-1}^{j+1}}{h^2}$$

В результате получим следующую систему разностных уравнений на $(j+1)$ -ом слое по времени:

$$a_i V_{i-1}^{j+1} - b_i V_i^{j+1} + c_i V_{i+1}^{j+1} = f_i, \quad i = \overline{1, M-1}, \quad (2.58)$$

здесь:

$$a_i = \frac{-D}{h^2}, \quad b_i = \frac{-1}{\tau} - \frac{2D}{h^2}, \quad c_i = \frac{-D}{h^2}, \quad f_i = \frac{V_i^j}{\tau}.$$

Разностная схема (2.58) аппроксимирует исходное уравнение (2.57) с первым порядком точности по t и вторым по r .

В соответствии с методом прогонки будем искать решение разностных уравнений (2.58) в виде [19]:

$$V_i^{j+1} = \alpha_{i+1}^{j+1} V_{i+1}^{j+1} + \beta_{i+1}^{j+1}, \quad i = \overline{0, M-1}. \quad (2.59)$$

Отсюда найдем:

$$V_{i-1}^{j+1} = \alpha_i^{j+1} V_i^{j+1} + \beta_i^{j+1}, \quad i = \overline{0, M-1}$$

и подставим в (2.58):

$$a_i^{j+1} (\alpha_i^{j+1} V_i^{j+1} + \beta_i^{j+1}) - b_i V_i^{j+1} + c_i V_{i+1}^{j+1} + \beta_{i+1}^{j+1} = F_i, \quad i = \overline{1, M-1}. \quad (2.60)$$

Сравнивая (2.59) и (2.60), получаем:

$$\alpha_{i+1}^{j+1} = \frac{-c_i}{a_i \alpha_i^{j+1} - b_i}, \quad (2.61)$$

$$\beta_{i+1}^{j+1} = \frac{f_i - a_i \beta_i^{j+1}}{-b_i + a_i \alpha_i^{j+1}}.$$

Алгоритм численного решения

1. Из граничных условий и условия $V_0^j = \alpha_1 V_1^j + \beta_1$, определяют $\alpha_1 = 0$ и $\beta_1 = 0$.
2. Далее, приняв $M=M_0$, методом прогонки находят решения (2.57).
3. Затем, приняв R^{j+1} , по формуле (2.48) или (2.50) сравнивают найденный радиус с первоначальным:

$$\Delta R = R^{j+1} - R_1(0), \quad j = 0, M_1, \quad (2.62)$$

где $R_1(0) = 1$.

4. Таким образом находится число узлов, которые необходимо добавить:

$$m_1 = \text{round}\left(\frac{R^{j+1} - R_1(0)}{h}\right), \quad (2.63)$$

$$m = m_1 + m_0. \quad (2.64)$$

5. Когда найдены все $W_i^j, i = 0, 1, \dots, M_1, j = 0, 1, \dots, N$, необходимо вернуться к обратной замене $U = Wr$.

Из того, что $\tilde{W} = -\frac{W}{U_0}, \quad \tilde{r} = \frac{r}{R_0}$, следует

$$\tilde{U} = -\frac{\tilde{W}\tilde{r}}{U_0 R_0}. \quad (2.65)$$

6. Обозначив $\tilde{r} = r, \tilde{t} = t, \tilde{W} = W, \tilde{U} = U$, получим:

$$U = -\frac{Wr}{U_0 R_0}, \quad (2.66)$$

то есть

$$U_i^j = -\frac{W_i^j i h}{U_0 R_0} \quad i = 0, 1, \dots, M_1, \quad j = 0, 1, \dots, N. \quad (2.67)$$

Результаты моделирования. Изменение температуры ледяной гранулы в процессе намораживания характеризуется затухающим ростом. В начальный момент времени τ_0 радиус гранулы равен R_0 . Температура в грануле одинаковая по всему объему и соответствует температуре среды, в которой она находилась длительное время перед кристаллизацией, например, -42°C . Температура воды условно равна 0°C (рисунок 2.7.).

Через некоторый промежуток времени в момент τ_i на гранулу льда за счет запаса холода намерзнет лед. Радиус гранулы будет равен R_i . Температура распределится по некой изотерме. Так как запас холода в грануле конечен, то процесс в определенный момент времени τ остановится.

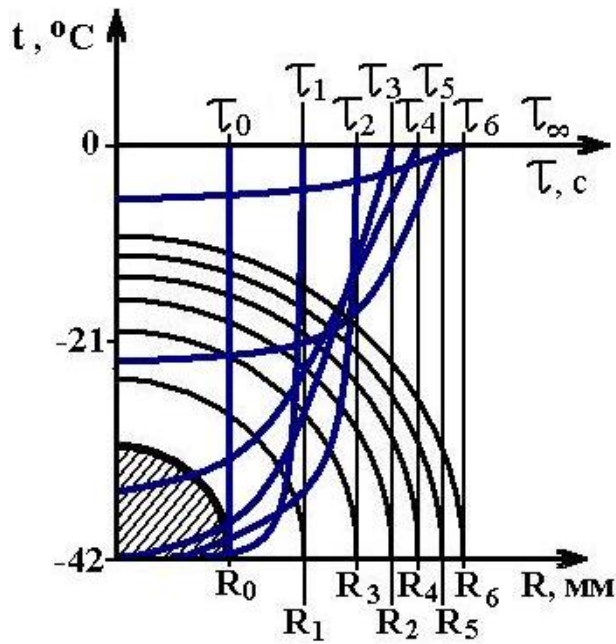
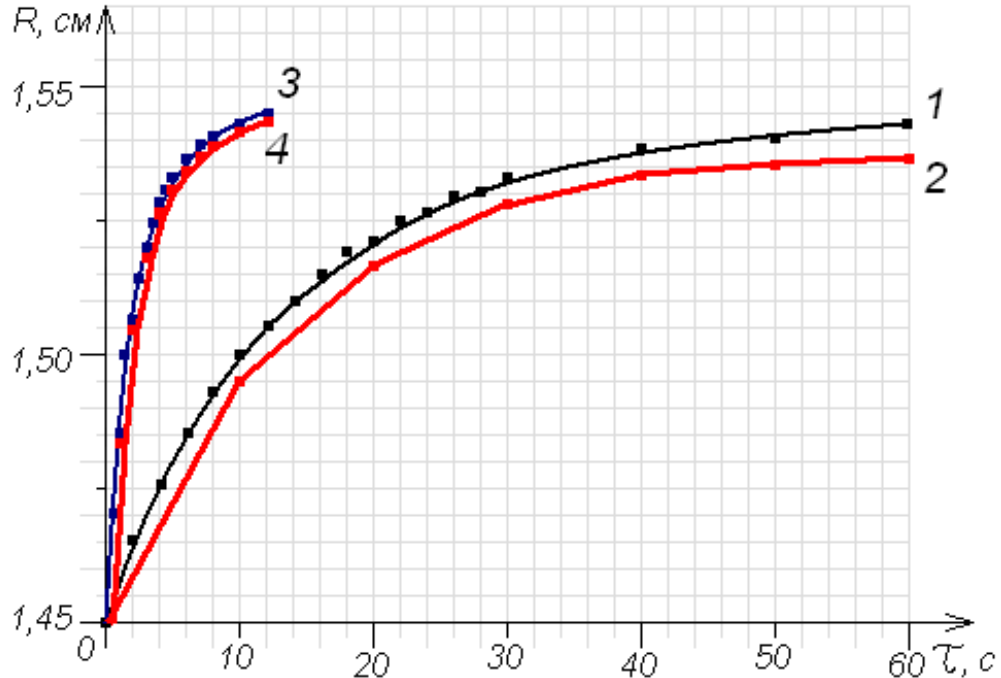


Рисунок 2.7 – Распределение температуры в грануле льда

По экспериментальным данным для гранул диаметром 30 мм время выравнивания температуры со средой соответствует около 2,5 минутам.

Чтобы оценить достоверность разработанной математической модели, построен расчетный график адиабатического намораживания льда (рисунок 2.8, кривые 2 и 4), который сопоставили с экспериментальным графиком [раздел 3].



1, 3 – экспериментальные данные; 2, 4 – расчетные данные

Рисунок 2.8 - Зависимость адиабатического намораживания льда на сферической грануле с начальной температурой $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (1,2) и $-42\text{ }^{\circ}\text{C}$ (3,4)

На практике оказалось, что толщина намерзшего льда превосходит теоретическое значение на 0,1 мм для любого выбранного момента времени. Данное различие объясняется тем обстоятельством, что ледяные гранулы, после извлечения из жидкости, удерживают на себе тонкую водную пленку, которая кристаллизуется уже вне фиксируемого промежутка времени, давая тем самым постоянный дополнительный прирост льда.

С учетом соответствующей поправки различие расчетного и практического значения текущего радиуса гранулы льда при её адиабатическом намораживании составляет не более 4,5%.

2.5 Математическая модель процесса гранулирования льда в циркуляционном кипящем слое

Постановка задачи. Задача формулируется следующим образом: при известных физических свойствах и параметрах системы «лёд – вода – воздух» установить зависимость увеличения размера гранул от продолжительности процесса.

Основной трудностью расчета данного процесса является дискретное изменение формы гранул в течение всего времени τ . Даже простейший случай симметричного намораживания на грануле сферической формы моделируется задачей Стефана, решение которой получено лишь численным методом.

Применение принципа Стефана к каждой капле на каждой грануле приводит к множеству уравнений, решение системы которых не представляется возможным. Поэтому решения поставленной задачи основывается на выполнении условий теплового баланса процесса намораживания льда.

Тепловой баланс процесса намораживания гранулированного льда в кипящем слое устанавливает соответствие теплового эффекта фазового перехода q изменению теплоты содержания псевдоожижающего агента,

которая определяется по разнице температуры воздуха на входе $t_{вх}$ и выходе из рабочей камеры $t_{вых}$.

В ходе процесса намораживания частиц льда, площадь поверхности которых равна S , происходит их орошение холодной водой. Доля смоченной поверхности гранул равна ψ (рисунок 2.9).

При кристаллизации образовавшейся пленки воды выделяется энергия q , которая переходит за счет теплопередачи в тело самой гранулы и в часть пленки, оставшуюся жидкой.

Одновременно с этим происходит охлаждение гранул в потоке псевдоожигающего агента. Коэффициенты теплоотдачи от смоченной (мокрой) α_m и оставшейся сухой α_c поверхности гранул несколько отличаются друг от друга. Данное различие связано с более высокой шероховатостью сухой поверхности гранул. Но учитывая то обстоятельство, что в кипящем слое происходят постоянные колебания скорости воздуха в порах зернистой массы, то вполне оправдано принять эти коэффициенты одинаковыми.

Авторы О.М. Годесом и О.Б. Цитович в своей монографии указывают на мгновенное выравнивание температуры псевдоожигающего агента на выходе из слоя с температурой поверхности зернистой массы [92], объясняя это существенно более высокой теплоемкостью твердой фазы.

Исходя из выше сказанного, условия теплового баланса записываем в виде системы дифференциальных уравнений в простых производных первой степени (2.68):

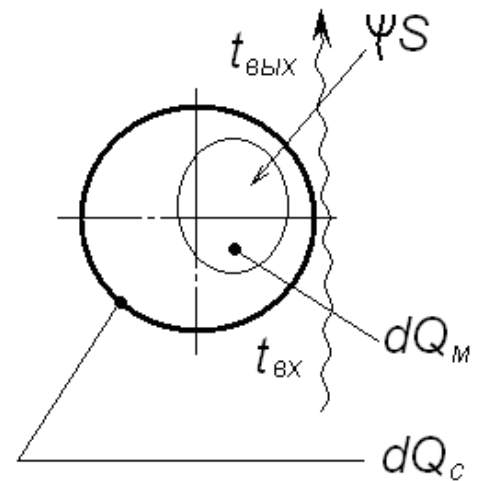


Рисунок 2.9 – Распределение теплоотдачи с мокрой и сухой поверхности гранулы

$$\begin{cases} dQ_M = \alpha_M (0^\circ\text{C} - t_{\text{вх}}) \cdot \psi S \cdot d\tau; \\ dQ_C = \alpha_C (t_{\text{вх}} - t_{\text{ex}}) \cdot (1 - \psi) S \cdot d\tau; \\ dQ = dQ_M + dQ_C; \\ dQ = q \cdot \rho \cdot S \cdot dr. \end{cases} \quad (2.68)$$

где dQ_M , dQ_C – количество тепла от смоченной и сухой поверхности гранул, Дж; α_M , α_C – коэффициент теплоотдачи от смоченной и сухой поверхности, Вт/(м² · К); S – площадь гранул, м²; ψ – доля смоченной поверхности от общей площади гранулы, м²/м²; $t_{\text{вх}}$, $t_{\text{вх}}$ – температура воздуха на входе и выходе из аппарата, °С; τ – время, с; q – теплота замерзания (плавления), кДж/кг; ρ – плотность льда, кг/м³; r – текущей радиус гранул, м.

После преобразования (2.68) уравнения имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} dQ &= dQ_M + dQ_C; \\ q\rho S dr &= \alpha_M (0^\circ\text{C} - t_{\text{вх}}) \psi S d\tau + \alpha_C (t_{\text{вх}} - t_{\text{ex}}) (1 - \psi) S d\tau; \\ q\rho dr &= [\alpha_M (0^\circ\text{C} - t_{\text{вх}}) \psi + \alpha_C (t_{\text{вх}} - t_{\text{ex}}) (1 - \psi)] d\tau. \end{aligned} \quad (2.69)$$

Для упрощения дальнейших расчетов вводится новое обозначение:

$$q\rho dr = \underbrace{[\alpha_M (0^\circ\text{C} - t_{\text{вх}}) \psi + \alpha_C (t_{\text{вх}} - t_{\text{ex}}) (1 - \psi)]}_{\xi} d\tau. \quad (2.70)$$

Разделив левую и правую части (2.70) на $d\tau$ и $q\rho$, получим:

$$\frac{dr}{d\tau} = \frac{\xi}{q\rho}. \quad (2.71)$$

Дифференциальное уравнение (2.71) выражает скорость изменения радиуса гранул с течением времени. При непрерывном процессе намораживания величины, входящие в параметр ξ , имеют постоянное значение, а с учетом того, что и $q\rho$ также постоянно, то скорость намораживания льда постоянна: $\frac{dr}{d\tau} = \text{const}$.

Интеграл от правой части уравнения (2.71) представляет собой функцию роста радиуса гранул с течением времени:

$$r(\tau) = \int \frac{\xi}{q\rho} d\tau = \frac{\xi}{q\rho} \cdot \tau + C, \quad (2.72)$$

где $r(\tau)$ – функция изменения радиуса гранул с течением времени, м/с; C – постоянный коэффициент, м.

Величина коэффициента C определяется из начального условия:

$$\begin{cases} \tau_0 = 0; \\ r(0) = r_0. \end{cases} \quad (2.73)$$

Подстановкой значения τ_0 в (2.72) находим коэффициент C :

$$r(0) = \frac{\xi}{q\rho} \cdot 0 + C = r_0. \quad (2.74)$$

После обобщения (2.70), (2.72) и (2.74) найдено:

$$r(\tau) = \frac{\alpha_m(0^\circ C - t_{\text{ВЫХ}})\psi + \alpha_c(t_{\text{ВЫХ}} - t_{\text{ВХ}})(1 - \psi)}{q\rho} \cdot \tau + r_0. \quad (2.75)$$

Формула (2.75) определяет текущий радиус гранул при заданных параметрах, r_0 , $t_{\text{ВХ}}$, $t_{\text{ВЫХ}}$, α_m , α_c , ψ , τ .

В практических целях удобнее знать изменение массы льда за известный период времени. Данная функция выводится из уравнения (2.75). Для этого левые и правые части этого уравнения умножаем на $S_0 \cdot \rho$.

$$r(\tau) \cdot S_0 \rho = \frac{\alpha_m(0^\circ C - t_{\text{ВЫХ}})\psi + \alpha_c(t_{\text{ВЫХ}} - t_{\text{ВХ}})(1 - \psi)}{q\rho} \cdot \tau \cdot S_0 \rho + r_0 \cdot S_0 \rho. \quad (2.76)$$

Учитывая, что произведение длины на площадь и на плотность тела даёт его массу, то выражение (2.76) принимает следующий вид:

$$m(\tau) = \frac{\alpha_m(0^\circ C - t_{\text{ВЫХ}})\psi + \alpha_c(t_{\text{ВЫХ}} - t_{\text{ВХ}})(1 - \psi)}{q} \cdot \tau \cdot S_0 + m_0, \quad (2.77)$$

где $m(\tau)$ – функция изменения массы льда с течением времени, кг/с; m_0 – масса льда в начале процесса, кг; S_0 – суммарная площадь поверхности гранул в начале процесса, м² [130].

При экспериментальном намораживании льда замечено, что при минимальном орошении, когда коэффициент ψ стремится к нулю, температура воздуха на выходе из кипящего слоя приближается к температуре воздуха на входе. В этом случае при подстановке в формулу (2.77) значений $\psi = 0$ и $t_{\text{ВЫХ}} = t_{\text{ВХ}}$ числитель дроби обращается в ноль, т.е. прирост льда отсутствует, что подтверждается на практике, так как при отсутствии орошения намораживание льда невозможно.

Благодаря тому, что температура псевдоожижающего агента на выходе из слоя совпадает с температурой сухой поверхности гранул, математически определяется функция температуры воздуха на выходе из слоя от степени орошения:

$$t_{\text{ВЫХ}} = t_{\text{ВХ}} + \frac{\alpha_{\text{М}} (0^{\circ} \text{C} - t_{\text{ВЫХ}}) \cdot S \psi}{c_{\text{Г}} \cdot V \cdot \rho_{\text{Г}}}, \quad (2.78)$$

где $c_{\text{Г}}$ – удельная теплоемкость воздуха, кДж/(кг · К); $\rho_{\text{Г}}$ – плотность воздуха, кг/м³.

После всех преобразований получаем:

$$t_{\text{ВЫХ}} = \frac{t_{\text{ВХ}}}{\left(1 + \frac{\alpha_{\text{М}} \cdot S}{c_{\text{Г}} \cdot \rho_{\text{Г}} \cdot V} \cdot \psi\right)}. \quad (2.79)$$

После подстановки выражения (2.79) для $t_{\text{ВЫХ}}$ в числитель дроби в формуле (2.77) получили функцию $\xi(\psi)$, которая с учётом совпадения коэффициентов теплоотдачи от смоченной и сухой поверхностей равна:

$$\begin{aligned} \xi &= \alpha \cdot \left(0 - \frac{t_{\text{ВХ}}}{1 + \frac{\alpha \cdot S}{c_{\text{Г}} \cdot \rho_{\text{Г}} \cdot V} \cdot \psi}\right) \cdot \psi + \alpha \cdot \left(\frac{t_{\text{ВХ}}}{1 + \frac{\alpha \cdot S}{c_{\text{Г}} \cdot \rho_{\text{Г}} \cdot V} \cdot \psi} - t_{\text{ВХ}}\right) \cdot (1 - \psi) = \\ &= -2 \frac{\alpha \cdot t_{\text{ВХ}} \cdot \psi}{1 + \frac{\alpha \cdot S}{c_{\text{Г}} \cdot \rho_{\text{Г}} \cdot V} \cdot \psi} + \frac{\alpha \cdot t_{\text{ВХ}}}{1 + \frac{\alpha \cdot S}{c_{\text{Г}} \cdot \rho_{\text{Г}} \cdot V} \cdot \psi} - \alpha \cdot t_{\text{ВХ}} + \alpha \cdot t_{\text{ВХ}} \cdot \psi \end{aligned} \quad (2.80)$$

где α – коэффициент теплоотдачи к воздуху, $\alpha = \alpha_{\text{М}} = \alpha_{\text{с}}$, Вт/(м² · К).

Оптимальная степень орошения гранул соответствует максимуму функции (2.80).

Для его нахождения берется производная данной функции $\xi'(\psi)$, величина ψ в которой обращается в ноль:

$$\begin{aligned} \xi'(\psi) &= \frac{-2\alpha \cdot t_{\text{BX}} \cdot \left(1 + \frac{\alpha \cdot S}{c_r \cdot \rho_r V} \cdot \psi\right) + 2\alpha \cdot t_{\text{BX}} \cdot \psi \cdot \frac{\alpha \cdot S}{c_r \cdot \rho_r V} - \frac{\alpha \cdot t_{\text{BX}} \cdot \frac{\alpha \cdot S}{c_r \cdot \rho_r V}}{\left(1 + \frac{\alpha \cdot S}{c_r \cdot \rho_r V} \cdot \psi\right)^2} + \alpha \cdot t_{\text{BX}}}{\left(1 + \frac{\alpha \cdot S}{c_r \cdot \rho_r V} \cdot \psi\right)^2} = \\ &= \frac{-\alpha \cdot t_{\text{BX}} \cdot \frac{\alpha \cdot S}{c_r \cdot \rho_r V} - 2\alpha \cdot t_{\text{BX}}}{\left(1 + \frac{\alpha \cdot S}{c_r \cdot \rho_r V} \cdot \psi\right)^2} + \alpha \cdot t_{\text{BX}}. \end{aligned} \quad (2.81)$$

$$\begin{aligned} \xi' &= \frac{-\alpha \cdot t_{\text{BX}} \cdot \frac{\alpha \cdot S}{c_r \cdot \rho_r V} - 2\alpha \cdot t_{\text{BX}}}{\left(1 + \frac{\alpha \cdot S}{c_r \cdot \rho_r V} \cdot \psi_{\text{min}}^{\text{max}}\right)^2} + \alpha \cdot t_{\text{BX}} = 0; \end{aligned} \quad (2.82)$$

$$\psi_{\text{min}}^{\text{max}} = \frac{\sqrt{\frac{\alpha \cdot S}{c_r \cdot \rho_r V} + 2} - 1}{\frac{\alpha \cdot S}{c_r \cdot \rho_r V}}.$$

Положительная или отрицательная величина второй производной ξ'' позволяет определить характер данного экстремума:

$$\xi'' = \frac{\left(\alpha \cdot t_{\text{BX}} \cdot \frac{\alpha \cdot S}{c_r \cdot \rho_r V} + 2\alpha \cdot t_{\text{BX}}\right) \cdot 2 \left(1 + \frac{\alpha \cdot S}{c_r \cdot \rho_r V} \cdot \psi\right) \cdot \frac{\alpha \cdot S}{c_r \cdot \rho_r V}}{\left(1 + \frac{\alpha \cdot S}{c_r \cdot \rho_r V} \cdot \psi\right)^4}. \quad (2.83)$$

Так как вычисленная по формуле (2.84) вторая производная ξ'' представляет собой отрицательную величину, то значение $\psi_{\text{min}}^{\text{max}}$ является той степенью орошения, при которой достигнуто максимальное намораживание льда, т.е.

$$\psi^{\text{max}} = \frac{\sqrt{\frac{\alpha \cdot S}{c_r \cdot \rho_r V} + 2} - 1}{\frac{\alpha \cdot S}{c_r \cdot \rho_r V}}. \quad (2.84)$$

В практическом намораживании льда величина ψ^{max} изменяется от 0,15 до 0,30.

Подстановкой формулы (2.84) в выражение (2.79) определяем температуру выхлопа при оптимальной степени орошения гранул:

$$t_{\text{вых}} = \frac{t_{\text{вх}}}{\left(1 + \frac{\alpha_m \cdot S}{c_r \cdot \rho_r V} \cdot \frac{\sqrt{\frac{\alpha \cdot S}{c_r \cdot \rho_r V} + 2} - 1}{\frac{\alpha \cdot S}{c_r \cdot \rho_r V}} \right)} = \frac{t_{\text{вх}}}{\sqrt{\frac{\alpha \cdot S}{c_r \cdot \rho_r V} + 2}}. \quad (2.85)$$

С учетом (2.84), (2.85) и (2.77) максимальное намораживание льда определяем по формуле:

$$\begin{aligned} \Delta m &= \frac{\alpha \cdot \tau \cdot S}{q} \left(0^\circ \text{C} - \frac{t_{\text{вх}}}{\sqrt{\frac{\alpha \cdot S}{c_r \cdot \rho_r V} + 2}} \right) \frac{\sqrt{\frac{\alpha \cdot S}{c_r \cdot \rho_r V} + 2} - 1}{\frac{\alpha \cdot S}{c_r \cdot \rho_r V}} + \\ &+ \frac{\alpha \cdot \tau \cdot S}{q} \left(\frac{t_{\text{вх}}}{\sqrt{\frac{\alpha \cdot S}{c_r \cdot \rho_r V} + 2}} - t_{\text{вх}} \right) \left(1 - \frac{\sqrt{\frac{\alpha \cdot S}{c_r \cdot \rho_r V} + 2} - 1}{\frac{\alpha \cdot S}{c_r \cdot \rho_r V}} \right) = \\ &= \frac{c_r \rho_r V \tau}{q} \times \frac{t_{\text{вх}} - t_{\text{вх}} \sqrt{\frac{\alpha \cdot S}{c_r \cdot \rho_r V} + 2}}{1} \left(\frac{2}{\sqrt{\frac{\alpha \cdot S}{c_r \cdot \rho_r V} + 2}} - 1 \right) + \frac{\alpha \cdot \tau \cdot S (t_{\text{вх}})}{q} \left(\frac{1}{\sqrt{\frac{\alpha \cdot S}{c_r \cdot \rho_r V} + 2}} - 1 \right). \end{aligned} \quad (2.86)$$

где Δm – прирост массы льда, кг.

Удельная производительность аппарата с циркуляционным кипящим слоем. В специальной литературе указывается на быстрое выравнивание температуры псевдоожигающего агента и зернистой массы. Высота слоя гранул, в пределах которого наступает данное равновесие, составляет приблизительно из 50 частиц [96].

В циркуляционном кипящем слое максимальное охлаждение гранул наступает при количестве частиц, оказывающих давление на газораспределительную решетку около 2000 Па.

Затраты энергии при намораживании гранулированного льда в циркуляционном кипящем слое определяются в основном расходом энергии

на псевдооживление гранул. Необходимую мощность вентилятора определяем по формуле:

$$N = \frac{N_o}{\eta} = \frac{V \cdot P}{\eta}, \quad (2.87)$$

где N – мощность привода вентилятора, кВт; N_o – эффективная мощность вентилятора, кВт; η – К.П.Д. вентилятора.

Количество подаваемого воздуха определяем по формуле:

$$V = \frac{N_o}{P} = \eta \frac{N}{P}. \quad (2.88)$$

С учетом того, что давление слоя гранул, достаточное для установления теплового равновесия частиц с воздухом, составляет около 2000 Па, расход воздуха на один киловатт эффективной мощности вентилятора равен:

$$V = \frac{N_o}{P} = \frac{1000}{2000} = 0,50 \text{ (м}^3/\text{с)}.$$

При фактической мощности вентилятора один киловатт расхода воздуха составляет:

$$V = \eta \frac{N}{P} = 0,61 \cdot \frac{1000}{2000} = 0,305 \text{ (м}^3/\text{с)}.$$

Так как расход воздуха в циркуляционном кипящем слое представляет собой произведение скорости уноса гранул на площадь газораспределительной решетки, которая в свою очередь испытывает давление слоя, то расчет массы гранул производим по формуле:

$$m = \frac{P \cdot V / \omega_{\text{внт}}}{g}. \quad (2.89)$$

где $\omega_{\text{внт}}$ – скорость уноса гранул, м/с; g – ускорение свободного падения, м/с².

Зная массу слоя и диаметр гранул, определяем суммарную поверхность частиц:

$$S = \frac{6 \cdot m}{d \cdot \rho}. \quad (2.90)$$

где d – диаметр гранул, м.

Размер частиц затравки определяет массу слоя, его суммарную поверхность, скорость воздуха у газораспределительной решетки и

коэффициент теплоотдачи. Расчетное значение последнего для всех фракций затравки с размером от 4 до 40 мм составляет около 400 Вт/(м² · К).

Производительность аппарата по намораживанию гранулированного льда в циркуляционном кипящем слое определяем по формуле:

$$G = \frac{\Delta m}{\tau} = \frac{c_r \cdot \rho_r V}{q} \times \frac{t_{\text{вх}} - t_{\text{вх}} \sqrt{\frac{\alpha \cdot S}{c_r \cdot \rho_r V} + 2}}{1} \left(\frac{2}{\sqrt{\frac{\alpha \cdot S}{c_r \cdot \rho_r V} + 2}} - 1 \right) + \frac{\alpha \cdot S \cdot (t_{\text{вх}})}{q} \left(\frac{1}{\sqrt{\frac{\alpha \cdot S}{c_r \cdot \rho_r V} + 2}} - 1 \right). \quad (2.91)$$

где G – производительность аппарата, кг/с.

Практическое намораживание льда показало наилучшую эффективность гранул с диаметром 10 мм.

Для данного размера частиц с учетом (2.87)-(2.90) максимальная эффективная производительность аппарата по намораживанию гранулированного льда в циркуляционном кипящем слое представляет собой функцию температуры воздуха на входе в слой $t_{\text{вх}}$ и мощности вентилятора.

После дополнительных расчетов получено:

$$G_0 = -0,2086 \cdot 10^{-3} \times (t_{\text{вх}} - t_{\text{вх}}(2,2255)) - 3,3478 \cdot 10^{-3} \times (t_{\text{вх}}), \quad \left[\frac{\text{кг/с}}{1 \text{ кВт}} \right]; \quad (2.92)$$

$$G = -0,1271 \cdot 10^{-3} \times (t_{\text{вх}} - t_{\text{вх}}(2,2252)) - 2,0410 \cdot 10^{-3} \times (t_{\text{вх}}), \quad \left[\frac{\text{кг/с}}{1 \text{ кВт}} \right]$$

где G_0 – эффективная удельная производительность аппарата, кг/(с · кВт).

Расчетные значения максимальной эффективной и фактической производительности аппарата на один киловатт мощности вентилятора для частиц диаметром 10 мм представлены в виде графика на рисунке 2.10.

Расход энергии на получение одной тонны льда определяем по формуле:

$$N \cdot \tau = \frac{1 \text{ т}}{G}. \quad (2.93)$$

Расчетные значения эффективного и фактического расхода энергии на намораживание одной тонны льда в зависимости от температуры воздуха при использовании частиц затравки с диаметром 10 мм приведены в виде графиков на рисунке 2.11.

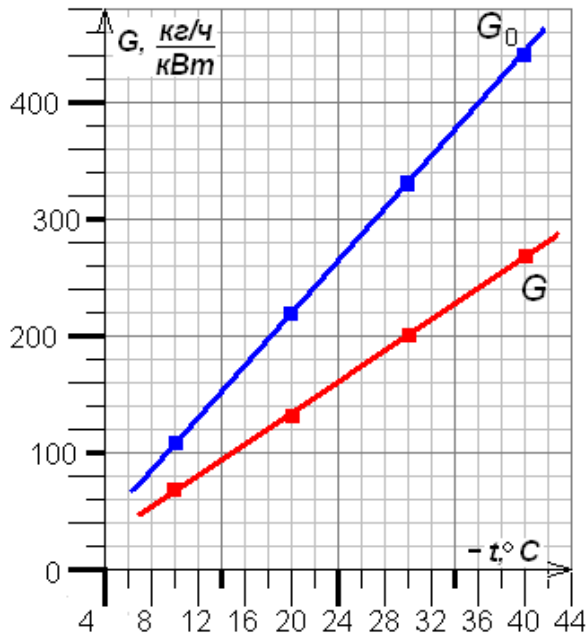


Рисунок 2.10 – Зависимость производительности аппарата от температуры воздуха: G_0 – эффективная, G – фактическая. Диаметр заправки 10 мм

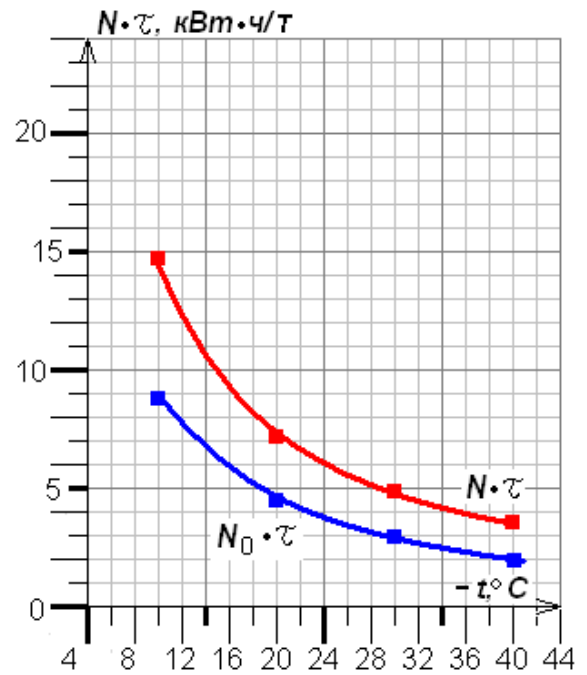


Рисунок 2.11 – Зависимость удельного расхода энергии на 1 т льда от температуры воздуха. N_0 – эффективная, N – фактическая. Диаметр заправки 10 мм

2.6 Выводы по разделу 2

1. Впервые осуществлено гранулирование льда в циркуляционном кипящем слое. Полученные гранулы имеют классическую овально-сферическую форму с размерами от 7 до 55 мм моно- и полифракционного состава, благодаря чему возможно широкое использование гранул в различных отраслях техники.

2. Поставлена математическая модель адиабатического намораживания льда на сферической грануле льда соответствующая классу задач Стефана, которая устанавливает движение границы раздела фаз. Путем численного решения полученной системы уравнений методом конечных разностей была

установлена высокая степень совпадения расчетных и практических результатов с разницей не более 4-5%.

3. Из условия сохранения теплового баланса процесса намораживания гранулированного льда в кипящем слое определена зависимость увеличения массы ледяных гранул от заданных параметров r_0 , S_0 , $t_{\text{вх}}$, $t_{\text{вых}}$, α , ψ , τ .

4. Определена зависимость максимальной удельной производительности аппарата от температуры воздуха $t_{\text{вх}}$ и размера гранул d . Получены значения эффективного и фактического расхода энергии на 1 тонну льда.

5. Установлена оптимальная степень орошения гранул.

3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ГРАНУЛИРОВАНИЯ ЛЬДА

Первые опыты по намораживанию гранулированного льда в кипящем слое были осуществлены в фонтанирующем кипящем слое [58]. Следующей попыткой осуществления такого процесса следует считать процесс в плоском псевдооживленном слое авторами В.И. Полтавцевым и С.Ю. Гончаровым. Режим оживления гранул затравки при этом был близок к режиму уноса. Производительность аппарата при таких условиях составила около 10 т/ч с одного метра кубического рабочего объема при температуре оживающего агента $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$.

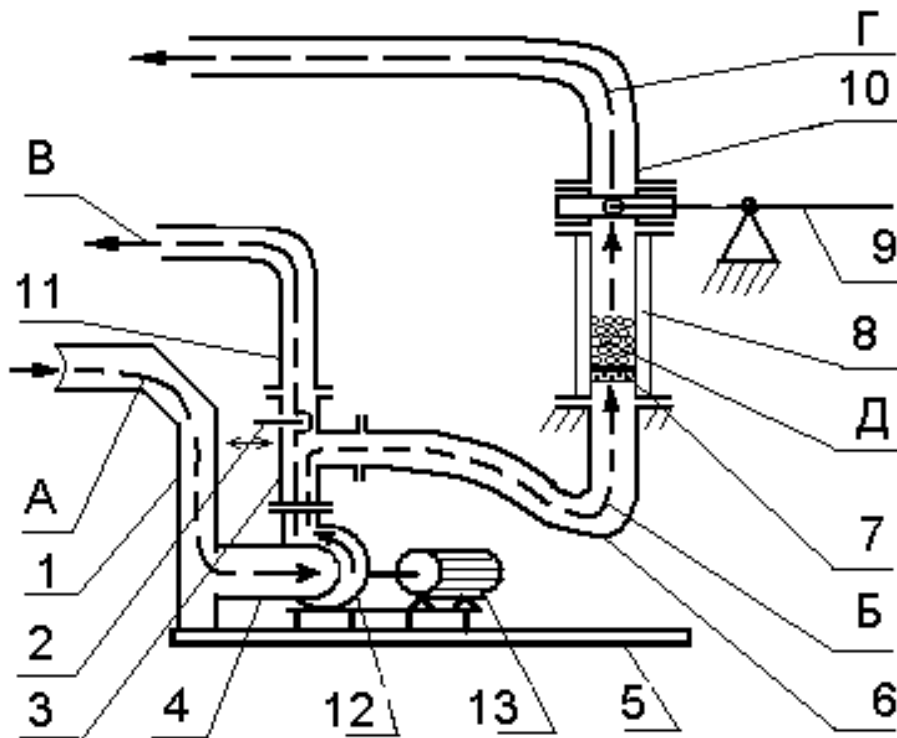
Кроме плоского кипящего слоя имеются другие формы псевдооживленного слоя с различными режимами кипения гранул, поэтому определение наиболее эффективного способа и режима псевдооживления вызвано в первую очередь острым практическим интересом.

3.1 Особенности конструкции и режима псевдооживления аппаратов с плоским и циркуляционным кипящим слоем

Принципиальным отличием данных аппаратов является форма рабочей камеры, которая целиком определяет вид псевдооживленного слоя.

Конструкция аппарата с плоским кипящим слоем. Аппарат с плоским кипящим слоем (рисунок 3.1) представляет собой камеру постоянного сечения с газораспределительной решеткой в её основании.

Работа установки происходит следующим образом. По всасывающему трубопроводу 1 и гибкому рукаву 4 вентилятором 12 засасывается холодный атмосферный воздух. Поток этого воздуха через тройник 3 по рукаву 6 подается через решетку 7 в камеру кипящего слоя 8. Загрузка камеры 8 ледяной затравкой производится через фланец выпускного трубопровода 10 при помощи рычага 9.



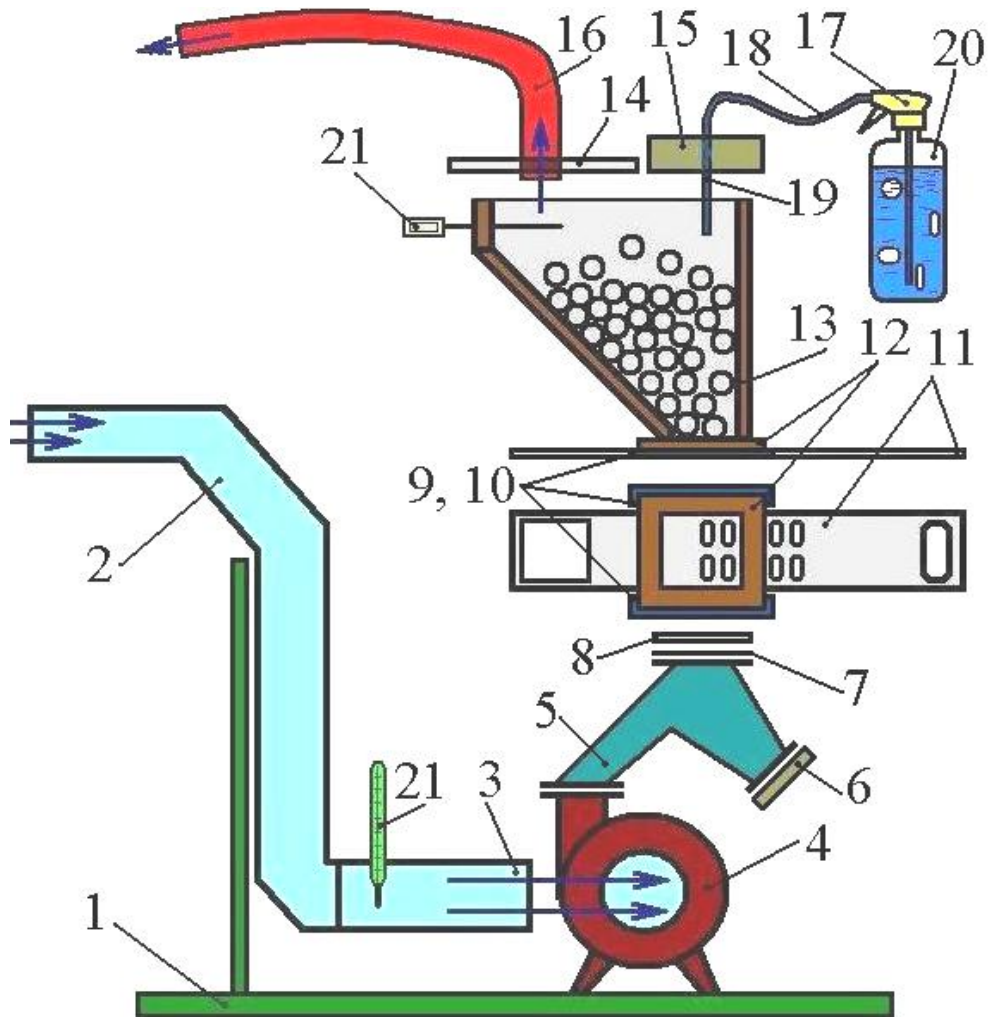
А – всасываемый поток холодного воздуха; Б – нагнетаемый поток холодного воздуха, температура которого на $1,5...2$ °С выше чем температура атмосферного воздуха; В – регулирующий поток; Г – поток нагретого воздуха; Д – ледяные частицы; 1 – всасывающий трубопровод; 2 – регулировочная заслонка; 3 – тройник; 4 – гибкий рукав; 5 – рама; 6 – рукав ввода в камеру; 7 – газораспределительная решетка; 8 – камера кипящего слоя; 9 – рычаг уплотнительного устройства; 10 – выпускной трубопровод; 11 – перепускной трубопровод; 12 – вентилятор; 13 – электродвигатель

Рисунок 3.1 – Установка с плоским кипящим слоем

С помощью регулировочной заслонки 2 нагнетаемый поток воздуха Б регулируется по величине (от режима начала кипения до режима устойчивого псевдооживления). Избыток воздуха В сбрасывается по трубопроводу 11.

Во время режима кипения гранул через отверстие во фланце выпускного трубопровода 10 впрыскивается вода, которая растекается и размазывается за счет перемешивания по поверхности гранул.

Аппарат с циркуляционным кипящим слоем. Циркуляционный кипящий слой [106] был исследован на экспериментальной установке той же мощности, что и плоский кипящий слой, различающийся конструкцией рабочей камеры, а также установкой управляющей заслонки (рисунок 3.2).



- 1 – рама; 2 – всасывающая труба; 3 – гибкий рукав; 4 – вентиляторная установка; 5 – распределитель; 6 – крышка; 7 – прокладка; 8 – промежуточный фланец; 9 – вкладыш; 10 – регулировочная прокладка; 11 – заслонка; 12 – фланец рабочей камеры; 13 – камера кипящего слоя; 14, 15 – крышки; 16 – выпускная труба; 17 – устройство подачи ледяной воды; 18 – гибкий шланг; 19 – штуцер; 20 – емкость; 21 – термометр

Рисунок 3.2 – Схема устройства аппарата с циркуляционным кипящим слоем

Установка состоит из рамы 1, где смонтированы всасывающая труба 2 и вентиляторная установка 4, соединенные друг с другом гибким рукавом 3. Выпускной патрубок вентиляторной установки соединен с распределителем 5 и камерой кипящего слоя 12. Между распределителем и камерой располагается заслонка 11, изменяющая поток воздуха, а также открывающая окно рабочей камеры при разгрузке аппарата. Фланец бокового наклонного окна распределителя 5 герметично закрыт крышкой 6. Камера кипящего слоя 13 закрыта в верхней части крышками 14 и 15.

С целью подачи ледяной воды в камеру кипящего слоя во время рабочего процесса применено устройство 17, представляющее собой ручной насос для подачи воды, соединённый гибким шлангом 18 со штуцером 19.

Охлаждение воды до температуры близкой 0°C осуществляется в ёмкости 20, которая предварительно загружается колотым льдом либо снегом. Для измерения температуры воздуха применены термометры 21.

Единичный цикл циркуляции гранул. Движение ледяных гранул в аппарате с циркуляционным кипящим слоем осуществляется по замкнутому контуру (рисунок 3.3), содержащему три характерные зоны, в которых отмечены:

- 1) унос (пневмо-транспорт);
- 2) осаждение;
- 3) скатывание ледяных гранул.

Зоны характерны размером (объемом), скоростью движения гранул, коэффициентом порозности слоя ε , скоростью потока воздуха, коэффициентом

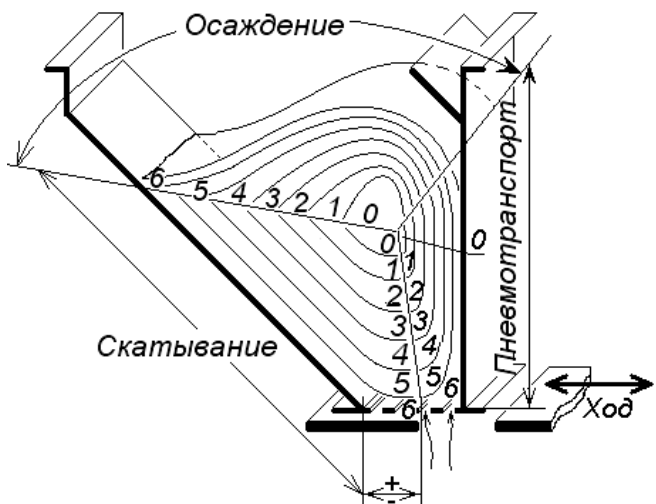


Рисунок 3.3 – Схема циркуляционного контура

теплоотдачи α , температурой твердой и газовой фаз, присутствием жидкой фазы.

Время единичного цикла движения гранул разбито соответственно на сумму трёх периодов движения твердой фазы:

$$\tau_u = \tau_y + \tau_o + \tau_c, \quad (3.1)$$

где τ_u - время одного цикла циркуляции гранул, τ_y - время периода уноса гранул, τ_o - время периода осаждения гранул, τ_c - время периода скатывания гранул, (с).

1 Зона уноса (пневмотранспорта) гранул снизу от газораспределительной решетки в верхнюю часть рабочей камеры непосредственно занимает пространство над решеткой. Порозность слоя гранул в ней стремится к $\varepsilon=1$ и составляет приблизительно $\varepsilon=0,6...0,75$ и $\varepsilon=0,5$ (для средне заполненного мелкой затравкой аппарата и для полного, соответственно). Увеличение диаметра гранул в процессе намораживания влечет за собой уменьшение коэффициента ε .

Так как скорость ожижающего агента в отверстиях газораспределительной решетки максимальна, то и коэффициент теплоотдачи в этой зоне, определяемый расчетным путем по известной корреляции [61], также максимален. Время уноса отдельных частиц составляет $\tau_y = 0,1...0,3 \text{ с}$.

2 Зона осаждения находится в верхней части рабочей камеры, сечение которой максимально расширено. Благодаря этому происходит осаждение частиц зернистой массы на поверхность ската. Порозность слоя составляет около $\varepsilon=0,7...0,9$. Увеличение порозности слоя влечет уменьшение коэффициента теплоотдачи, который здесь несколько меньше, чем в зоне пневмотранспорта. Время осаждения отдельных частиц $\tau_o = 0,1...0,3 \text{ с}$.

3 Зона скатывания характеризуется тесным контактом гранул, так как расположена в стороне от газораспределительной решетки. По этой причине интенсивность контакта газа с гранулами здесь минимальна. Порозность слоя в этой зоне равна порозности неподвижного слоя гранул, что составляет $\varepsilon=0,34$. Движение гранул осуществляется за счет скоса, по которому они скатываются. Период скатывания на два порядка превосходит время полета частиц и составляет $\tau_c = 2,0 \dots 6,0 \text{ с}$. Так как плотность упаковки гранул в этой зоне максимальная, происходит некоторое выравнивание температуры в частицах [16].

На основании выше изложенного можно считать, что время цикла циркуляции гранул составляет $\tau_y \approx 4,0 \text{ с}$ в зависимости от конструктивных параметров аппарата и размеров частиц льда.

Охлаждение гранул происходит в первой и второй зоне, общее время пребывания в которых колеблется от 0,2 до 0,6 секунд в зависимости от размера и случайного местоположения частицы в контуре циркуляции. Наиболее длительное движение совершают гранулы внешнего контура, а минимальное время движения у частиц центрального контура.

Рост диаметра частиц способствует увеличению времени пребывания их в пневмотранспорте, и, соответственно, продлению процесса охлаждения частиц.

3.2 Характеристика твердой и газовой фаз

Твердая фаза. Твердая фаза (лед) характеризуется фракционным составом частиц зернистой массы, которые по своей сути играют роль центров кристаллизации для будущих гранул льда, т.е. являются затравкой, которая может быть получена либо из крупных глыб льда путем дробления, либо кристаллизацией воды в специальных формах - кондукторе. Первым способом получают частицы с продолговатой формой и острыми гранями. При ситовой классификации данной зернистой массы частицы имеют

значительный разброс в размерах и массе. Все эти параметры неудовлетворительно влияют на процесс намораживания. Из-за увеличения угла естественного откоса колотых гранул ухудшается их циркуляция: появляется застойная зона, снижается скорость движения. Предрасположенность к уносу легких фракций затравки заставляет снизить предельно большую для крупных частиц скорость псевдоожижающего агента, в результате чего понижается теплоотдача от газа к твердым частицам [72].

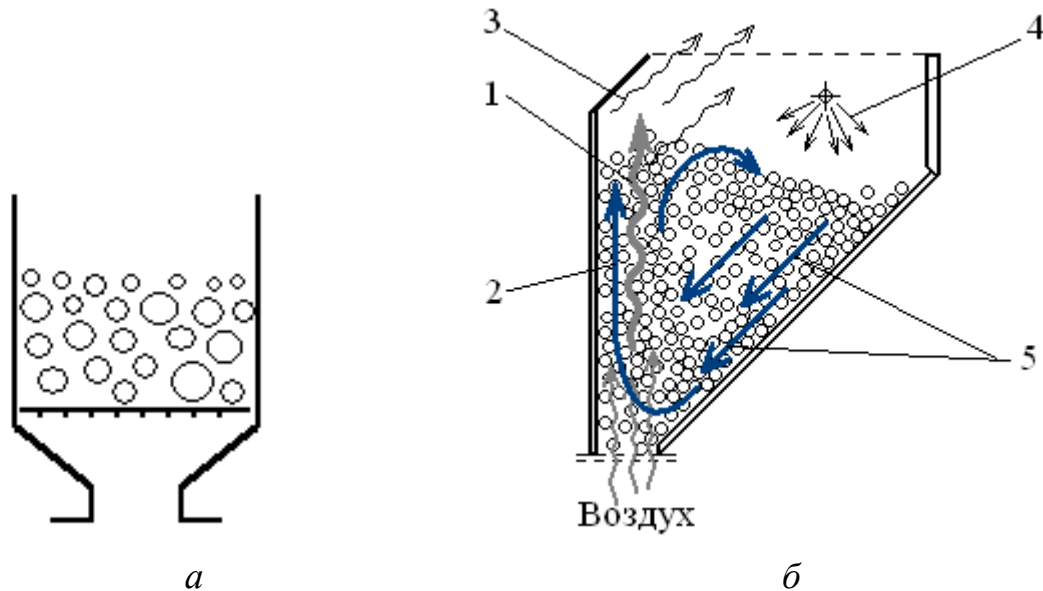
Перечисленные выше недостатки отсутствуют при циркуляции затравки из цельнолитых гранул, но из-за сложностей в их получении в основном применяются частицы «дроблѐнки». Кроме размеров и формы частиц затравки, также основной характеристикой твердой фазы является их количество.

Газовая фаза. Данная фаза представляет собой поток псевдоожижающего агента (воздуха), непременным условием для которого является отрицательная температура, т.е. $t_{\text{вх}} < 0$ °С. В процессе кристаллизации воды псевдоожижающий агент отводит выделившееся тепло фазового перехода. Из экспериментальной практики было замечено, что максимальная температура всасываемого воздуха, при которой процесс намораживания льда течет устойчиво, составляет -5 °С. Поэтому для большей экономии энергии предлагается использовать воздух из атмосферы в холодный период года.

Таким образом, характер процесса получения льда в кипящем слое определяется состоянием затравки: а) формой и размером гранул; б) фракционным составом гранул; в) количеством затравки, которое зависит от способа образования, а также от характеристик псевдоожижающего агента (воздуха).

3.3 Характеристика процесса орошения

Перемешивание ледяных гранул в кипящем слое. В плоском кипящем слое крупные гранулы осаждаются вниз [22], а мелкие всплывают вверх (рисунок 3.4).



a – плоский слой; *б* – циркуляционный слой; 1– псевдоожижающий агент;
2– гранулы затравки в зоне уноса; 3– нагретый газ; 4– вода;
5– гранулы затравки в зоне скатывания

Рисунок 3.4 – Схема намораживания гранулированного льда в кипящем слое

Интенсивность движения гранул (скорость движения и амплитуда) здесь ниже, чем в циркуляционном слое, где гранулы совершают циркуляцию (вертикально вверх – в сторону по дуге – вниз и в сторону) и определяется по формуле (3.1).

$$v^{\text{пл.}}=0,3...1,0 \text{ м/с} < v^{\text{ц.}}=10...12 \text{ м/с}; \quad (3.1)$$

$$L^{\text{пл.}}=0,3...1,0 \text{ м} < L^{\text{ц.}}=1,0...2,3 \text{ м}.$$

где $v^{\text{пл.}}$, $v^{\text{ц.}}$ – скорость движения гранул в плоском и циркуляционном кипящем слое, м/с; $L^{\text{пл.}}$, $L^{\text{ц.}}$ – амплитуда движения гранул в плоском и циркуляционном кипящем слое, м.

По этой причине скорость перемешивания частиц в плоском кипящем слое ниже, чем в циркуляционном кипящем слое.

Из-за того, что расход воды по поверхности намораживания является удельной величиной, то подача воды в плоском кипящем слое меньше, чем в циркуляционном. В противном случае происходит слипание отдельных гранул с последующим срывом режима ожигения. В циркуляционном кипящем слое из-за интенсивного перемешивания количество подаваемой воды является максимальным и определяется количеством тепла, отданного гранулами псевдоожижающему агенту.

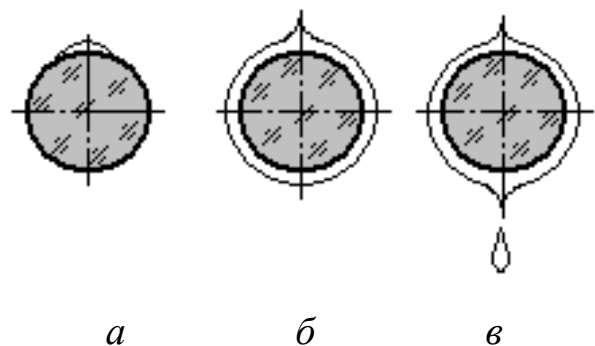
Режим орошения. Континуум жидкой фазы характеризуется режимом орошения. Так, в процессе намораживания льда возможно установить четыре режима этой операции: 1) скудный; 2) средний; 3) максимальный; 4) избыточный.

В зависимости от режима орошения взаимодействие каплей воды и гранулы затравки (рисунок 3.5) происходит с характерными особенностями.

1 При скудном орошении кристаллизация водной пленки наступает предельно быстро (по экспериментальным данным в течение 0,05...0,1 с), при этом на частицах образуются ледяные наросты в виде линз (рисунок 3.5, а), а получаемые при этом гранулы, имеют гладкую поверхность.

2 При средней степени орошения наблюдается подобная картина. Отличие в этом случае выражается в больших приростах льда за такой же промежуток времени.

3 Высокая степень



а – локальная капля; б – всеобъемлющая капля; в – капля с образованием и отрывом вторичных капель
Рисунок 3.5 – Схема взаимодействия капли воды с гранулой льда

орошения приводит к полному обтеканию частицы затравки каплей жидкости (рисунок 3.5, б). Образующаяся водная пленка сравнительно долго не замерзает (по экспериментальным данным до 1 мин), поэтому при тесном контакте гранул она частично разрушается и кристаллизуется в случайном положении в виде «шубы». Такие гранулы при выходе из слоя имеют шероховатую поверхность. Высокая степень орошения приводит к тому, что процесс намораживания становится неустойчивым, скорость циркуляции зернистого слоя при этом заметно снижается, вплоть до полной остановки в любой момент времени от незначительного переизбытка жидкой фазы.

4 При избыточном орошении частицы затравки полностью обтекаются водой с образованием вторичных капель (рисунок 3.5, в). В этом случае намораживание льда прекращается, так как избыток жидкости приводит к разогреву гранул до 0 °С.

Размазывание капель. При взаимодействии капель жидкости и гранул льда в циркуляционном кипящем слое установлен следующий экспериментальный факт: на выходе потока воздуха из аппарата отсутствует выброс каких-либо осколков льда. Объясняется это тем, что, во-первых, при псевдооживлении гранул с размерами от 7 до 55 мм в диаметре динамические нагрузки в слое высотой до 400 мм не превышают предел прочности льда. Во-вторых, в циркуляционном кипящем слое имеет место эффект размазывания капель жидкости по поверхности частиц затравки. Данное явление объяснимо свойством циркуляционного контура, обеспечивающего скатывание гранул по наклонной поверхности при минимальном зазоре. Благодаря этому соприкасающиеся друг с другом частицы затравки захватывают оставшуюся воду приблизительно поровну.

Практическая оценка орошения. Процессу намораживания льда в кипящем слое предшествуют процесс орошения и процесс размазывания воды по поверхности затравки. Качество орошения зависит от устройства

подачи воды в кипящий слой и может быть выражено через степень распыления:

$$k^s = s_1/S, \quad (3.2)$$

где k^s – степень распыления; s_1 – площадь водной пленки после распыления в течение одной секунды, м²; S – поверхность всех гранул, м².

Значение коэффициента k^s зависит от конструкции распыляющего устройства и не превышает 1,0.

В результате размазывания водной пленки происходит увеличение смоченной поверхности s_1 . Степень размазывания зависит от характера движения твердых частиц и представлена в виде:

$$k^l = s_2/s_1, \quad (3.3)$$

где k^l – степень размазывания; s_2 – поверхность водной пленки после распыления и размазывания, м².

Величина k^l зависит от интенсивности циркуляции гранул и подачи воды и превышает 1,0.

Конечная поверхность мокрого пятна воды s_2 с учетом распыления и размазывания равна:

$$s_2 = S \cdot k^s \cdot k^l. \quad (3.4)$$

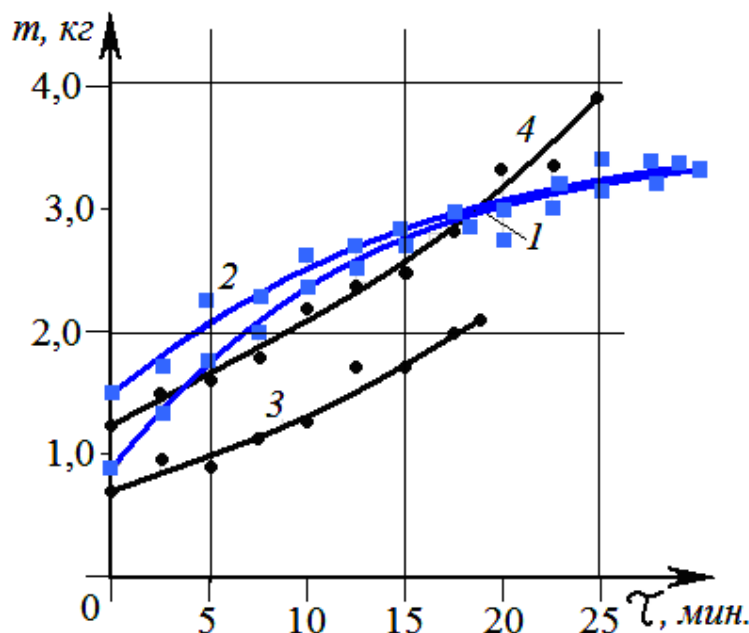
В расчетах процесса намораживания льда в циркуляционном кипящем слое с высокой точностью можно принять $s_2=S$. Объясняется это тем, что при практическом намораживании льда в кипящем слое наблюдается одновременно-полное смачивание частиц затравки, даже в случае использования самого примитивного распыляющего устройства (трубка постоянного сечения). При намораживания льда в плоском кипящем слое данного эффекта не наблюдалось. Приблизительно одновременно было смочено около 50% поверхности затравки.

На основании выше изложенного можно предположить, что наиболее эффективным способом псевдооживления ледяных гранул при

намораживании на их поверхности холодной воды является ожигание в циркуляционном кипящем слое.

3.4 Кинетика намораживания льда в кипящем слое

Скорость намораживания льда. Расчетом было определено что коэффициент теплоотдачи в кипящем слое α составляет более $400 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.



1, 2 – при $t > -5^\circ \text{C}$, 3, 4 – при $t < -5^\circ \text{C}$

Рисунок 3.6 – Зависимость изменения массы льда в аппарате с циркуляционным кипящим слоем с течением времени

Так как данный коэффициент зависит от размера и плотности частиц заправки, то на начальной стадии процесса намораживания льда при температуре псевдоожижающего агента на входе в рабочую камеру от -5°C и ниже наблюдается ускорение процесса (рисунок 3.6). При температуре воздуха выше -5°C скорость процесса

намораживания, наоборот, уменьшается.

Данное свойство объясняется разогревом псевдоожижающего агента (на 2°C) при преодолении давления слоя гранул. С увеличением их массы разогрев воздуха увеличивается (на $3...4^\circ \text{C}$) и тем самым скорость намораживания падает.

Влияние температуры воздуха на производительность. С понижением температуры воздуха удельная производительность аппарата

возрастает (рисунок 3.7). Причина этого явления заключается в том, что

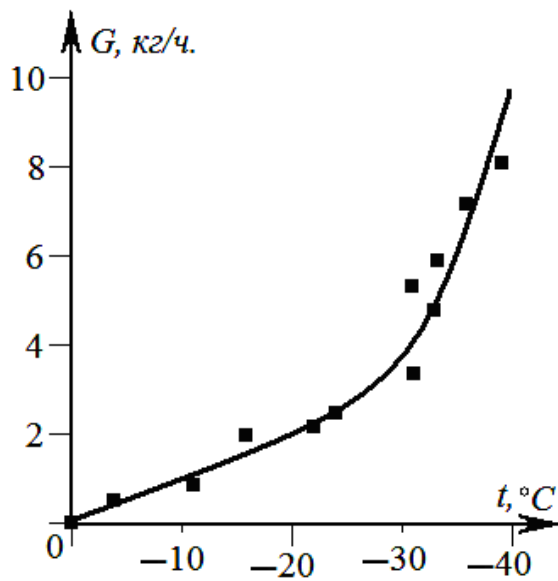


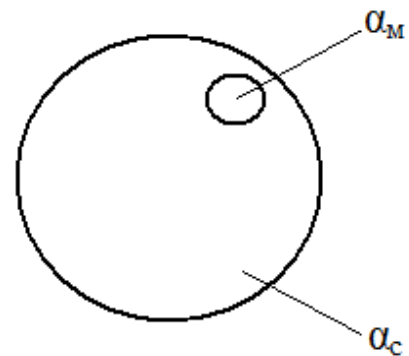
Рисунок 3.7 – Зависимость производительности опытного аппарата от температуры воздуха

поэтому констатируем, что скорость кристаллизации зависит от интенсивности охлаждения твердой и жидкой фаз.

Коэффициенты теплоотдачи от смоченной и сухой поверхности гранул имеют некоторое различие, поэтому при математическом моделировании процесса вводится отдельное обозначение коэффициентов теплоотдачи для смоченной и сухой поверхности гранул: α_m и α_c (рисунок 3.8).

скорость кристаллизации воды (и вообще большинства других веществ) связана показательной зависимостью с температурой расплава (в данном случае воды), и чем она ниже, тем быстрее протекает процесс кристаллизации.

Условия теплосъёма с поверхности гранул. Теплота, выделяемая при фазовом переходе «вода-лед», распространяется как в тело самих частиц, так и в обтекающий их газовый поток,



α_m – смоченной, α_c – сухой

Рисунок 3.8 – Коэффициенты теплоотдачи с поверхности

3.5 Тепловое воздействие капель на гранулы

Температура капли воды в начальный момент времени при растекании по поверхности гранулы равна $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Вследствие этого температура поверхности в момент падения капли скачком поднимается до $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Температуры мокрой поверхности гранулы в каждом цикле циркуляции зависит от объёма капли. Поскольку объём жидкости остается с постоянной температурой, то зависимость температуры мокрой поверхности от времени будет содержать начальный горизонтальный участок с последующим снижением по характеру некой экспоненты [125] (рисунок 3.9).



$0\text{ }^{\circ}\text{C}$ – пик температуры поверхности; $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ – установившаяся температура сухой поверхности гранул; $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ – температура псевдоожижающего агента; I, II, \dots, n – период циркуляции; $b_{\text{в}}, b_{\text{н}}$ – периоды фазового перехода капль жидкости при высокой и низкой степени орошения, соответственно

Рисунок 3.9 – Температура мокрой поверхности гранул при различной степени орошения

Интенсивность орошения в свою очередь влияет на крутизну снижения этих экспонент: чем интенсивнее орошение, тем более полого располагаются экспоненты, и наоборот. Более интенсивное орошение также приводит к

увеличению времени замерзания капель и, следовательно, к растягиванию горизонтальной площадки $b_v > b_n$.

В исследованиях тепловых свойств кипящего слоя [96] отмечено быстрое (в пределах нескольких секунд) установление температурного равновесия между воздухом и поверхностью нагреваемых или (как в данном случае) охлаждаемых частиц. Поэтому в работе принято равенство этих температур: температура поверхности гранул льда равна температуре воздуха на выходе из слоя. На рисунке 3.9 эта температура равна $-7\text{ }^\circ\text{C}$.

Характеристика тепловых импульсов капель воды в гранулах льда.

Кинетика прохождения единичного теплового импульса, инициированная каплей воды, имеет существенные особенности (рисунок 3.10). В первую очередь необходимо отметить, что капля при падении на гранулу смачивает некоторую замкнутую область, где происходит замерзание слоя воды. Выделившаяся при этом теплота образует тепловой импульс.

В зависимости от объёма капли этот импульс с максимальной температурой $0\text{ }^\circ\text{C}$ существует меньше или больше времени, в течение которого за счет теплопроводности образуется фронт температуры, движущийся внутрь гранулы (внутренняя полуволна), а снаружи замерзшая капля охлаждается псевдоожижающим агентом с образованием наружного фронта температуры (наружная полуволна), который простирается от максимума ($0\text{ }^\circ\text{C}$) до температуры поверхности, равновесной с газовым агентом. Область появления импульса локальна, а направление его движения совпадает с направлением диаметра сферы, что в сумме и составляет данные особенности.

На рисунке 3.11 показан объёмный график профиля тепловой волны. При нестационарном режиме орошения распространение фронта температуры от единичного теплового импульса происходит по всей поверхности гранулы в соответствии с её профилем.

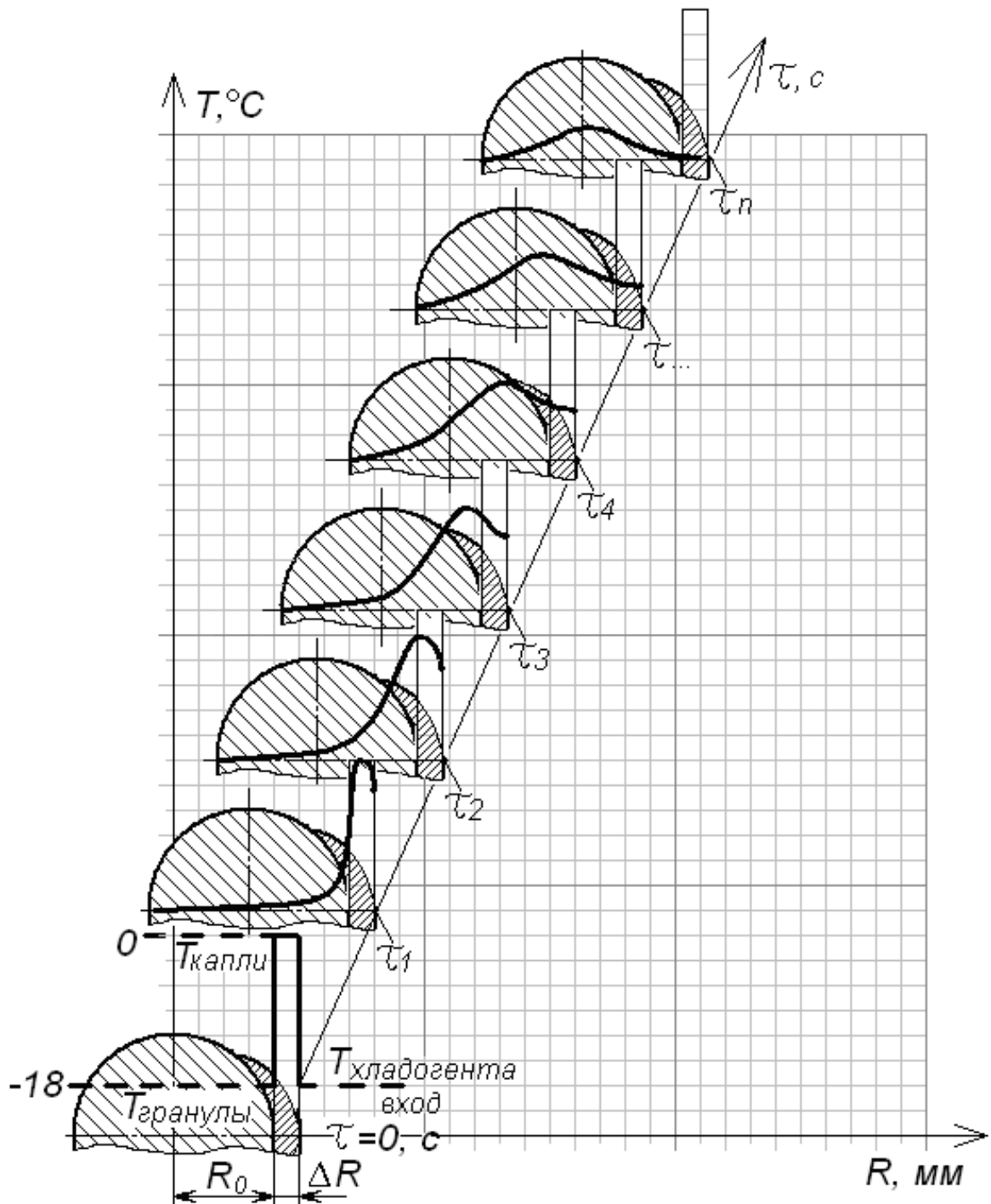


Рисунок 3.10 - Прохождение единичного теплового импульса в грануле

После достижения фронтом диаметрально противоположной поверхности сферы теплосъём идёт со всей сухой поверхности с коэффициентом теплоотдачи α_c , а с поверхности мокрого пятна α_m . Отсюда

после падения капли тепло уходит с её поверхности двумя потоками – dQ_m и dQ_c , что составляет ещё одну особенность данного процесса.

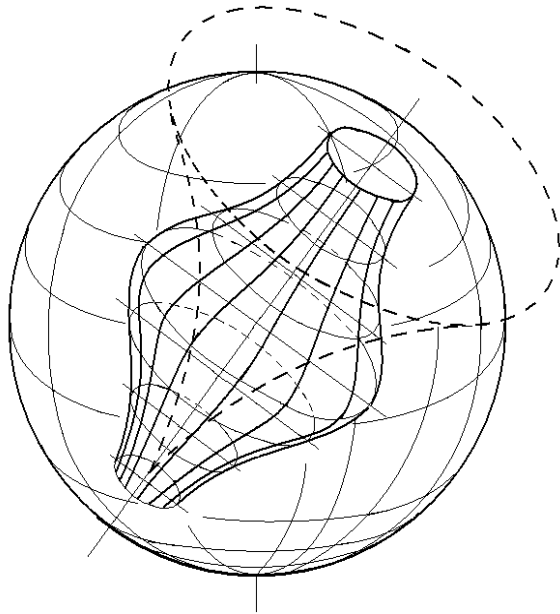


Рисунок 3.11 – Пространственное температурное поле гранулы после теплового импульса – «кувшин»

импульса в плоской стенке, толщина которой равна диаметру гранулы и составляет 15 мм, на основании решения А. В. Лыкова с граничными условиями первого рода это время получено порядка одной секунды. В течение цикла циркуляции происходит множество тепловых импульсов, каждый из которых добавляет рост температуры на определенную величину. В результате температурное поле гранулы приходит статистически в динамическое равновесие с псевдооживленным агентом, которое соответствует температуре агента на выходе. Эта особенность данного процесса показана на рисунке 3.12.

При любой исходной форме затравочных

Если бы на поверхность гранулы не попадали бы в дальнейшем капли воды, то кувшиноподобный профиль температуры терял бы свой максимум, и по прошествии достаточно большого отрезка времени гранула приходила бы к тепловому равновесию с псевдооживляющим агентом, т.е., к $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$.

При грубой оценке времени прохождения

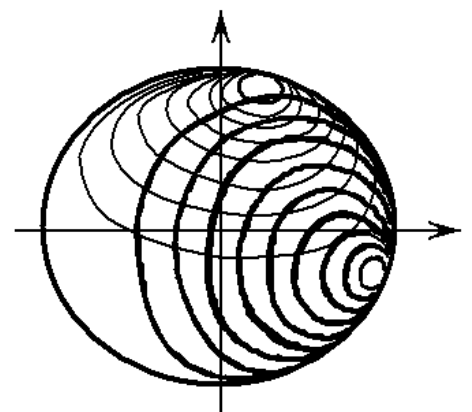
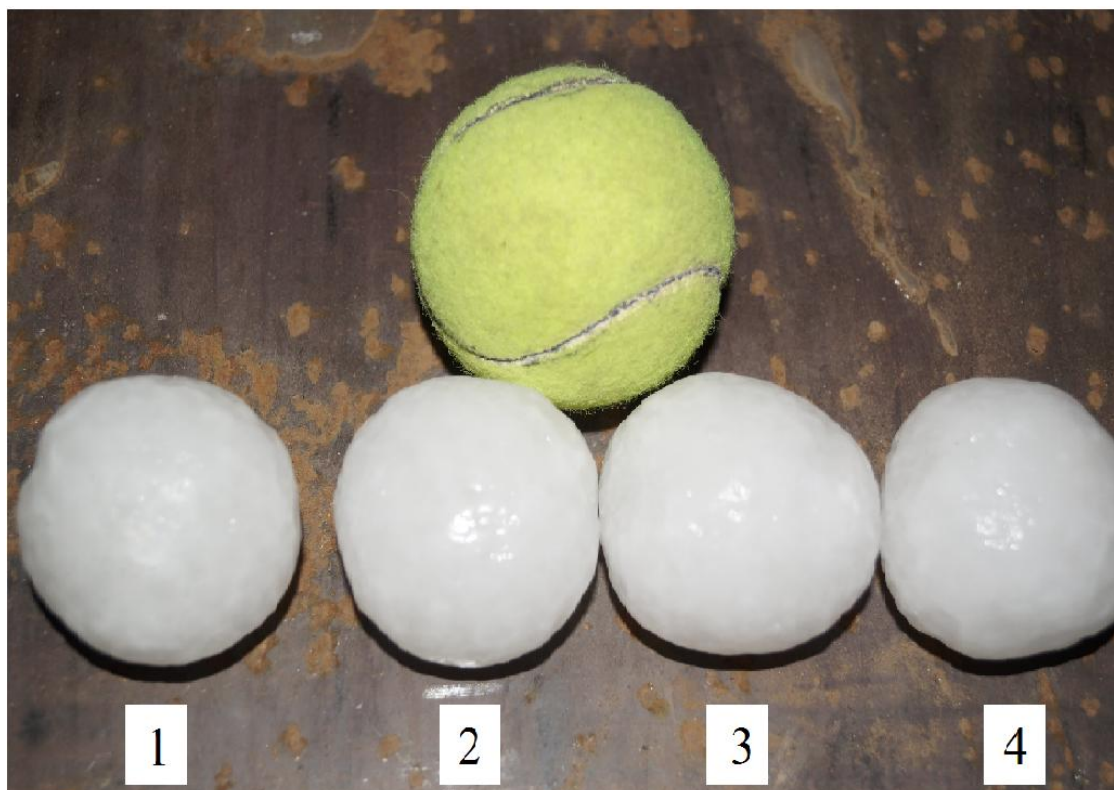


Рисунок 3.12 – Группа тепловых импульсов в грануле

гранул льда – плоская, кубическая и т.д. - полученные в процессе намораживания гранулы имеют сферическую поверхность (рисунок 3.13).



1- 52 мм; 2- 52мм; 3- 51,5мм; 4- 52 мм

Рисунок 3.13 – Овально-сферические гранулы льда, полученные в циркуляционном кипящем слое (вертикальный размер, мм)

3.6 Изменение фракционного состава гранул льда

Требования к фракционному составу гранул затравки для плоского кипящего слоя более узкие, чем для циркуляционного. Это связано с тем, что расширяющаяся кверху рабочая камера циркуляционного слоя гарантирует осаждение мелких частиц затравки, тогда как в плоском кипящем слое (если фракционный состав существенно не однороден) происходит унос мелких гранул [72].

Для определения фракционного состава гранул затравки и замороженных гранул был использован набор сит с диаметром отверстий 7, 10, 13, 17, 23 миллиметров. В результате было установлено, что в процессе

намораживания происходит незначительное дробление ледяных частиц. Основная часть гранул увеличилась, причём некоторые гранулы слиплись между собой и при этом образовались наибольшие частицы.

Изменение фракционного состава ледяных гранул до и после намораживания приведено на рисунок 3.14.

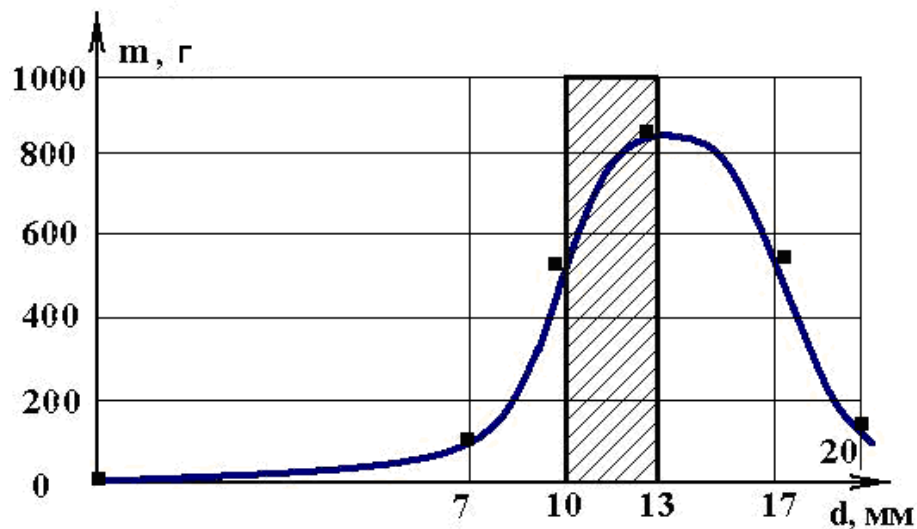


Рисунок 3.14 – Распределение фракционного состава гранул при намораживании в циркуляционном кипящем слое

Заштрихованный прямоугольник отражает исходный фракционный состав затравки. После намораживания большая часть гранул (порядка 70 %) оказалась увеличенной. Около 20 % частиц имело первоначальный диаметр, а 10 % гранул оказалось с меньшими размерами вследствие дробления.

Экспериментально определено, что дробление гранул связано с температурой воздуха, и при температуре воздуха от $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ниже сводится к минимуму.

3.7 Намораживание льда в статических условиях

Чтобы достоверно оценить поставленную математическую модель адиабатического намораживания льда, был проведен эксперимент по намораживанию льда на гранулах за счет внутреннего запаса холода. Так как

количество холода в данных условиях не восполняется (в отличие от процесса в кипящем слое), то подобный режим соответствует статическому условию намораживания.

Изготовление полусфер льда.

В пластмассовые формочки (колпачки) (рисунок 3.15), заливался охлажденный до температуры близкой к $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ калибруемый объем воды (рисунок 3.16, а). После кристаллизации воды на открытой поверхности полусферы образовывался выступ (рисунок 3.16, б), который механически удалялся.

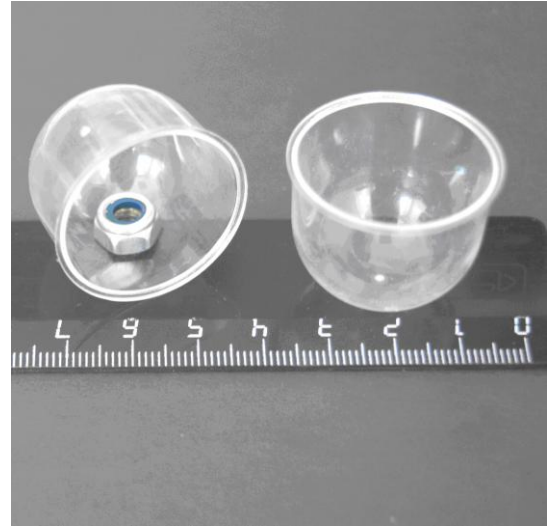
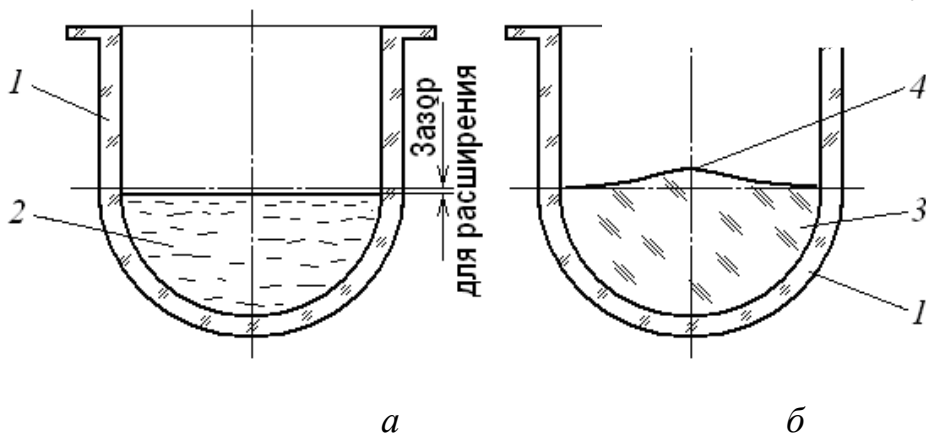


Рисунок 3.15 – Внешний вид и форма колпачков для изготовления ледяных полусфер



а – залитая форма; б – закристаллизованная форма; 1 – прозрачный полистирольный колпачок; 2 – калибруемый объем воды для замораживания полусферы льда; 3 – полусфера льда; 4 – выступ доньшка полусферы, образовавшийся при её замерзании

Рисунок 3.16 – Получение полусферы льда

Между обработанными поверхностями двух ледяными полусфер помещалась тяга из медной проволоки, изогнутая в виде петли на конце (рисунок 3.17). Затем данные поверхности смачивались водой и соединялись.

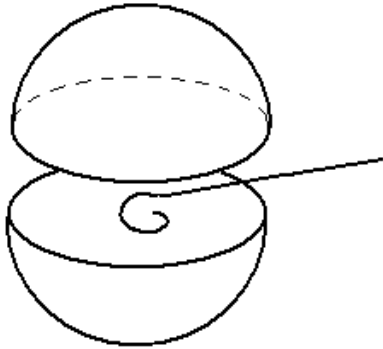
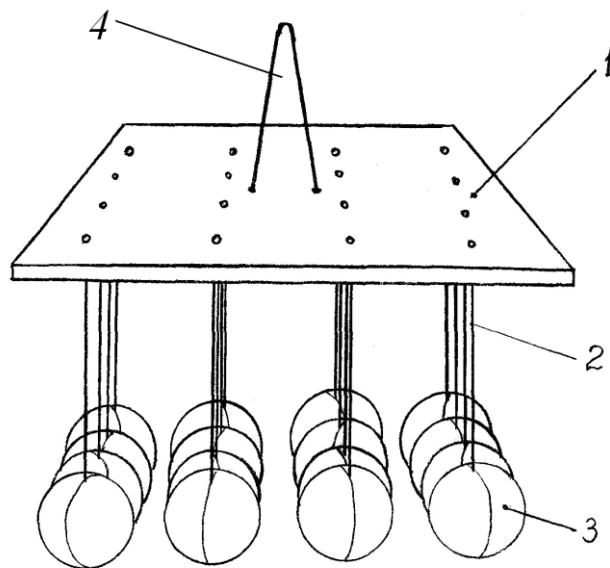


Рисунок 3.17 – Схема расположения тяги между полусферами льда

В результате были получены ледяные сферы с проволочной связью, которые затем были объединены в системе подвеса (рисунок 3.18).

Данная система представляет собой основание 1 с равномерно распределенными по площади отверстиями для закрепления медных проволок 2 со сферическими гранулами 3 на конце.



1 – основание; 2 – проволока; 3 – гранула; 4 – петля подвеса

Рисунок 3.18 – Система подвеса

Адиабатическое намораживание льда на сферических ледяных гранулах. Прежде чем произвести намораживание льда, подвесы с гранулами длительное время выдерживались на холоде. Это позволило

определить по температуре воздуха и массе льда степень переохлаждения гранул.

Затем при окунании гранул в воду с почти нулевой температурой и выдерживанием там различное время τ была определена удельная зависимость прироста льда от времени намораживания (рисунок 3.19).

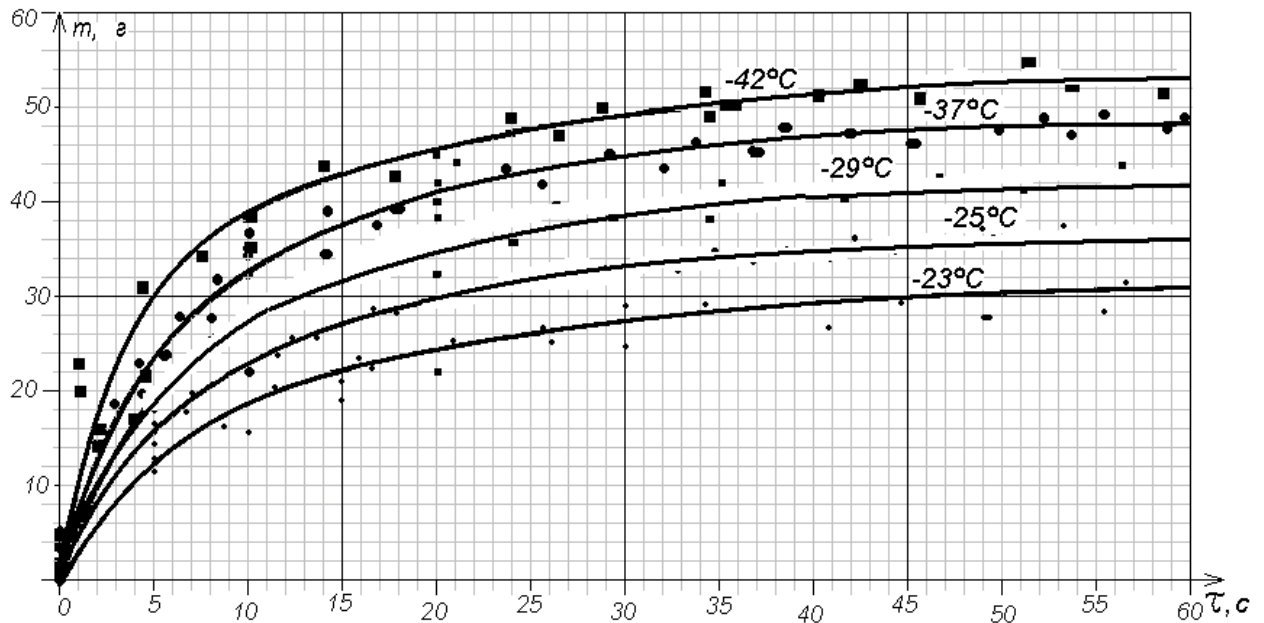


Рисунок 3.19 – Зависимости прироста массы гранул от времени намораживания (площадь поверхности частиц составляет $0,045 \text{ м}^2$)

Полученные экспериментальные данные свидетельствуют об определенной связи первоначальной скорости данного процесса с начальной температурой гранулы. Чтобы оценить данную особенность адиабатического намораживания, были рассмотрены экспериментальные данные за первые две секунды процесса, так как в этом промежутке времени, судя по графикам зависимостей на рисунке 3.19, скорость намораживания является практически постоянной.

Сравнение удельной скорости намораживания льда при различной начальной температуре ледяных гранул с диаметром 30 мм показало экспоненциальный характер данной зависимости от нуля грамм в секунду при температуре поверхности гранул 0° C или $273,15 \text{ K}$ до 190 грамм в секунду при температуре -42° C или $235,15 \text{ K}$ (рисунок 3.20).

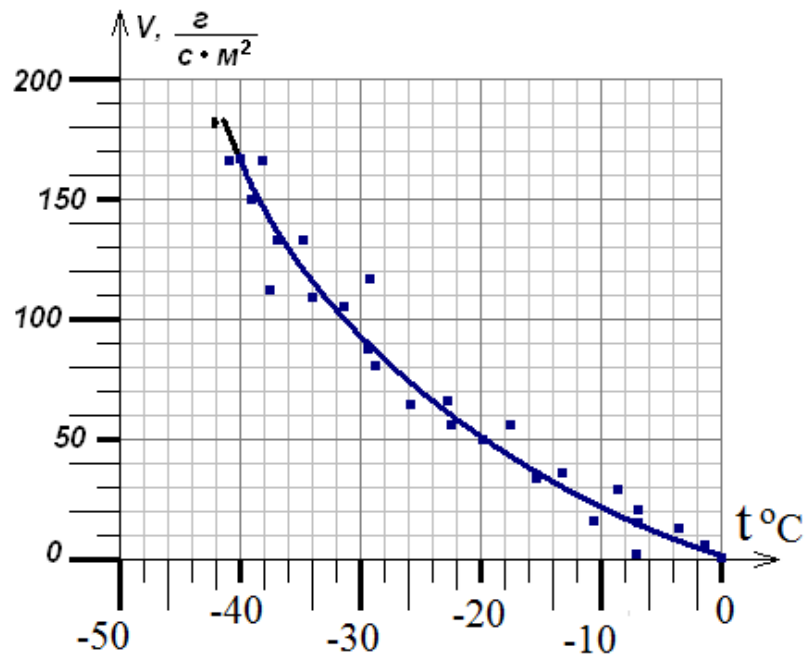


Рисунок 3.20 – Вероятностные значения скорости намораживания льда от температуры ($t^{\circ}\text{C}$, табл.3, стр.135).

3.8 Исследование подвижности снеговодяной суспензии

При строительстве ледовых переправ наиболее эффективно заливать ледяные гранулы снеговодяной суспензией. Но в этом случае высока вероятность неполного заполнения межгранульного пространства, что в свою очередь снижает прочность переправы. Поэтому с целью установления применимости снеговодяной суспензии в качестве связующего компонента для ледяных гранул были осуществлены опыты по определению динамических свойств (подвижность) снеговодяной суспензии в зависимости от количества снега в её составе.

Так как размер пор в зернистой массе находится в пределах 12 мм, то для определения подвижности снеговодяной суспензии использовалась решетка с круглыми отверстиями диаметром 12 мм. При проливе через решетку суспензии с разным процентным содержанием снега была получена зависимость снеговодяного остатка на решетке от степени насыщения (рисунок 3.21).

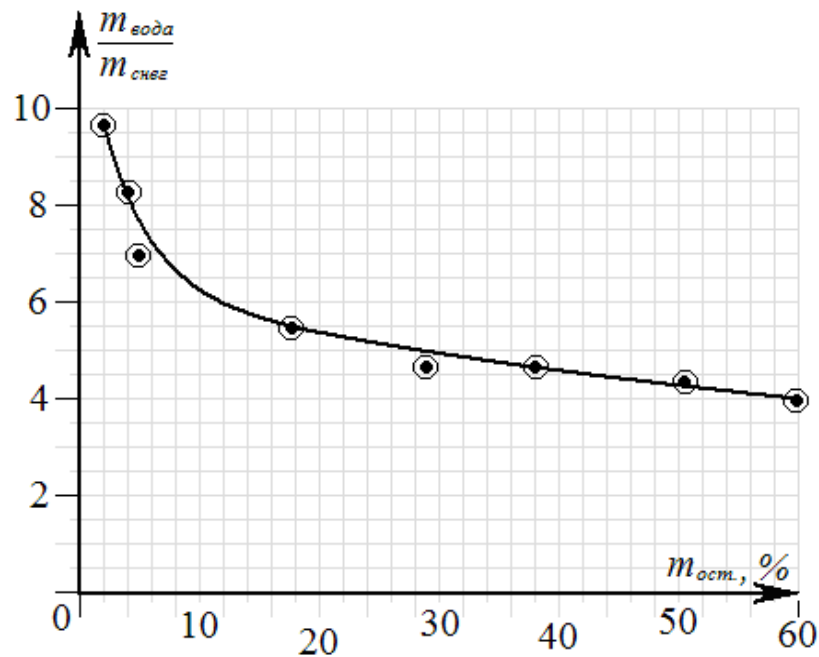


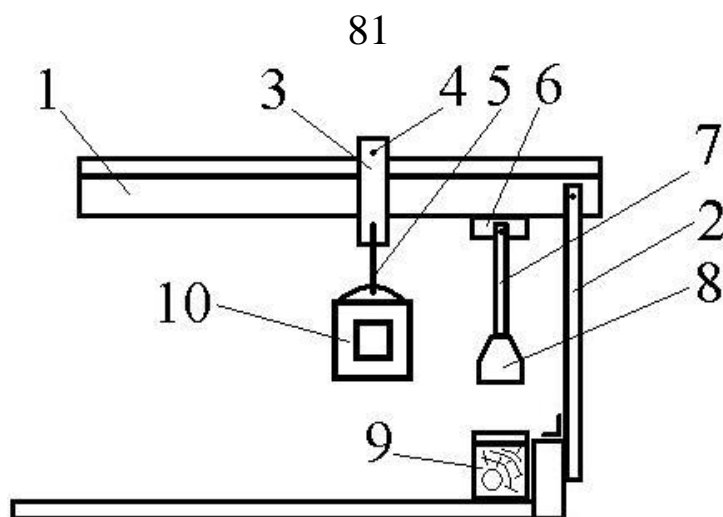
Рисунок 3.21 – Зависимость остатка снеговодяной суспензии на решетке с отверстиями 12 мм при температуре воздуха $t=-13^{\circ}\text{C}$

На основе экспериментальных данных было определено, что для удовлетворительного использования суспензии в качестве связующего компонента ледяных гранул количество воды должно превосходить количество снега по массе в пять и более раз.

Данное замечание может варьироваться в ту или другую сторону в зависимости от температуры воздуха и места, куда необходимо произвести заливку. Естественно, что чем ниже температура и меньше промежутки для заливки, тем больше воды должно содержаться в суспензии.

3.9 Несущая способность ледяных блоков на основе гранул льда

При помощи устройства, показанного на рисунок 3.22, были проведены испытания прочности на изгиб ледяных брусков залитых только водой и водой поверх ледяных гранул.



1 – рычаг; 2- рама; 3 – бегунок; 4 – ролик; 5 – крюк; 6 – шарнир;
7 – штанга; 8 – боек; 9 – опора; 10 – груз

Рисунок 3.22 – Устройство для испытания ледяного материала на прочность

Ледяные бруски с цельной и с композитной структурой изгибали штангой 7 с бойком 8. Образцы при этом размещали на двух шипах опоры 9. Расстояние между шипами 400 мм. Усилие штанги изменяли, перемещая бегунок 3 с грузом 10 по рычагу 1.

Результаты прочностных испытаний ледяных брусков представлены в таблице 1П.Б. приложения. Оказалось, что прочность композитных ледяных брусков на 32-38% выше прочности подобных брусков из чистого льда.

3.10 Выводы по разделу 3

1. Определено, что циркуляционный кипящий слой является предпочтительной формой псевдооживления ледяных гранул при намораживании на их поверхности водной пленки, так как интенсивное перемешивание слоя приводит к размазыванию пленок жидкости на поверхности гранул, что приводит к одновременному участию в процессе намораживания всех частиц затравки.

2. Циркуляция частиц в аппарате происходит по замкнутому контуру с тремя характерными зонами: 1) зоной пневмотранспорта; 2) осаждения; 3) скатывания. Время одного цикла циркуляции колеблется в интервале 5 с.

3. В процессе имеет место эффект быстрого наступления теплового равновесия в фазах лед-воздух, что создает условия контроля расхода воды в зависимости от температуры последнего на выходе из аппарата, оптимальное значение которой составляет $-3...-5$ °С.

4. При температуре наружного воздуха ниже -5 °С кристаллизация воды в кипящем слое идет устойчиво, причем скорость процесса возрастает с понижением температуры.

5. Экспериментально определен интервал скорости намораживания льда на сферических гранулах от $0,011$ кг/с·м² при -5 °С до $0,190$ кг/с·м² при -42 °С в адиабатических условиях.

6. Исследование фракционного состава гранул затравки показало отсутствие дробления частиц льда вследствие трения друг с другом, что исключает унос части слоя с выхлопными газами.

7. Использование снеговодяной суспензии в качестве связующего компонента ледяных гранул ограничено её текучестью, которая зависит от содержания снега в её составе, не превышающего по массе $1/5$ части.

8. На основе экспериментальных данных определено, что несущая способность ледяных брусков на основе гранулированного льда на $32...38$ % выше прочности подобных брусков из чистого льда

4 АППАРАТУРНОЕ ОФОРМЛЕНИЕ ПРОЦЕССА

Процесс намораживания гранулированного льда в циркуляционном кипящем слое в настоящее время готово к промышленному применению в силу окончания стадии исследования. Данное исследование охватывает и аппаратное оформление, которое, касаясь принципов действия, тождественно другим процессам: дробление, классификация, псевдоожижение, орошение и пр., однако в силу специфических свойств водного льда предложенное оборудование имеет существенные изменения.

Анализ работоспособности различных конструктивных решений аппаратного оформления процесса намораживания гранулированного льда в циркуляционном кипящем слое является необходимым действием для применения данной технологии в промышленных масштабах.

4.1 Приготовление затравки

При промышленных масштабах производства проблема получения качественной затравки является очень актуальной, так как производительность аппарата увеличивается для гранул правильной формы с монофракционным составом. Существуют два принципиальных способа получения затравки.

Кристаллизация воды в форме. Операция осуществляется в кондукторе (рисунок 4.1), представляющем собой прямоугольную ванну, внутрь которой встроена формовочная решётка [107]. При замораживании воды в кондукторе получается затравка, представляющая собой гранулы кубической формы. Чтобы придать гранулам шарообразную форму, затравка подвергается предварительному ожижению без подачи воды в кипящем слое. Интенсивное взаимодействие ледяных гранул друг с другом приводит к скалыванию углов кубиков, и их форма приближается к форме граненой сферы.



Рисунок 4.1 – Кондуктор для получения заправки льда

Недостатком данного способа является трудность извлечения готовых гранул из кондуктора, так как в процессе кристаллизации гранулы заправки становятся плотно сжатыми в ячейках формовочной решётки вследствие увеличения размеров.

Для облегчения извлечения гранул предлагается кондуктор слегка нагреть либо выполнить его полости разборными.

Дробление ледяных кусков. Процесс является весьма энергоёмким, при этом одной из стадий получения заправки является классификация раздробленного материала. На рисунке 4.2 представлен ручной способ дробления.

Непрерывный процесс получения льда требует создания непрерывного способа получения заправки. Для этого возможно использование стандартного ряда дробилок различного назначения.



а



б



в



г

а – отбор материала; б – дробление; в – классификация; г – конечные гранулы

Рисунок 4.2 – Дробление крупных ледяных кусков

Экспериментально определено предпочтение использования дробилок ударного типа.

4.2 Форма и размеры рабочей камеры и частиц затравки

Скос основания. Рабочая камера псевдооживленного циркуляционного слоя представляет собой прямоугольный параллелепипед, в основании которого с целью задания циркуляции гранул выполнен скос (рисунок 4.3). Экспериментально определен оптимальный угол между скосом и горизонтальной плоскостью. Он составляет приблизительно 45° . В аппарате с меньшим углом скоса основная часть гранул находится в стороне от

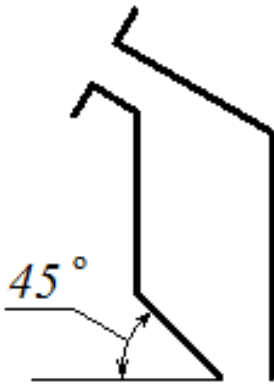


Рисунок 4.3 – Схема рабочей камеры

газораспределительной решетки, что влечет за собой «проскок» псевдоожигающего агента.

Если скос выполнен «круто», то это ведет к нарушению циркуляции гранул.

Угол в 45° хорошо подходит для частиц со сферической формой, но так как реальные частицы затравки, получаемые дроблением, имеют неправильную продолговатую форму с острыми гранями, то рекомендуется угол скоса выбирать около 50...53° в зависимости от размера

ледяных фракций.

Угол естественного откоса сферических гранул затравки приведен на рисунке 4.4.

При промышленном производстве необходимо организовать получение затравки в заданном объеме, а также непосредственно в аппарате.

Процесс дробления льда имеет существенный недостаток, заключающийся в образовании гранул со значительным разбросом размеров, вплоть до мельчайших частиц.

Поэтому с целью использования максимального количества гранул необходимо увеличить угол скоса основания рабочей камеры настолько, чтобы он превышал угол естественного откоса самых мелких частиц затравки. Иначе может образоваться застой части гранул в верхней зоне скоса. Даже если угол скоса достаточно велик, возможен застой в нижней

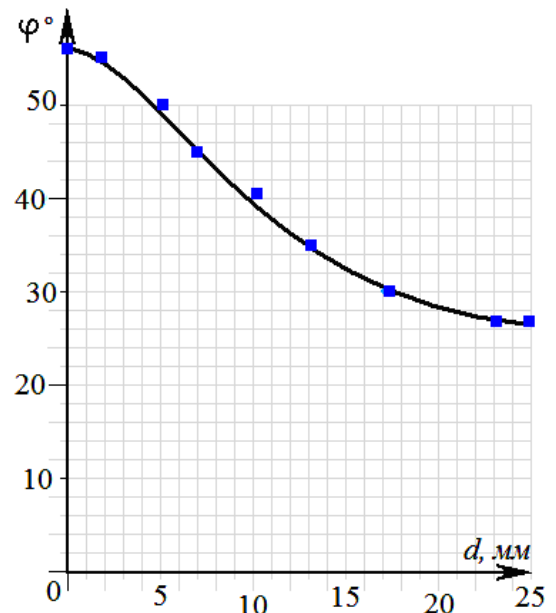


Рисунок 4.4 – Угол естественного откоса гранул затравки

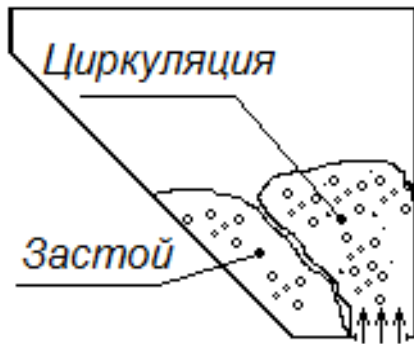


Рисунок 4.5 – Схема образования застойных зон

части скоса в начале периодического процесса при не полностью открытой заслонке из-за фактически нулевого угла скоса (рисунок 4.5).

При загрузке аппарата гранулами с повышенной слеживаемостью (частицы с размерами менее 7 мм или частицы с острыми кромками) образуются газовые каналы.

Размеры затравки и режим ожигения. На основании опытов по использованию снега в качестве ледяной затравки можно заключить, что малые размеры гранул затравки приводят к мгновенному слеживанию частиц при загрузке рабочей камеры и, следовательно, к фильтрованию псевдоожижающего агента через слой при пуске аппарата. В этом случае для придания циркуляции всей ледяной массе рабочую камеру подвергали толчкам и вибрации.

При полифракционном составе затравки в процессе псевдоожижения мелкие частицы выносятся из аппарата струями воздуха, образованными в отверстиях газораспределительной решетки. Регулировка скорости псевдоожижающего агента в отверстиях решетки технически осуществима, но более простым и надежным решением проблемы уноса мелких частиц из аппарата является регулировка выхлопа. Особенно важно здесь то, что при ограниченном потоке выхлопных газов возможно большее открытие регулировочной заслонки в основании рабочей камеры, чем при свободном выхлопе. Это свойство особенно актуально в начале процесса, когда количество ледяных гранул ограничено, вследствие чего приходится открывать заслонку не полностью, что в свою очередь приводит к застойной зоне (см. рисунок 4.5).

Форма впускной щели. Важную роль в устойчивой работе аппарата играет форма щели газораспределительной решетки, составляющая группу основных элементов конструкции аппарата. Также значительное влияние оказывает развитие боковых поверхностей рабочей камеры. В случае вытянутой щели (рисунок 4.6, б, в) боковые поверхности развиты неравнозначно по отношению друг к другу. Из-за чего псевдоожигающий агент проскакивает вдоль «выгодных» поверхностей, при этом коэффициент теплообмена имеет низкое значение. Наиболее рациональна форма щели распределительной решетки в виде квадрата либо прямоугольника с близкими размерами сторон (рисунок 4.6, а). Круг является инверсией этого направления и развития, поскольку циркуляционный слой обращается в фонтан (рисунок 4.6, г).

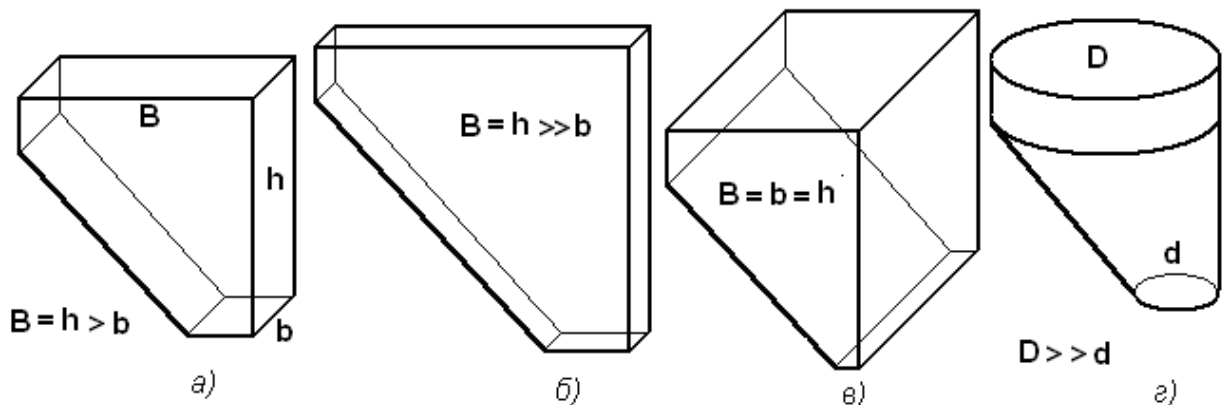
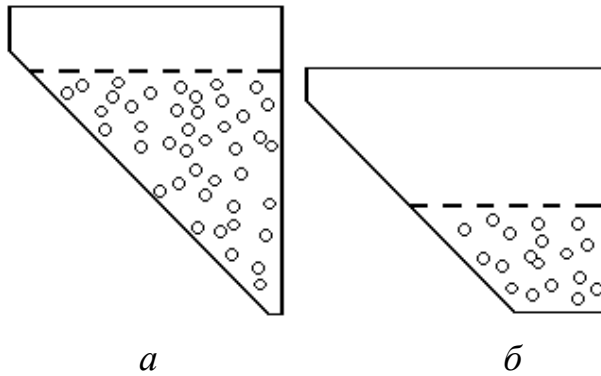


Рисунок 4.6 – Формирование оптимальной геометрии рабочего объема

Ещё одна разновидность профиля рабочей камеры показана на рисунке 4.7. Вариант с узкой щелью (рисунок 4.7, а) имеет низкое соотношение площади решетки к суммарной поверхности всех гранул. В этом случае возможно псевдоожигание максимального количества гранул затравки. Вариант с широкой щелью (рисунок 4.7, б) имеет предельно высокое соотношение площади решетки к поверхности всех гранул, но здесь в этом случае масса затравки минимальная. После испытания лабораторных моделей было определено, что форма распределительной решетки должна



а – с узкой; б – с широкой щелью

Рисунок 4.7 – Профиль загруженной рабочей камеры

приближаться к квадратной или прямоугольной со сторонами в соотношении $1 : 1,2 \dots 1,3$.

Особенности конструкции рабочей камеры.

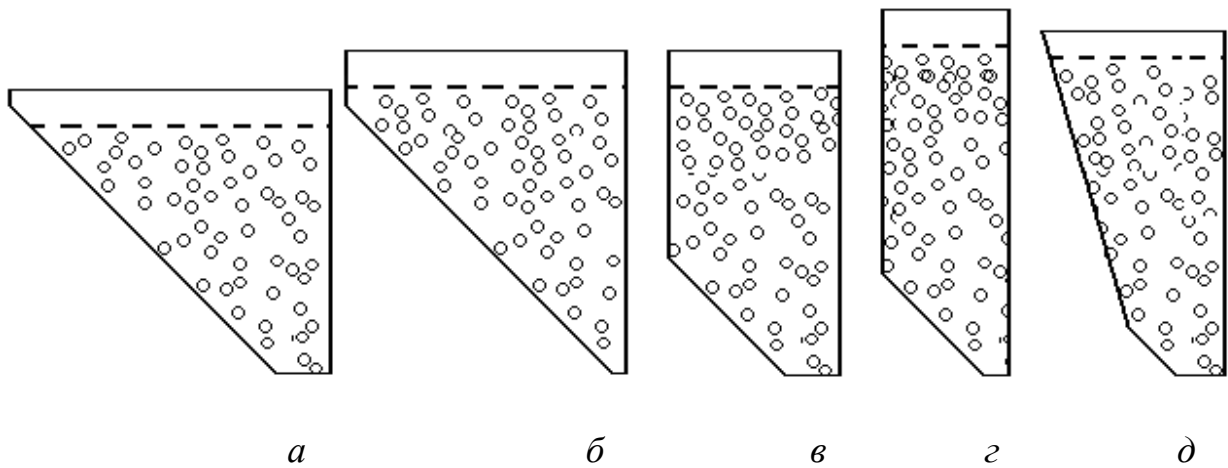
Устройство скоса рабочей камеры в значительной степени определяют номинальную высоту слоя гранул, их массу и суммарную поверхность, коэффициент

теплообмена и др. параметры процесса. На рисунке 4.8 представлены варианты развития скоса и щели газораспределительной решетки.

Вариант а) характеризуется стабильной циркуляцией зернистого слоя, высоким значением теплообмена, а также позволяет использование полифракционной затравки. Для данной конструкции рабочей камеры высота зернистого слоя минимальна и, следовательно, необходимо с осторожностью подходить к развитию газораспределительной решетки, иначе возможно падение коэффициента теплообмена.

Вариант б) отличается от **а)** более высоким номинальным слоем гранул, из-за чего контур циркуляции характеризуется наличием вертикальной шахты, что улучшает коэффициент теплоотдачи, но при этом уменьшается доля псевдооживленной поверхности.

Варианты в) и г) имеют укороченный скос, что приводит к увеличению доли гранул, расположенной над газораспределительной решеткой, благодаря чему коэффициент теплоотдачи увеличивается. Но в этом случае возможны всплески слоя или даже прекращение циркуляции.



а – развитые скос и газораспределительная решетка; б – скос развитый, решетка узкая; в – скос усечен, решетка развита; г – усеченные скос и решетка; д – скос с разным углом наклона, решетка развита

Рисунок 4.8 – Вариативность развития профиля рабочей камеры

Вариант д) имеет промежуточные свойства между цельным и усеченным скосом. За счет ломаного скоса здесь соединяются свойства плоско кипящего слоя и циркуляционного. Режим кипения в этом случае во многом схож с фонтанирующим кипящим слоем.

Технологическая и конструктивная простота льдогенератора с кипящим слоем выдвигает подобную технологию в ряд прогрессивных способов, а использование холодного атмосферного воздуха позволяет сберечь значительное количество электроэнергии.

4.3 Сравнительная характеристика льдогенераторов

Наиболее массовыми льдогенераторами являются аппараты чешуйчатого льда. Лучшие среди данных конструкций для получения 100 килограммов льда в час имеют мощность более 10 кВт [8, 12]. Одновременно существуют установки со значительно большей производительностью для создания и эксплуатации ледовых и снежных трасс, катков, переправ и т.д., такие как установка «Град», снежные пушки и т.п. Получаемые с их помощью

ледяные массы имеют монолитную структуру, что требует дополнительных затрат энергии на дробление массива льда при его потреблении.

В результате проведенных исследований разработан способ получения искусственного льда в циркуляционном кипящем слое.

Данный способ характеризуется низкой трудоемкостью процесса, высокой производительностью аппарата при намораживании за счет холодного воздуха в зимнее время и низким энергопотреблением [приложение Б]. Кроме того, способ отличается исключением механических операций (таких, как распиливание, раскалывание и т.д.), благодаря чему способ намораживания льда в циркуляционном кипящем слое дает лед в виде продукции, которая затем легко складывается. Следовательно, производство льда можно организовать непосредственно в складе, что снизит до минимума затраты на транспортировку и складирование.

Так как получаемые гранулы льда имеют оптимальные размеры для непосредственного использования при охлаждении пищевых продуктов, например, рыбы в витринах универмагов или транспортировки молока, то дробление гранул также исключается.

Технико-экономические показатели существующих льдогенераторов и предлагаемого приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1. Сравнительная характеристика льдогенераторов

Показатель	Барабанный	Льдогенератор с кипящим слоем
1. Производительность, кг/ч;	100	100
2. Масса аппарата, кг;	3500	500
3. Мощность, кВт;	15	1
4. Съём льда;	фреза	отсутствует
5. Коэффициенты теплоотдачи, Вт/(м ² • К);	100	400

Сопоставляя технико-экономические показатели существующих льдогенераторов и предлагаемого, следует отметить, что:

1. Отдельные технические особенности и операции (охлаждение воды, ее подача, выгрузка льда и т.п.) являются одинаковыми для всех льдогенераторов, поскольку все они производят одинаковую продукцию – лед.

2. В предложенном способе на съем льда нет расхода энергии, поскольку гранулы откатываются из кипящего слоя за счет их динамического движения при псевдооживлении.

3. Коэффициент теплоотдачи в кипящем слое признан научными школами наиболее высоким (именно для кипящего слоя) за счет большой скорости хладагента.

4. Для барабанных льдогенераторов длина пути отвода тепла замерзания (толщина слоя льда) равна миллиметрам, а для предложенной конструкции – доли мм.

5. Единственное преимущество барабанных льдогенераторов заключено в отсутствии промежуточного теплообменника между барабаном и холодильной машиной.

6. В предложенной конструкции льдогенератора отсутствуют механические движущиеся устройства и узлы.

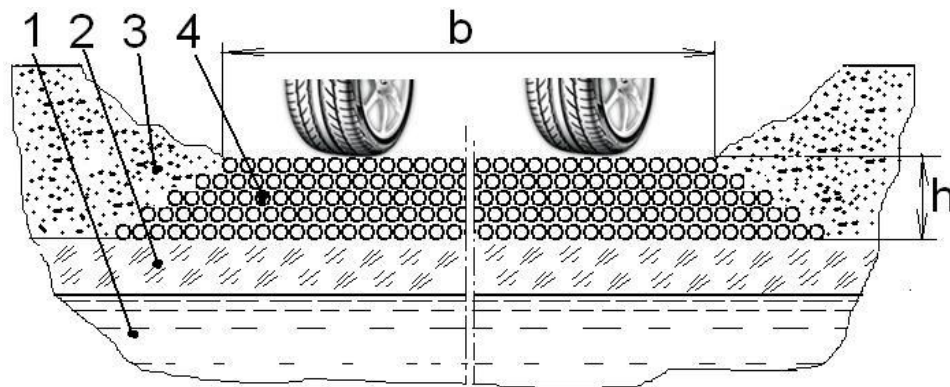
4.4 Ускорение строительства ледовых переправ

Ледовые переправы через реки и водохранилища устраивают в условиях начала зимы с устойчивой отрицательной температурой воздуха. Ледяной покров водоема должен обладать достаточной грузоподъемностью, а глубина воды подо льдом на переправе в течение всего периода ее функционирования должна быть не менее 1 м.

Строительство подобного сооружения отличается значительной трудоемкостью и в значительной степени определяется температурой

атмосферы. Поэтому при отсутствии сильных морозов строительство затягивается или вовсе не осуществимо [65]. Период времени года, когда температура воздуха колеблется от 0 до -7°C даже для Сибири может длиться 1...1,5 месяца. Толщина льда на реках в это время не превышает нескольких сантиметров.

Для строительства ледовой переправы при слабом морозе нужен готовый лед в виде гранул [108]. Лучшими будут частицы сферической формы в диаметре до 50 мм. Если на тонкий лед реки, который в состоянии выдержать человека, насыпать такие гранулы (рисунок 4.9), а затем залить их холодной водой, то данный слой толщиной 15 см застынет при температуре -7°C за четыре часа.



- 1 – вода; 2 – ледяная поверхность реки; 3 – снежный бурт;
4 – гранулированный лед

Рисунок 4.9 – Ледовая переправа с применением гранулированного льда

Если холодную воду смешать со снегом и полученной снеговодяной суспензией залить гранулированную массу, то время кристаллизации такого слоя будет еще меньше. Но заливка суспензии осложняется мгновенным схватыванием кристаллов снега между собой и ледяными гранулами, в результате чего происходит закупоривание пустот блока, несущая прочность которого при этом существенно снижается. Чтобы этого избежать, были проведены эксперименты по определению подходящего состава снеговодяной суспензии [раздел 3].

Укладка ледовой переправы с использованием гранулированного льда. Традиционно строительство ледовой переправы начинают, когда поверхность реки полностью покрывается достаточно прочным льдом, способным выдерживать людей и легкое оборудование, например, мотто помпы. До этого момента непосредственное строительство не ведется. В этот период возможна только заготовка материала на берегу: досок, бревен и проведение вспомогательных работ.

Для сокращения сроков строительства необходимы устройства, позволяющие вести укладку ледовой переправы на водоеме частично или полностью покрытым тонким льдом. Такие устройства должны плавать либо двигаться по льду, оказывая достаточно низкое давление на его поверхность.

Вариант подобного устройства следующий:

- на некотором расстоянии от берега неподвижно устанавливают на якорях лодку, которая играет роль опоры (рисунок 4.10);

- на лодку с берега опирается горизонтальная штанга, по которой осуществляется

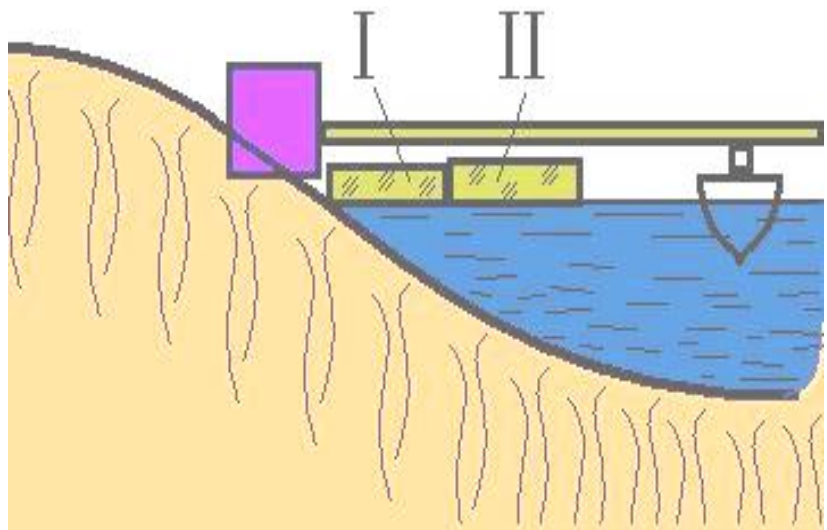


Рисунок 4.10 - Устройство транспортировки ледяных гранул на водоеме

транспортировка специальными механизмами гранулированного льда.

С целью исключения разрушения переправы течением реки укладку следует производить по схеме, показанной на рисунке 4.11, которая заключается в намораживании откосов – I, II, III, ... и т.д.

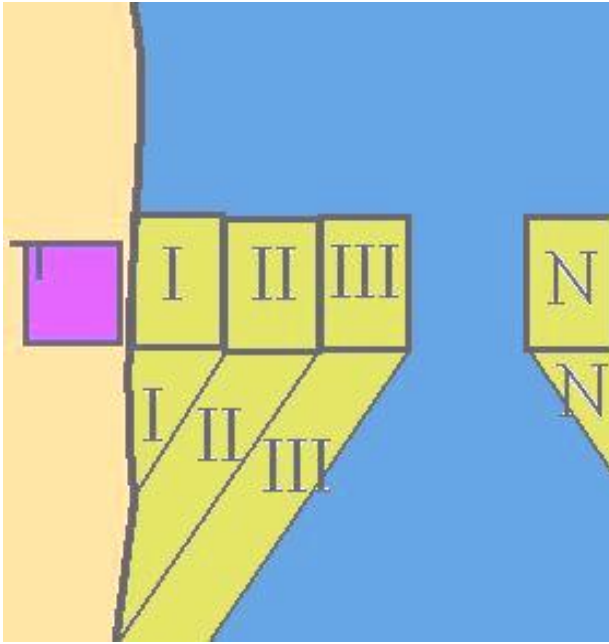


Рисунок 4.11 - Схема укладки ледовой переправы с использованием гранул льда

Заливка снеговодной суспензии. При использовании в качестве связующего компонента ледяных гранул снеговодной суспензии, нужны устройства для ее постоянного перемешивания с целью поддержания однородного состава. Состав суспензии зависит от температуры воздуха и размера промежутков между гранулами. Повышенное содержание снега в суспензии возможно при наличии

устройств подачи её в слой гранул под давлением.

Наилучшим вариантом заливки суспензии, исключая недоливы в виде пустот,

является

одновременная

подача в одно место

на лёд реки

суспензии и

ледяных гранул

(рисунок 4.12). В

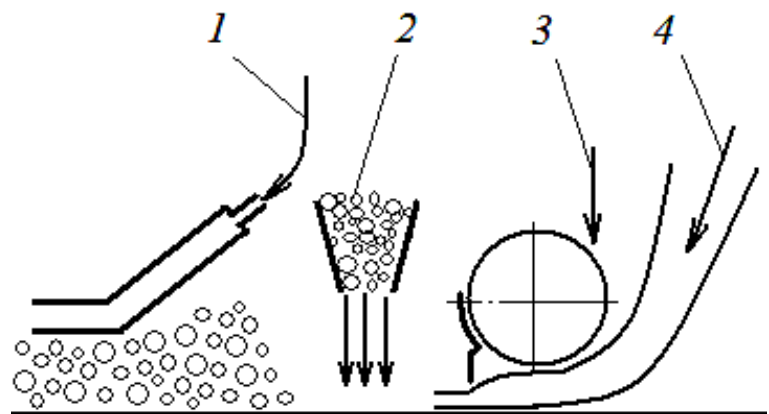
этом случае нет

необходимости

проливать

суспензию через

длинные каналы



1 – горячий газ; 2 – ледяные гранулы;

3 – снег; 4 – вода

Рисунок 4.12 – Устройства для заливки снеговодной суспензии и приглаживания переправы

межгранульного пространства ледяной засыпки. Кроме того, подачу суспензии следует осуществлять к нижним слоям гранул, так как если все-таки пустоты появятся, то их можно будет устранить, залив сверху воду. Использование горячей гладилки позволяет выровнять верхний слой ледяной засыпки при рихтовке переправы, а также способствует заполнению имеющихся пустот талой водой.

4.5 Расширение срока эксплуатации ледовых переправ

Было замечено, что при подаче холодного воздуха в аппарат с циркуляционным слоем происходит повышение температуры воздушного потока за счет его термодинамического сжатия. Величина потерь составляет 2-3 градуса по Цельсию. Отсюда можно констатировать, что верхний предел начала работы аппаратов с циркуляционным слоем может быть принят в интервале минус (5-7 °С). Отсюда минимально возможный предел температуры в рабочей камере аппарата, при котором аппарат будет работать с минимальной скоростью замораживания, равен -2 °С.

Нижнего предела отрицательной температуры для работы аппаратов с кипящим слоем не существует. Однако устойчиво строительство ледовых переправ идет, начиная с -15 °С [41], а эта температура атмосферного воздуха наступает, как правило, в конце ноября – начале декабря [3]. Температура атмосферы -5 °С для Сибири возможна в октябре, поэтому аппараты с циркуляционным кипящим слоем играют роль накопителя ледовой массы, которую можно использовать при наступлении устойчивых холодов [113]. Хранение льда можно осуществить на берегу водоема в месте строительства ледовой переправы.

Следует отметить и тот факт, что в октябре продолжительность дня меньше, чем ночи, поэтому возникает возможность накапливать лед ночью. Выигрыш в этом случае может составить несколько дней, но при движении по переправе тысяч машин в сутки данное количество становится вполне оправданным.

Эксплуатационный период работы ледовых переправ заканчивается в марте или апреле. И в этот период возникает ситуация, когда дневные плюсовые температуры невысоки ($+5\dots+8\text{ }^{\circ}\text{C}$), а ночные ($-5\dots-15\text{ }^{\circ}\text{C}$) оказываются достаточными для подморозки верхней части ледового полотна путем добавления в появившиеся лужи гранулированного льда. Продолжительность этого периода также может измеряться неделями, но и несколько дней являются значимыми при интенсивном потоке движения.

Для г. Якутск (республика Саха,) приведен график среднесуточной температуры воздуха за год (рисунок 4.13). По нему видно, что температуры воздуха ($-5\dots-15\text{ }^{\circ}\text{C}$) длится почти два месяца. Причем осенью он несколько меньше чем весной.

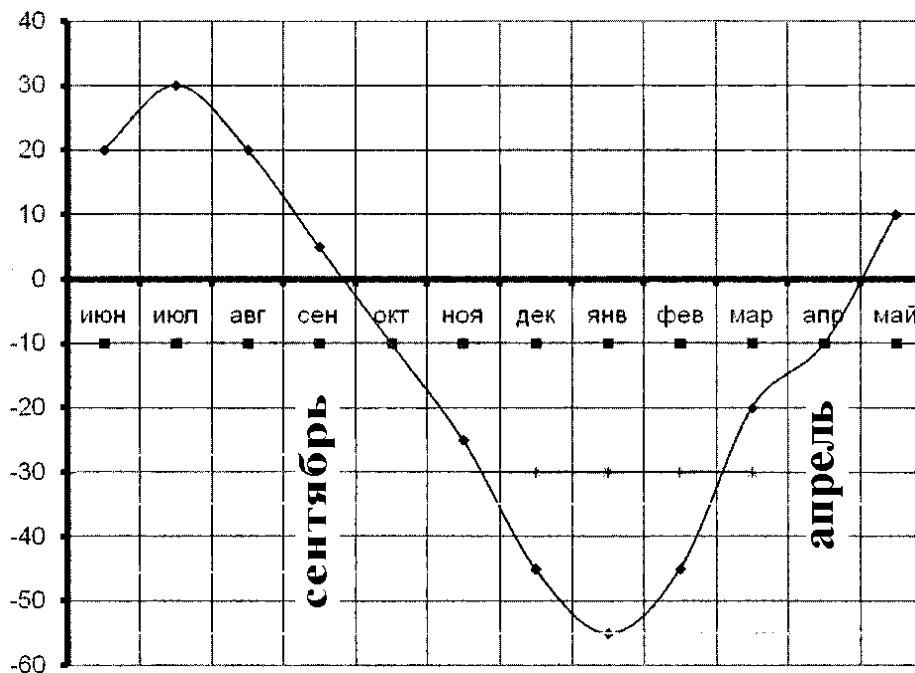


Рисунок 4.13 – Годовой ход температуры в г.Якутске, (2011 г.)

Та же картина возникает и в районах с более мягким климатом, нежели Якутск. По приведенному графику среднесуточной температуры воздуха в г. Юрга северной части Кемеровской области за 2012 год (рисунок 4.14) видно, что отличие заключается лишь в сроках наступления и окончания холодного периода года. Крутизна нарастания и падения температуры приведенных графиков практически одинакова, и соответствующие интервалы времени так

же равны. Разнится лишь общая продолжительность холодного периода года и, соответственно, сроки эксплуатации ледовой переправы.

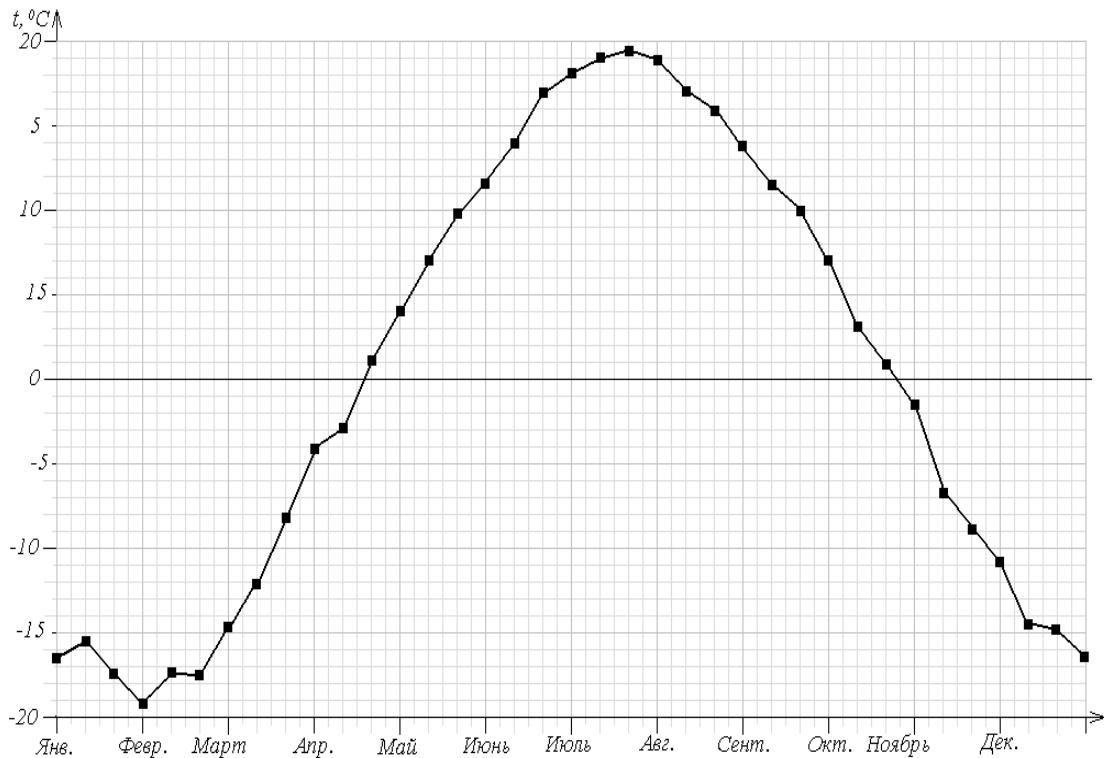


Рисунок 4.14 – Среднесуточная температура воздуха в г. Юрга за 2012 г.

Для Европейской части РФ вид графика годового хода температур воздуха несколько отличный (рисунок 4.15). Он более пологий с более длинными промежутками повышения температуры весной и понижения осенью.

В этом случае выигрыш в сроках эксплуатации ледовой переправы от применения аппарата циркуляционного кипящего слоя для европейской территории государства является более значительным, чем для азиатской. Однако более точно оценить этот выигрыш не представляется возможным вследствие понижения прочности льда при температурах близких к 0°C . Можно ожидать компенсации такого понижения за счет увеличения несущей способности ледяного полотна при замораживании части ледяных гранул и воды.

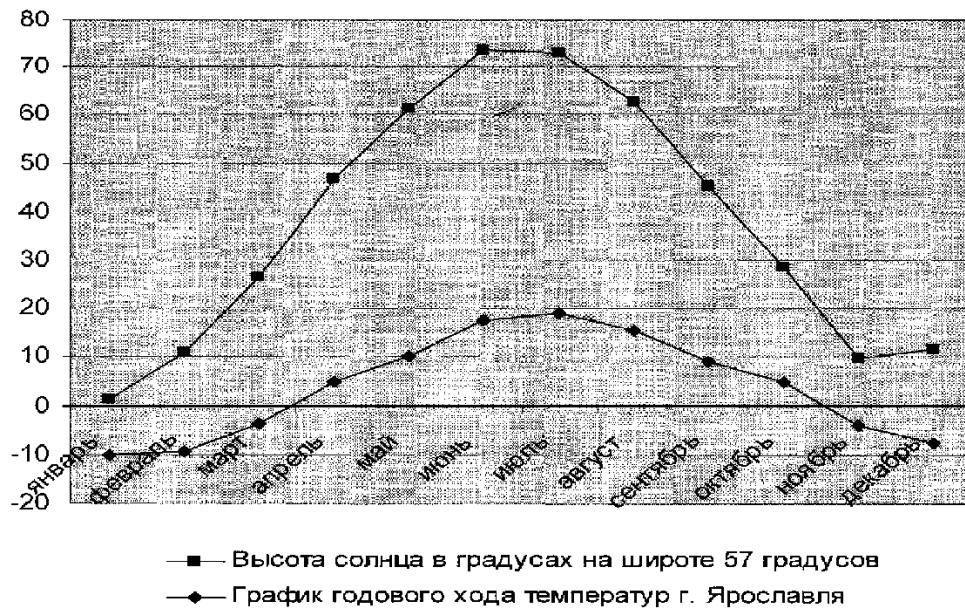


Рисунок 4.15 – Среднесуточная температура воздуха в г.Ярославль за 2011 г.

Таким образом, способ строительства ледовых переправ с применением гранулированного льда кипящего слоя позволяет:

- а) организовать получение и накопление гранулированного льда в октябре месяце;
- б) при этом соответственно сократить продолжительность строительства ледового полотна приблизительно с 25-30 до 15-ти и менее дней;
- в) проводить подморозку ледяной трассы в марте и апреле в ночное время суток до момента закрытия ледовой переправы, в результате чего срок эксплуатации сооружения увеличивается на 10-15 дней.

4.6 Выводы по разделу 4

1. Установлены принципы аппаратурного оформления процесса. На основании операции по изготовлению затравки определено, что наиболее эффективно использование дробилок ударного действия для получения ледяной крошки. Угол скоса основания рабочей камеры должен составлять от 45° до 65° в зависимости от угла естественного откоса гранул затравки; форму впускной щели рекомендуется исполнять близкой к квадратной с

отношением сторон не более 1 : 1,2.

2. Определены предпочтительные свойства льдогенератора кипящего слоя по сравнению с аппаратом барабанного типа, главным из которых является пониженный расход электроэнергии более чем в 10 раз.

3. Установлено, что ледовые переправы, построенные с применением гранулированного льда, обладают рядом преимуществ, таких как: повышенная несущая способность; более короткие сроки строительства; увеличение сроков эксплуатации и удешевление самого сооружения.

Анализ хода графиков годовой температуры для данной местности РФ показывает, что срок эксплуатации ледовых переправ с учетом применения циркуляционного слоя для получения гранулированного льда может быть увеличен от 1 до 2 месяцев в зависимости от местного климата.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Научно обосновано создание циркуляционного кипящего слоя (ЦКС). Для системы лед-воздух разработан процесс намораживания гранулированного льда в аппарате ЦКС с использованием атмосферного воздуха при температуре $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ниже. На основе литературного обзора обосновано, что технология и аппарат ЦКС имеют преимущества перед существующими псевдоожиженными системами – плоский и фонтанирующий кипящие слои, а полученные ледяные гранулы имеют овально-сферическую форму с размером более 50 мм моно- и/или полифракционного состава.

2. Поставлена математическая модель адиабатического намораживания воды на сферической частице льда, соответствующая классу задач Стефана, которая отражает процесс роста гранулы в зависимости от её начальной температуры. Результат численного решения данной системы уравнений методом конечных разностей соответствует экспериментальной проверке прироста слоя льда на гранулах. Установлена оптимальная степень орошения гранул, при которой использование адиабатического намораживания эффективно для создания прочных плотных гранульных упаковок с замораживанием их при заливке водой в ледовые покрытия.

3. Разработана математическая модель теплового баланса процесса намораживания льда на кристаллах затравки и получена зависимость прироста льда в аппарате с ЦКС при заданных параметрах процесса, а также установлена зависимость максимальной эффективной производительности аппарата от температуры воздуха на входе и диаметра частиц.

4. Экспериментально определен интервал скорости намораживания льда на сферических гранулах от $0,011\text{ кг/с}\cdot\text{м}^2$ при -5°C до $0,190\text{ кг/с}\cdot\text{м}^2$ при -42°C в адиабатических условиях. Исследование фракционного состава гранул затравки показало отсутствие дробления частиц льда вследствие трения друг с другом, что исключает унос части слоя с выхлопными газами.

5. Установлены принципы аппаратного оформления процесса. На основании операции по изготовлению затравки определено, что наиболее эффективно использование дробилок ударного действия для получения ледяной крошки. Угол скоса основания рабочей камеры должен составлять от 45° до 65° в зависимости от угла естественного откоса гранул затравки; форму впускной щели рекомендуется исполнять близкой к квадратной с отношением сторон не более 1 : 1,2.

6. Установлено, что ледовые покрытия, построенные с применением гранулированного льда, обладают рядом преимуществ, таких как: повышенная несущая способность; более короткие сроки строительства; увеличение сроков эксплуатации и удешевление самого сооружения. На основе экспериментальных данных определено, что несущая способность ледяных брусков на основе гранулированного льда на 34...38 % выше прочности подобных брусков из чистого льда. Графики годовой температуры для данной местности РФ показывают, что срок эксплуатации ледовых переправ с учетом применения гранулированного льда может быть увеличен до 1 месяца в зависимости от местного климата.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. А.с.827. 098 от 04.01.70 (СССР). Аппарат для контактирования в системе твёрдое тело – жидкость – газ / В. И. Полтавцев, М. И. Курочкина, П. Г. Романков. – Оpubл. в Б. И. , 1981, № 17.
2. Адамсон, А. Физическая химия поверхностей / А. Адамсон. – М. : Мир, 1979. – 568с. ; пер. с англ.
3. Алексеев, В. Р. Географическая оценка возможностей капельного намораживания воды / В. Р. Алексеев, Н. А. Петухова, Г. И. Сморгин // Гляциология Вост. Сибири. – Иркутск : Наука, 1983.
4. Алексеев, В.Р. Опыт возведения ледяных конструкций сложной конфигурации. Рыхлый снег как строительный материал / В.Р. Алексеев, Г.И. Сморгин // Гляциология Вост. Сибири. – Иркутск : Наука, 1983.
5. Алексеева, К. Применение комплексного подхода для решения задачи кристаллизации воды / К. Алексеева, Н.А. Кудряшов // Научная сессия МИФИ. Т.7. Астрофизика и космофизика. Математические методы в научных исследованиях. – М., 2001. – С. 60-61.
6. Антонченко, В. Я. Физика воды / В. Я. Антонченко. – Киев : Наукова думка, 1986. – 128с.
7. Аппарат для гранулирования льда, патент на полезную модель № 151813 от 31.12.14 г. Рос. Федерация, МПК7 А47J 43/26 Полтавцев В.И., Храпов А.А., Гончаров С.Д.// заявитель и патентообладатель ФГУ ВПО Кемеровский Государственный сельскохозяйственный институт.
8. Аршанский, С.Н. Льдозаводы / С.Н. Аршанский, С. Э. Синкевич. – М. : Пищевая промышленность, 1968. – 268с.
9. Белая, М. Л. Молекулярная структура воды / М.Л. Белая, В. Г. Левадный. – М. : Знание, 1987. – 64с.

10. Беляев, М. М. Основы теплопередачи / М. М. Беляев. – Киев : Высшая школа, 1989. – 343с.
11. Беляев, Н. М. Методы теории теплопроводности: В 2-х ч. Ч.2 / Н. М. Беляев, А. А. Рядко. – М. : Высш. школа, 1982. – 304 с.
12. Бобков, В. А. Производство и применение льда / В. А. Бобков. – М.: Госторгиздат, 1977.– 232с.
13. Бобков, В. А. Рекомендации по применению холодильной техники для сохранения продовольствия на Севере / В. А. Бобков. – М. : ВНИХИ, 1971. – 56с.
14. Богословский, В. Н. Строительная теплофизика / В. Н. Богословский. – М. : Высшая школа, 1982. – 416с.
15. Большаков, С.А. Холодильная техника и технология. – М. : Издательский центр «Академия», 2003. – 304 с.
16. Боттерилл, Дж. Теплообмен в псевдооживленном слое / Гидродинамические характеристики псевдооживленного газом слоя и их влияние на его теплообменные свойства. Пер.с англ. – М.: Энергия, 1980.-с334.
17. Браут, Р. Фазовые переходы / пер. с англ. – М., 1967.
18. Будаков, Б.М. Разностные методы решения некоторых краевых задач типа Стефана / Б.М. Будаков, Ф.П. Васильев, А.Б. Успенский // Численные методы в газовой динамике : сб. работ ВЦ МГУ. Т.4. – М. : Изд-во МГУ, 1965.
19. Вабищевич, П. Н. Численные методы решения задач со свободной границей. – М. : Изд-во МГУ 1987. – 165 с.
Варгафтик, Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. – М. : Наука, 1972. – 720 с.
20. Власичев, Г. Н. Метод численного решения одномерных задач Стефана / Г. Н. Власичев // Инженерно-физический журнал. – 1993. – №65. – С.31.

21. Войтковский, К. Ф. Механические свойства льда / К. Ф. Войтковский. – М. : Изд-во АН СССР, 1960. – 190с.
22. Гельперин, Н. И., Айнштейн В. Г., Кваша В. Б. Основы техники псевдоожижения / Гельперин Н. И., Айнштейн В. Г., Кваша В. Б. // М., 1967, 664 с.
23. Головкин, Н. А. Определение времени промерзания пластины при несимметричных условиях отвода тепла / Н. А. Головкин, Л. А. Степанов // Холодильная обработка и хранения пищевых продуктов. – Л., 1974. - Вып. 2. - С. 132-136
24. Гольдин, А. Л. Определение ледовой нагрузки на элементы морских гидротехнических сооружений / Гольдин А.Л., Гладков М. Г. // Гидротехническое строительство. 1986. № 7. С. 27-29.
25. Госсман, В. А. Гидротехнические сооружения изо льда при послойном намораживании на водном транспорте // Труды НИИВТ. – 1977. – Вып. 20. – С. 109 – 125.
26. Гуфан, Ю. М. Фазовые переходы второго рода / Гуфан, Ю. М. // Соревский образовательный журнал, №7, 1997 -С. 109-115.
27. Гухман, А. А. Применение теории подобия к исследованию процессов тепло- и массообмена. – М. : Высшая школа, 1974.
28. Ерофеенко, В. Т. Основы математического моделирования / В. Т. Ерофеенко, И. С. Козловская. – Минск : Изд-во БГУ, 2002.
29. Забродский, С. С. Гидродинамика и теплообмен в псевдоожиженном слое / С. С. Забродский - М.; Л., 1963 - 488 с.
30. Зубков, П. Т. Стационарные решения задачи естественной конвекции замерзающей жидкости в квадратной ячейке / П. Т. Зубков, В. А. Кравченко // Механика жидкости и газа, 1999, №6 - С. 180-184
31. Инструкция по проектированию, строительству и эксплуатации ледовых переправ ОДН 218.010 – 98 // Отраслевые дорожные нормы. Инструкция по проектированию, строительству и эксплуатации ледовых переправ / Федеральная служба России. – М., 1998.

32. Исаченко, В. П. Теплопередача / В. П. Исаченко, В. А.Осипова, А. С. Сукомел. – М. : Энергия, 1968.
33. Карслоу, Г. Теплопроводность твердых тел / Г. Карслоу, Д. Егер. – М. : Наука, 1964.
34. Классен, П.В. Гранулирование / П.В. Классен, И.Г. Гришаев, И.П. Шомин. – М. : Химия, 1991. – 240 с.
35. Ковеня, В.М. Разностные методы решения многомерных задач : курс лекций / Новосиб. Гос. Ун-т. – Новосибирск, 2004.
36. Козлов, Д.В. Основы гидрофизики : учеб. пособие. – М. : Изд-во МГУП, 2004. – 246 с.
37. Комаров, Н.С. Справочник холодильщика. – Киев : Гос. изд.-во техн. лит. УССР, 1953. – 396с.
38. Комаровский, А. Н. Структура и физические свойства ледяного покрова пресных вод / А. Н. Комаровский - М.: ГЭИ, 1937 -49с.
39. Коновалов, В.И. Методы решения задач тепломассопереноса / В.И. Коновалов, А.Н. Пахомов. – Тамбов : Изд-во ТГТУ, 2005.
40. Конокотин, Г. С. Льдогенераторы для судов рыбной промышленности / Г. С. Конокотин // Холодильная техника. - 1968, №10. – С.32-36.
41. Корунов, М. М. Методическое пособие по расчету ледяных переprav / М. М. Корунов - Красноярск, 1972
42. Кочубей, А. А. Применение метода граничных элементов для решения задачи межфазового взаимодействия с неизвестными границами раздела фаз / А. А. Кочубей, Э. К. Бевза, Д. В. Евдокимов - Вестник Днепропетровского университета, Вып. 3, Т. 1. - С. 109-116
43. Кошляков, Н. С. Уравнения в частных производных математической физики / Н. С. Кошляков, Э. Б. Глинер, М. М. Смирнов - М: Высшая школа, 1970
44. Краткий справочник физико-химических величин / сост. Н.М. Барон, Э.И. Квет ; под ред. К.П. Мищенко и А.А. Равделя. – М. : Изд-во Химия, 1965.

45. Куни, Ф. М. Физические основы теории фазовых превращений вещества / Ф. М. Куни // Соросовский образовательный журнал, №1, 1996 - С. 106-111
46. Курылёв, Е. С. Холодильные установки / Е. С. Курылёв, Н. А. Герасимов. – Л. : Машиностроение, 1980. – 662 с.
47. Кутателадзе, С.С. Основы теории теплообмена. – М. : Атомиздат, 1979. – 416 с.
48. Лаврентьев, М.А. Проблемы гидродинамики и их математические модели / М.А. Лаврентьев, Б.В. Шабат. – М. : Наука, 1973.
49. Лавров, В. В. Деформация и прочность льда. – Л. : Гидрометеиздат, 1969. – 205с.
50. Левенберг, В. Д. Аккумуляция тепла / В. Д. Левенберг, М. Р. Ткач, В. А. Гольстрем. – Киев : Техника, 1991.
51. Ледовые строительные площадки, дороги и переправы / Н.Н. Бычковский, Ю.А. Гурьянов ; под общ. ред. Н.Н. Бычковского. – Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2005. – 260 с.
52. Лыков, А.В. Теория теплопроводности. – М. : Высш. шк., 1967. – 672с.
53. Лыков, А.В. Тепломассообмен : справочник.-2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергия, 1978.
54. Мартынов, Г. А. О решении обратной задачи Стефана в случае сферической симметрии / Г. А. Мартынов // Журнал технической физики. – 1960. – Т. 30, № 2. - С. 40 – 42.
55. Математическое моделирование / под ред. Дж. Эндрюса и Р. МакЛоуна – М. : Мир, 1979.
56. Мейрманов, А.М. Задача Стефана. – Новосибирск : Наука, 1986.
57. Мосин, О.В. Свойства льда и его модификаций [Электронный ресурс].– Режим доступа : – <http://www.o8ode.ru/article/krie/>
58. Николаева, Е. И. Исследование теплообмена при образовании гранул в фонтанирующем слое / Николаева, Е. И., Роткин В. М. // Материалы конф. по гидротехнике, эксплуатации гидроузлов и гидротехнических

- сооружении. Л.: Изд. ШИИИГ им. Б. В. Веденева. 1979. С. 52–56.
59. Овчарова, А. С. Численное решение стационарной задачи Стефана в области со свободной границей / А. С. Овчарова. – Новосибирск : Вычислительные технологии, 1999. – Т.4, №6.
60. Очков, В.Ф. Публикация в интернете теплофизических свойств веществ: проблемы и решения при работе с таблицами // Труды Академэнерго, 2009. – №2. – С. 13 – 32.
61. Павлов, К.Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии / Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков // Учебное пособие для вузов. -9-е изд., перераб. доп.- Л.: Химия, 1981.
62. Панов, Б. П. Зимний режим рек / Б. П. Панов – Л. : Гидрометеиздат, 1960.
63. Пасконов, В. М. Численное моделирование процессов тепло- и массообмена / В. М. Пасконов, В. И. Полежаев, Л. А. Чудов. – М. : Наука, 1984.
64. Петрович, И. Н. Способы получения и некоторые свойства искусственного гранулированного льда / И. Н. Петрович, Г. И. Сморгин // Гляциология Вост. Сибири. – Иркутск : Наука, 1983.
65. Петухова, Н. А. Возможности намораживания воды в условиях Восточной Сибири // Гляциология Вост. Сибири. – Иркутск : Наука, 1983.
66. Пехович, А. И. Основы гидроледотермики : справочник по гидротехнике. – Л. : Энергоатомиздат, 1983. – 200 с.
67. Пехович, А. И. Расчет теплового режима твердых тел / А. И. Пехович, В. М. Жидких.– Л. : Энергия, 1976.
68. Пехович, А. И. Температура на границе тающего льда и раствора / А. И. Пехович, И. Н. Шаталина // Физические процессы горного производства : межвуз. сб. – Л. : Изд. ЛГИ, 1975. – Вып. 1. – С. 79 – 83.
69. Планк, Р. П. Американская холодильная техника / Л., ГИТЛ, 1931, с. 30-41.

70. Полянин, А. Д. Методы решения нелинейных уравнений математической физики и механики / А.Д. Полянин, В.Ф. Зайцев, – М. : Физматлит, 2005.
71. Полянин, А. Д. Справочник по нелинейным уравнениям математической физики: Точные решения / А. Д. Полянин, В. Ф. Зайцев. – М. : Физматлит, 2002. – 432 с.
72. Псевдооживление . Под ред. И. Дэвидсона и Д. Харрисона. Пер. с англ. В. Г. Айнштейна, Э. Н. Гельперина, В. Л. Новобратского под ред. проф. Н. И.Гельперина. М., “Химия”, 1974, 728 с.,327 рис.
73. Псевдооживление / В. Г. Айнштейн, А. П. Баскаков, Б. В. Берг и др. – М.: Химия, 1991 (Процессы и аппараты химической и нефтехимической тех-нологии.) – 400 с.; ил.
74. Равдель, А.А. Краткий справочник физико-химических величин / А.А. Равдель, А.М. Пономарева. – 10-е изд. – СПб : «Иван Федоров», 2003. – 240 с.
75. Разумов И. М., Немец Л. Л., Маншилин В. В. Концентрационное поле и плотность трёхфазного псевдооживленного слоя. – ХТТМ, 1969, №12.
76. Раскалыватель гранул льда [Текст]: пат. 146747 Рос. Федерация, МПК7 А47J 43/26 (2006/01) / Полтавцев В.И., Храпов А.А., Гончаров С.Ю., Губерт С.В. // заявитель и патентообладатель ФГУ ВПО Кемеровский Государственный сельскохозяйственный институт.
77. Рефрижераторы [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.refrigirat.ru/.../>.
78. Ржевская, В. Исследование намораживания тонких слоев льда в аппаратах непрерывного действия / В. Ржевская, Л. Степанова, Н. Фомин // Холодильная техника - 1973 - №5 - С. 19-23.
79. Розенбаум Р. Б., Тодес О. М. Движение тел в псевдооживленном слое. – Л.: Изд. Ленингр. ун-та 1980. 168с. Ил.-45, табл. – 15, библиогр. – 273 назв.
80. Рубинштейн, Л.И. Проблема Стефана. – Рига : Звайгзне, 1967. – 457с.

81. Рындин, Е.А. Методы решения задач математической физики / Е.А. Рындин : учеб. пособие. – Таганрог : ТРТУ, 2003.
82. Самарский, А.А. Вычислительная теплопередача / А.А. Самарский, П.Н. Вабищевич. – М. : Едиториал УРСС, 2003.
83. Самарский, А.А. Уравнения математической физики / А.А. Самарский, А.Н. Тихонов. – М. : Наука, 1966.
84. Самарский, А.А. Численные методы / А.А. Самарский, А.В. Гулин. – М. : Наука, 1989.
85. Скворцов, А. М. Обычные и необычные фазовые переходы / А. М. Скворцов // Соровский образовательный журнал. – 1996. – №8.– С.102-108.
86. Скурлатов, Ю. И. Химия и жизнь воды / Ю. И. Скурлатов, Г. Г. Дина. – Кишинев, 1989. –128с.
87. Сморгин, Г. И. Теории и методы получения искусственного льда / Г. И. Сморгин. – Новосибирск : Наука, 1988.
88. Способ намораживания ледовых покрытий [Текст]: пат. 2556908 Рос. Федерация, МПК7 F01C 13/10 (2006.01) F25C 1/00 (2006.01) Полтавцев В.И., Мирошников П.В., Храпов А.А., // заявитель и патентообладатель ФГУ ВПО Кемеровский Государственный сельскохозяйственный институт.
89. Способ подачи гранулированного материала [Текст]: пат. 2456049 Рос. Федерация, МПК7 В 01 D 9/00, В 01 J 8/00. / Полтавцев В.И., Храпов А.А., Привалов В.Т. заявитель и патентообладатель ФГУ ВПО Кемеровский Государственный сельскохозяйственный институт.
90. Степанов, В. Опыт заготовки льда намораживанием на дорогах Юга / В. Степанов - М.: Трансжелдориздат, 1954 -68с
91. Таганов И. Н., Романков П. Г. Об уравнениях движения фаз в псевдоожигенном слое. – ТОХТ, 1968, т.2, №5, с. 778-785.
92. Телов, В. И. Наплавные мосты, паромные и ледяные переправы / В. И. Телов, И. М. Кануков –М.: Транспорт, 1978. –384с.

93. Теплофизические основы получения искусственного холода. – М. : Пищевая промышленность, 1980.
94. Ткачев А. Г., Бучко Н. А. Конвективный теплообмен жидкости при затвердевании и плавлении на поверхности погруженных в нее тел // Труды координационных совещ. по гидротехнике. Л.: Изд. ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. 1964. Вып. 10. С. 210–227.
95. Ткачев А. Г., Данилова Г. Н. Теплообмен при намораживанию льда // Вопросы теплообмена при изменении агрегатного состояния. М.–Л.: Госэнергоиздат, 1953.
96. Тодес О.М., Цитович О.Б. Аппараты с кипящим зернистым слоем: Гидравлические и тепловые основы работы.- Химия, 1981. – 296 с, ил.
97. Филин, С. О. Аккумуляция холода: Способы и современные технические решения / С. О. Филин, Б.А. Закшевский // Холодильная техника. – 2002. – Вып. №10. – С. 23-25.
98. Флауменбаум, Б. Л. Основы консервирования пищевых продуктов / Б. Л. Флауменбаум, С. С. Танчев, М. А. Гришин. – М. : Агропромиздат, 1986. – 494 с.
99. Фомин, В. А. Об одном методе решения задачи Стефана / В. А. Фомин // Электронный научный журнал «Исследовано в России» <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2006/049.pdf>
100. Ходаков, В. Г. Водно-ледовый баланс районов современного и древнего оледенения СССР. – М. : Наука, 1978.
101. Храпов, А.А. Гранулирование льда в кипящем слое / С.В. Губерт, А.А. Храпов, В.И. Полтавцев // Известия вузов прикладная химия и биотехнология: научный журнал выпуск №2(3). г.Иркутск, 2012г. 193с. – С.144-146.
102. Храпов, А.А. Гранулированный лед в строительстве ледовых переправ и зимников / А.А. Храпов, А.С. Ащеулова В.И. Полтавцев // Вестник Кемеровского государственного сельскохозяйственного института. – №2. – Кемерово: Кузбассвузиздат, 2006. 292с. С.235-240.

103. Храпов, А.А. Задача Стефана для адиабатического намораживания воды холодом гранул / А.С. Ащеулова, А. А. Храпов, В. В. Рагулин В. И. Полтавцев // Вестник КрасГАУ.–2007. – №1– С.26-30.
104. Храпов, А.А. Задача Стефана как модель адиабатического процесса намораживания воды на гранулах льда / А.С. Ащеулова, А.А. Храпов, В. И. Полтавцев // Вестник Кемеровского государственного сельскохозяйственного института. – №2. – Кемерово: Кузбассвуиздат, 2006. 292с. С.193-199.
105. Храпов, А.А. Использование холода в адиабатическом процессе получения ледяных гранул / А.С. Ащеулова, А.А. Храпов, В. И. Полтавцев // Доклады научно-практической конференции «Тенденции и факторы развития агропромышленного комплекса Сибири». – Кемерово, 2006. -275 с., С.233-236.
106. Храпов, А.А. Кинетика наращивания льда в кипящем слое /А.А. Храпов, В.И. Полтавцев, В.И. Мяленко / Вестник Кемеровского государственного сельскохозяйственного института / ред. кол.: В.И. Мяленко (гл. ред.) и др.; ФГОУ ВПО «КемГСХИ» №3. – Кемерово : Информационно-издательский отдел КемГСХИ, 2009. 307 с. С.163-168
107. Храпов, А.А. Кондуктор для получения ледяной затравки / А.А. Храпов, А. С. Ащеулова В. И. Полтавцев // Доклады научно-практической конференции «Тенденции и факторы развития агропромышленного комплекса Сибири». – Кемерово, 2006. - 275 с., С.256-258
108. Храпов, А.А. Ледовые трассы и переправы на основе овально-сферических гранул льда / Полтавцев В.И., Мирошников П.В., Храпов А.А. // *Materia'ly X mezina'rodni ve'decko – prakticka' conference «Moderni' vymo'z'nosti vedy – 2014».* – Dil 38. *Technicke' ve'dy .:* Praha.
109. Храпов, А.А. Математическая модель намораживания гранул льда для ледовых переправ в виде задачи Стефана / А.С. Ащеулова, А. А. Храпов, В. В. Рагулин В. И. Полтавцев // Бурение и нефть.– 2007. –

№4- С.17-19.

110. Храпов, А.А. Метод охлаждения свежесвыдоенного молока льдом / А.А. Храпов, В.И.Полтавцев, С.Ю.Гончаров. // Тенденции сельскохозяйственного производства в современной России: материалы X Международной науч.- практ. конференции (Кемерово, 18-21 октября 2011 г.) - Кемерово: Кузбасская выставочная компания Экспо - Сибирь, 2011. 223с. - с.206-207.
111. Храпов, А.А. Моделирование задачи Стефана при намораживании воды на поверхности гранул льда / Ащеулова А.С., Храпов А.А. // VI Региональная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых, 10 апреля 2006 г. г. Новокузнецк [Текст]: материалы конф./ НФИ КемГУ.- Новокузнецк, 2006. – 151с. С.10-12.
112. Храпов, А.А. Надежность ледовой переправы / А.С. Ащеулова, А.А. Храпов, В.И. Полтавцев // Сельский механизатор.-2007.-№4- С. 46.
113. Храпов, А.А. Намораживание льда на гранулах в вихревом циркуляционном слое / Храпов А.А., Гончаров С.Ю., Ащеулова А.С. // Областная научно-практическая конференция «Исследовательская и инновационная деятельность учащейся молодежи: проблемы, поиски, решения», 26-27 октября 2006 г. г. Кемерово [Текст]: материалы конф./ КемТИПП.- Кемерово, 2006.
114. Храпов, А.А. Намораживание льда на поверхности гранул в условиях адиабатического процесса / А.С. Ащеулова, А.А. Храпов, В. И. Полтавцев // Актуальные вопросы совершенствования технологии производства и переработки продукции сельского хозяйства: Мосоловские чтения / Материалы межрегиональной научно-практической конференции. – Йошкар-Ола. – 2006. – Вып. 8. – 464 с., С.257-259.
115. Храпов, А.А. Намораживание льда на соприкасающиеся ледяные шары в воде / Мирошников П.В., Рагулин В.В., Храпов А.А., Полтавцев В.И.

- // Агроэкологические проблемы техногенных регионов: сборник научных докладов Международной научно-практической конференции (г. Кемерово, 18 ноября 2009г.) / Кемерово : Издание Кемеровского ИИО, 2009.-183с. С.98-С.99
116. Храпов, А.А. Непрерывный ступенчатый процесс регенерации ионита в циркуляционном слое / В.И. Полтавцев, А.С. Ащеулова, А.А. Храпов // Материалы одиннадцатой Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: экология, надежность, безопасность». Томск: Изд-во ТПУ, 2005.-542 с. С.187-189.
117. Храпов, А.А. Операционный метод решения задачи адиабатического процесса намораживания льда / А.С. Ащеулова, А.А. Храпов, В.И. Полтавцев // Проблемы рационального природопользования техногенного региона: Сборник научных трудов международной школы – конференции молодых ученых, аспирантов и студентов; 15-17 декабря 2005, КГСХИ.- Кемерово: Кемеровский ГСХИ, 2006. 305с., С.261-263.
118. Храпов, А.А. Периодическое получения льда в циркуляционном слое / А.А. Храпов, В.И. Полтавцев //Современные проблемы и инновационные тенденции развития аграрной науки. Сборник докладов Международной научно-практической конференции (г. Якутск, 10 ноября 2010г.). – Якутск: Изд-во Сфера, 2010.-232 с. С.221-225
119. Храпов, А.А. Производство искусственного льда в кипящем слое / А.А. Храпов, А.С. Ащеулова // Экология Южной Сибири и сопредельных территорий. Выпуск 10. – Абакан: Издательство Хакасского государственного университета им. Н.Ф. Катанова, 2006. Т. 2 – 214 с С.74-75.
120. Храпов, А.А. Рост толщины плоских пластин при намораживании воды / А.А. Храпов, А.С. Ащеулова В. И. Полтавцев // Вестник Кемеровского государственного сельскохозяйственного института. –

- №2. – Кемерово: Кузбассвуиздат, 2006. 292с. С.241-242
121. Храпов, А.А. Статическая прочность композита ледового покрытия / П. В. Мирошников, А. А. Храпов, В. В. Рагулин, В. И. Полтавцев // Вестник Кемеровского государственного сельскохозяйственного института. – Кемерово : ИИО КемГСХИ, 2011. – №4. – С. 148 – 150.
122. Храпов, А.А. Транспортировка пищевых продуктов с применением гранулированного льда / С.Ю.Гончаров, А.А Храпов, В.И. Полтавцев // Тенденции сельскохозяйственного производства в современной России: материалы X Международной науч.- практ. конференции (Кемерово, 18-21 октября 2011 г.) - Кемерово: Кузбасская выставочная компания Экспо - Сибирь, 2011. 223с. - с.200-202.
123. Храпов, А.А. Условия задачи Стефана при замораживании воды на поверхности гранул льда / А.С. Ащеулова, А.А. Храпов, В.И. Полтавцев //Материалы региональной научно-практической конференции (30 ноября 2005 г.) Красноярск 2006. – С.270-272.
124. Храпов, А.А. Хранение цветов и черенков с применением гранулированного льда./ А.А Храпов, П.В Мирошников, В.И.Полтавцев.// Тенденции сельскохозяйственного производства в современной России: материалы X Международной науч.- практ. конференции (Кемерово, 18-21 октября 2011 г.) - Кемерово: Кузбасская выставочная компания Экспо - Сибирь, 2011. 223с. - с.209-211.
125. Храпов, А.А. Экология получения сферического льда в циркуляционном кипящем слое / Губерт С.В., Храпов А.А., Полтавцев В.И. // Устойчивое развитие: вопросы экономики, права, экологии, социологии, образования, управления проектами: Сборник научных статей по итогам всероссийской заочной научно-практической конференции, 24-25 января 2013 года, - СПб.: Изд-во «КультИнформПресс», 2013. – 227с. С49-51.
126. Храпов, А.А. Строительства ледовых переправ с применением

- гранулированного льда / А.А. Храпов, С.В. Губерт, В.И. Полтавцев, С.Ю. Гончаров // Наука в центральной России: научно-производственный периодический журнал: «Достижения европейской науки», май, 2013, г. Тамбов, г. Липецк.
127. Храпов, А.А. Кинетика каркасообразования при смерзании круглого ледяного гранулята / Полтавцев В.И., Мирошников П.В., Храпов А.А. // *Materia'ly X mezina'rodni ve'decko – prakticka' conference «Moderni' vymo'zenosti vedy – 2014»*. – Dil 36. *Technicke' ve'dy* .: Praha. Publishing House «Education and Science» s.r.o – 72 stran.
128. Храпов, А.А. Ледовые трассы и переправы на основе овально-сферических гранул льда / Полтавцев В.И., Мирошников П.В., Храпов А.А. // *Materia'ly X mezina'rodni ve'decko – prakticka' conference «Moderni' vymo'zenosti vedy – 2014»*. – Dil 38. *Technicke' ve'dy* .: Praha. Publishing House «Education and Science» s.r.o – 72 stran.
129. Храпов, А.А. Ice road, route and structures of oval-spherical ice granules. Poltavtsev V.I., **Hrapov A.A.**, Mirochnikov P.V. / Science, Technology and Higher Education [Text] : materials of the IV International research and practice conference, Vol. II, Westwood, January 30th, 2014 // publishing office Accent Graphics communications – Westwood – Canada, 2014.
130. Храпов, А.А. Математическое моделирование процесса намораживания гранулированного льда в аппарате с циркуляционным кипящим слоем / А.А. Храпов, В.И. Полтавцев, С.Ю. Гончаров // Тенденции сельскохозяйственного производства в современной России: Материалы XIII Международной научно-практической конференции – Кемерово: КГСХИ, 2014.
131. Храпов, А.А. Расчет процесса намораживания гранулированного льда в аппарате с циркуляционным кипящим слоем / А.А. Храпов, В.И. Полтавцев, С.Ю. Гончаров // Тенденции сельскохозяйственного производства в современной России: Материалы XIII Международной научно-практической конференции – Кемерово: КГСХИ, 2014.

132. Храпов, А.А. Намораживание гранул в циркуляционном кипящем слое / Храпов А.А., Полтавцев В.И. III, IV междунар. науч.- практ. конф. "Технические науки – от теории и практике", г.С.-Петербург. Науч.журн. "Globus", 2015, - 88 с.
133. Шаталина, И. Н. Теплообмен в процессах намораживания и таяния льда. – Л. : Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1990. – 120 с. – (Б-ка «Гидротехника и гидроэнергетика». Вып. 95).
134. Шелопаев, Е. И. Строительство и эксплуатация автомобильных дорог в районах вечной мерзлоты / Е. И. Шелопаев, Ф. Х. Юрков – М., 1977.
135. Шумский, П. А. Основы структурного ледоведения. – М. : Изд-во АН СССР, 1955. – 492 с.
136. Эйзенберг, Д. Структура и свойства воды / Д. Эйзенберг, В. Кауцман / пер. с англ. – Л. : Гидрометеиздат, 1975 – 280с.
137. Эйркул, Д. Промышленные льдогенераторы. // Холодильная техника. – 2000. – Вып. 5. – С. 18-20.
138. Bjerrum, N. Structure and Properties of Ice / N. Bjerrum // Dan. Mat. Fys. Med., 27, 1, 1951
139. Caginalp, G. An analysis of a phase field model of a free boundary / G. Caginalp, Arch. Rational Mech. Anal. 92 (1986), 205-245.
140. Cohen-Mantel, E. Granulation: tont unsavoir-faire / Cohen-Mantel E. // Process Mag.-1994,-1095. -с/62-65.
141. Eisenberg, D. The structure and properties of water / Eisenberg D., Kauzmann W.// Oxford University Press, 1969.
142. Grace, J. R. The behavior of freely bubbling fluidized beds / Grace, J. R. // Chem. Eng. Sci., 1969, vol. 24, №3, p. 497 - 508
143. Handlovicova, A. Error estimates of a fully discrete linear approximationscheme for Stefan problem / Handlovicova, A. // Acta Math. Univ. Comenianae Vol. LXV, 1(1996), pp. 65-85
144. Mathematical Modeling of Melting and Freezing Processes / Vasilios Alexiades and D. Solomon. – Washington-Philadelphia-London:

Hemisphere Publishing Corporation, 1993.

145. Meyer, G. H. Multidimensional Stefan problems / Meyer, G. H. // J. Numer. Anal. 10 (1973), 522-538.
146. Nishiyama, H. Transformations / Nishiyama H. // Academic, New-York. - 1986.-389 p
147. Plotnikov, P.I. The Stefan problem with surface tension as the limit of phasefield model / Plotnikov P.I., Starovoitov V.N. // Differential Equations. 1993. –V. 29, N3. - P. 395-404.
148. Visintin, A. Models of phase transitions / Visintin, A. - Boston: Birkhauser - Verl., 1996
149. Xiao, R. F. Morphological evolution of growing crystals / Xiao R. F., Alexander J. I. D., Rosenberger F. // A Monte Carlo simulation, Phys. Rev. A 38 (1988), 2447-2456.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. Кинетика роста гранул льда в статических условиях

Таблица А.1 – Набор №2

дата	20.01.2006		24.01.2006		25.01.2006		26.01.2006		01.02.2006	
температура	-18		-25		-33		-42		-27	
диаметры	d_1	d_2	d_1	d_2	d_1	d_2	d_1	d_2	d_1	d_2
	28,500	27,000	28,500	27,000	30,000	28,700	32,900	30,600	32,700	30,700
	27,900	27,200	28,900	27,200	30,300	29,100	31,700	30,100	33,200	32,300
	28,700	27,200	29,800	27,800	31,000	28,700	30,200	30,700	32,100	31,700
	28,300	27,500	28,400	26,600	29,800	28,400	31,300	30,700	34,000	31,300
	28,000	27,300	27,400	27,100	28,800	28,300	31,000	30,300	32,800	31,800
	28,100	27,400	27,800	27,600	29,600	28,600	31,100	30,500	33,100	31,700
	29,100	27,100	28,300	28,600	30,000	29,900	31,700	30,400	32,700	31,800
	28,400	27,400	29,800	27,200	31,000	28,500	31,900	30,900	33,600	31,200
	28,100	27,300	28,600	27,500	29,900	28,500	32,400	30,300	32,900	32,500
	28,800	27,000	29,600	27,800	29,400	28,700	32,400	30,700	32,200	31,900
	28,400	27,700	27,900	27,400	30,600	28,700	31,900	31,500	32,200	31,700
	28,900	26,800	29,600	27,300	30,400	29,300	32,900	30,700	32,400	31,900
	28,800	26,600	29,000	27,100	31,200	28,900	31,700	30,400	33,700	32,200
	28,700	27,000	28,800	27,200	29,200	28,800	31,600	31,000	32,900	31,700
	28,900	27,700	28,000	27,200	30,800	29,700	32,300	30,200	32,500	32,000
	27,600	27,900	28,300	26,800	29,900	28,600	31,600	30,100	32,900	32,500
среднее	28,450	27,256	28,669	27,338	30,119	28,838	31,788	30,569	32,869	31,806
средний	27,853		28,003		29,478		31,178		32,338	
d1-d2	1,194		1,331		1,281		1,219		1,063	
прирост	<i>диаметр</i>		0,219	0,081	1,450	1,500	1,669	1,731	1,081	1,238
к последнему	<i>к среднему</i>		0,150		1,475		1,700		1,159	
прирост	<i>диаметр</i>		0,219	0,081	1,669	1,581	3,338	3,313	4,419	4,550
к начальному	<i>к среднему</i>		0,150		1,625		3,325		4,484	

Масса набора

проволока	23.01.2006		24.01.2006		25.01.2006		26.01.2006		31.01.2006	
	<i>m₂</i>	<i>m₁</i>	<i>m₂</i>	<i>m₁</i>	<i>m₂</i>	<i>m₁</i>	<i>m₂</i>	<i>m₁</i>	<i>m₂</i>	<i>m₁</i>
4,900										
подвес	170,020	152,610	201,480	170,020	229,050	201,480	244,350	229,050	276,430	242,020
49,680	<i>m₂-m₁</i>									
набор	17,410		31,460		27,570		15,300		34,410	
215,860	<i>прирост к начальному</i>		48,870		76,440		91,740		123,820	
чистый										
161,280										
чаша										
63,250										

Временной период опускания набора

<i>Дата</i>	<i>Время</i>	<i>Температура</i>	<i>Время опускания</i>
23.01.06	9:30	-25	5
24.01.06	12:50	-23	0
25.01.06	13:18	-37	10
26.01.06	11:20	-41	0,8
31.01.06	14:40	-29	20,2

Таблица А.2 – Набор №4

дата	20.01.2006		24.01.2006		25.01.2006		26.01.2006		01.02.2006	
температура	-18		-25		-36		-42		-27	
диаметры	d_1	d_2	d_1	d_2	d_1	d_2	d_1	d_2	d_1	d_2
	29,100	28,000	28,900	27,800	28,200	27,200	30,100	29,700	34,000	32,700
	28,300	27,200	29,300	27,400	29,600	28,600	31,700	30,200	32,400	30,900
	28,100	27,400	29,400	27,900	29,900	28,400	31,200	30,500	32,000	31,400
	29,900	27,600	28,800	27,700	31,000	29,000	33,200	31,100	33,100	31,600
	28,800	27,700	28,200	27,400	30,300	28,800	32,200	30,400	32,300	31,400
	27,300	27,300	29,100	27,700	29,200	28,400	30,700	30,900	33,200	31,700
	29,200	27,700	28,300	27,400	30,400	28,500	32,300	30,600	33,300	31,700
	28,900	27,800	29,000	27,700	29,400	28,400	31,400	30,600	33,500	32,400
	28,400	27,400	28,500	27,400	30,300	28,600	32,200	30,800	32,600	31,200
	28,000	27,400	29,200	27,700	29,500	28,800	30,800	30,300	32,300	31,200
	28,900	27,700	27,800	27,300	30,100	28,900	32,100	30,800	32,600	32,100
	28,100	27,500	29,400	27,300	29,600	28,600	31,800	30,500	33,600	32,300
	29,300	27,500	29,900	27,900	30,400	28,800	32,300	30,400	30,600	30,000
	28,800	27,500	28,400	27,300	31,200	28,800	31,300	31,700	33,600	31,800
	28,300	27,300	28,600	27,000	30,500	29,000	32,700	31,000	33,700	32,000
	26,600	27,200	27,100	26,400	30,300	29,900	32,300	30,600	33,600	32,000
среднее	28,500	27,513	28,744	27,456	29,994	28,669	31,769	30,631	32,900	31,650
средний	28,006		28,100		29,331		31,200		32,275	
d1-d2	0,988		1,288		1,325		1,138		1,250	
прирост	<i>диаметр</i>		0,244	-0,056	1,250	1,213	1,775	1,963	1,131	1,019
к последнему	<i>к среднему</i>		0,094		1,231		1,869		1,075	
прирост	<i>диаметр</i>		0,244	-0,056	1,494	1,156	3,269	3,119	4,400	4,138
к начальному	<i>к среднему</i>		0,094		1,325		3,194		4,269	

Масса

проволока	23.01.2006		24.01.2006		25.01.2006		26.01.2006		31.01.2006	
<i>4,840</i>	<i>m₂</i>	<i>m₁</i>	<i>m₂</i>	<i>m₁</i>	<i>m₂</i>	<i>m₁</i>	<i>m₂</i>	<i>m₁</i>	<i>m₂</i>	<i>m₁</i>
подвес	168,610	155,100	195,200	168,610	221,950	195,200	238,240	221,950	270,420	238,240
<i>51,030</i>	<i>m₂-m₁</i>									
набор	13,510		26,590		26,750		16,290		32,180	
<i>219,100</i>	<i>прирост к начальному</i>		40,100		66,850		83,140		115,320	
чистый										
<i>163,230</i>										
чаша										
<i>63,250</i>										

Проведение опытов

<i>Дата</i>	<i>Время</i>	<i>Температура</i>	<i>Время опускания</i>
23.01.06	9:30	-25	5
24.01.06	12:50	-23	45
25.01.06	13:18	-37	10
26.01.06	11:20	-41	1
31.01.06	14:40	-29	20,4

Таблица А.3 – Набор №5

<i>дата</i>	20.01.2006		24.01.2006		25.01.2006		26.01.2006		01.02.2006	
<i>температура</i>	-18		-25		-33		-42		-27	
<i>диаметры</i>	<i>d₁</i>	<i>d₂</i>	<i>d₁</i>	<i>d₂</i>	<i>d₁</i>	<i>d₂</i>	<i>d₁</i>	<i>d₂</i>	<i>d₁</i>	<i>d₂</i>
	28,900	27,500	29,300	28,100	30,600	29,100	33,000	30,900	33,600	31,500
	29,300	27,400	29,300	27,500	30,700	28,600	31,600	31,200	33,300	31,100
	28,500	27,300	29,600	27,800	30,600	28,900	32,000	30,900	34,000	32,000
	28,900	27,400	28,700	27,700	29,700	28,400	33,000	30,200	33,100	32,300
	29,900	27,200	29,500	27,300	31,000	29,200	33,300	30,500	32,500	31,400
	29,200	27,500	28,900	27,900	29,900	28,700	32,000	31,000	33,400	31,600
	28,200	27,400	29,300	27,600	30,200	28,600	32,800	30,500	32,900	31,700
	29,600	27,100	28,900	27,700	30,000	28,400	32,500	30,500	33,700	32,200
	27,600	27,400	29,600	27,400	30,600	28,500	32,100	30,600	33,900	32,400
	29,900	27,600	29,700	28,000	30,900	28,900	32,200	30,700	32,700	31,800
	29,800	27,400	28,700	27,600	30,000	28,700	31,600	30,500	33,200	31,700
	28,200	27,200	29,800	27,900	30,800	28,700	32,700	30,600	33,700	32,100
	29,300	27,300	29,900	27,700	31,100	28,600	32,000	30,600	32,700	31,900
	28,200	27,600	28,400	27,700	29,700	28,600	32,700	30,700	33,900	31,500
	28,400	27,400	30,000	27,600	30,800	28,700	32,300	30,600	32,400	31,600
	28,400	27,400	28,700	27,900	29,800	28,500	32,300	30,500	32,400	31,100
среднее	28,894	27,381	29,269	27,713	30,400	28,694	32,381	30,656	33,213	31,744
средний	28,138		28,491		29,547		31,519		32,478	
d1-d2	1,513		1,556		1,706		1,725		1,469	
прирост	<i>диаметр</i>		0,375	0,331	1,131	0,981	1,981	1,963	0,831	1,088
к последнему	<i>к среднему</i>		0,353		1,056		1,972		0,959	
прирост	<i>диаметр</i>		0,375	0,331	1,506	1,313	3,488	3,275	4,319	4,363
к начальному	<i>к среднему</i>		0,353		1,409		3,381		4,341	

Масса

проволока	23.01.2006		24.01.2006		25.01.2006		26.01.2006		31.01.2006	
	m_2	m_1	m_2	m_1	m_2	m_1	m_2	m_1	m_2	m_1
4,840										
подвес	170,740	157,630	195,150	170,740	223,220	195,150	241,250	223,220	273,960	238,450
49,640	$m_2 - m_1$									
набор	13,110		24,410		28,070		18,030		35,510	
220,880	<i>прирост к начальному</i>		37,520		65,590		83,620		116,330	
чистый										
166,400										
чаша										
63,250										

Проведение опытов

<i>Дата</i>	<i>Время</i>	<i>Температура</i>	<i>Время опускания</i>
23.01.06	9:30	-25	5
24.01.06	12:50	-23	30
25.01.06	13:18	-37	10
26.01.06	11:20	-41	1,2
31.01.06	14:40	-29	20

Таблица А.4 – Набор №6

<i>дата</i>	20.01.2006		24.01.2006		25.01.2006		26.01.2006		01.02.2006	
<i>температура</i>	-18		-25		-36		-40		-27	
<i>диаметры</i>	<i>d₁</i>	<i>d₂</i>	<i>d₁</i>	<i>d₂</i>	<i>d₁</i>	<i>d₂</i>	<i>d₁</i>	<i>d₂</i>	<i>d₁</i>	<i>d₂</i>
	28,600	27,700	29,300	27,600	27,900	27,900	33,000	30,500	32,400	31,300
	28,900	27,400	29,300	26,900	29,900	28,100	33,000	30,400	33,900	31,400
	28,400	27,200	30,000	27,500	30,200	28,100	32,100	30,000	33,800	32,100
	29,300	27,400	28,900	27,400	29,300	28,300	30,400	29,900	32,600	31,500
	28,600	27,400	29,300	27,300	29,900	28,200	31,400	30,000	32,700	31,800
	29,500	27,500	28,900	27,500	30,000	28,400	31,300	30,900	32,500	32,700
	28,500	27,400	28,900	27,600	29,900	28,000	32,400	30,300	32,900	31,500
	28,400	27,300	29,200	27,700	30,200	28,500	31,400	30,700	33,000	30,900
	29,000	27,100	29,000	27,600	31,100	28,600	32,100	30,100	34,100	31,500
	28,000	27,200	29,100	27,300	29,400	28,100	31,600	29,900	32,900	31,800
	29,700	27,300	28,400	27,200	29,700	28,500	31,800	30,600	32,600	31,100
	29,100	27,300	28,200	27,400	31,000	28,600	32,200	30,100	34,000	31,300
	28,500	27,200	27,700	27,100	31,000	28,100	31,600	30,500	34,200	31,600
	28,000	27,400	28,900	27,600	29,300	28,900	33,000	30,200	32,500	30,800
	28,200	27,400	30,000	27,500	30,200	28,200	32,400	29,900	33,600	31,800
	28,400	26,800	29,500	27,600	30,000	29,900	31,300	30,300	32,600	32,000
среднее	28,694	27,313	29,038	27,425	29,938	28,400	31,938	30,269	33,144	31,569
средний	28,003		28,231		29,169		31,103		32,356	
d1-d2	1,381		1,613		1,538		1,669		1,575	
прирост	<i>диаметр</i>		0,344	0,113	0,900	0,975	2,000	1,869	1,206	1,300
к последнему	<i>к среднему</i>		0,228		0,937		1,934		1,253	
прирост	<i>диаметр</i>		0,344	0,113	1,244	1,088	3,244	2,956	4,450	4,256
к начальному	<i>к среднему</i>		0,228		1,166		3,100		4,353	

Масса

<i>проволока</i>	23.01.2006		24.01.2006		25.01.2006		26.01.2006		31.01.2006	
<i>4,000</i>	<i>m₂</i>	<i>m₁</i>	<i>m₂</i>	<i>m₁</i>	<i>m₂</i>	<i>m₁</i>	<i>m₂</i>	<i>m₁</i>	<i>m₂</i>	<i>m₁</i>
подвес	166,950	154,400	187,120	167,050	212,990	187,120	234,230	212,990	266,570	232,590
<i>49,330</i>	<i>m₂-m₁</i>									
набор	12,550		20,070		25,870		21,240		33,980	
<i>217,650</i>	<i>прирост к начальному</i>		32,720		58,590		79,830		112,170	
чистый										
<i>164,320</i>										
чаша										
<i>63,250</i>										

Проведение опытов

<i>Дата</i>	<i>Время</i>	<i>Температура</i>	<i>Время опускания</i>
23.01.06	9:30	-25	5
24.01.06	12:50	-23	15
25.01.06	13:18	-37	10
26.01.06	11:20	-41	2,2
31.01.06	14:40	-29	23

Таблица А.5 – Набор №7

<i>дата</i>	20.01.2006		24.01.2006		25.01.2006		26.01.2006		01.02.2006	
<i>температура</i>	-18		-25		-33		-41		-27	
<i>диаметры</i>	<i>d₁</i>	<i>d₂</i>	<i>d₁</i>	<i>d₂</i>	<i>d₁</i>	<i>d₂</i>	<i>d₁</i>	<i>d₂</i>	<i>d₁</i>	<i>d₂</i>
	28,100	28,500	28,700	27,700	29,500	28,400	31,300	30,400	32,400	31,400
	28,000	27,700	28,800	27,400	29,400	28,300	31,200	30,400	32,200	31,600
	27,000	26,900	29,200	27,600	29,900	28,700	32,500	30,100	34,100	31,700
	28,000	27,900	27,100	27,400	28,000	28,400	32,200	30,800	33,800	31,600
	28,800	27,400	29,700	27,400	30,500	28,500	31,400	30,500	32,400	31,400
	28,800	27,200	28,900	27,300	29,900	28,200	32,200	30,600	32,700	31,500
	29,100	27,700	28,900	27,400	29,600	28,300	31,200	30,000	32,300	31,200
	29,300	27,300	27,900	27,900	28,800	28,700	30,300	30,300	32,500	31,300
	29,400	27,200	27,300	27,300	28,100	28,200	30,900	30,100	32,000	32,000
	28,800	27,200	28,300	27,300	28,600	28,000	31,700	30,000	32,800	31,100
	29,400	28,000	29,500	27,600	30,400	28,200	31,500	30,000	32,400	31,600
	28,800	27,200	28,700	27,500	29,400	28,500	33,300	30,600	33,800	32,500
	27,600	27,300	29,900	28,200	30,400	28,500	30,100	31,300	32,000	32,000
	27,800	27,200	29,600	27,500	30,600	28,100	31,700	30,900	32,900	32,100
	29,800	29,000	28,300	27,700	29,200	28,300	31,500	30,100	32,700	31,600
	27,200	27,600	28,400	28,300	29,400	28,400	31,500	31,000	32,200	31,800
среднее	28,494	27,581	28,700	27,594	29,481	28,356	31,531	30,444	32,700	31,650
средний	28,038		28,147		28,919		30,988		32,175	
d1-d2	0,913		1,106		1,125		1,088		1,050	
прирост	<i>диаметр</i>		0,206	0,013	0,781	0,762	2,050	2,088	1,169	1,206
к последнему	<i>к среднему</i>		0,109		0,772		2,069		1,188	
прирост	<i>диаметр</i>		0,206	0,013	0,987	0,775	3,038	2,863	4,206	4,069
к начальному	<i>к среднему</i>		0,109		0,881		2,950		4,138	

Масса

<i>проволока</i>	23.01.2006		24.01.2006		25.01.2006		26.01.2006		31.01.2006	
	<i>m₂</i>	<i>m₁</i>	<i>m₂</i>	<i>m₁</i>	<i>m₂</i>	<i>m₁</i>	<i>m₂</i>	<i>m₁</i>	<i>m₂</i>	<i>m₁</i>
<i>4,000</i>										
подвес	166,310	151,720	182,680	166,310	209,940	182,680	232,710	209,940	260,070	228,940
<i>49,390</i>	<i>m₂-m₁</i>									
набор	14,590		16,370		27,260		22,770		31,130	
<i>214,970</i>	<i>прирост к начальному</i>		30,960		58,220		80,990		108,350	
чистый										
<i>161,580</i>										
чаша										
<i>63,250</i>										

Проведение опытов

Дата	Время	Температура	Время опускания
23.01.06	9:30	-25	5
24.01.06	12:50	-23	5
25.01.06	13:18	-37	10
26.01.06	11:20	-41	2
31.01.06	14:40	-29	20,2

Таблица А.6 – Набор №8

<i>дата</i>	20.01.2006		24.01.2006		25.01.2006		26.01.2006		01.02.2006	
<i>температура</i>	-18		-25		-36		-41		-27	
<i>диаметры</i>	<i>d₁</i>	<i>d₂</i>	<i>d₁</i>	<i>d₂</i>	<i>d₁</i>	<i>d₂</i>	<i>d₁</i>	<i>d₂</i>	<i>d₁</i>	<i>d₂</i>
	28,800	27,700	29,000	27,700	28,800	29,900	31,500	30,200	33,500	31,800
	28,300	27,200	29,400	27,500	29,200	27,800	31,400	30,000	32,900	31,300
	29,000	27,300	29,600	27,600	29,400	28,200	31,800	30,500	32,200	31,200
	29,300	27,200	29,000	28,000	29,600	30,100	31,900	30,800	31,900	31,500
	29,300	27,200	28,600	27,400	28,800	29,500	31,500	30,100	34,200	31,800
	28,100	27,200	29,000	27,200	29,900	27,800	31,600	30,500	33,900	32,000
	28,000	27,400	27,800	27,500	29,600	28,400	32,000	30,300	33,300	31,900
	29,400	27,300	28,800	26,700	30,000	28,300	32,900	31,000	32,400	31,000
	28,600	27,700	28,900	27,100	30,000	29,800	31,600	30,500	33,000	32,300
	28,500	27,200	28,800	27,700	30,400	29,600	32,000	31,700	33,300	31,800
	28,300	27,200	29,100	27,600	29,600	27,800	31,000	32,600	32,700	31,200
	28,500	27,400	28,000	27,200	29,200	27,800	33,800	30,400	32,400	31,300
	28,300	27,200	28,300	27,500	30,000	28,000	30,900	31,100	33,100	32,400
	28,800	27,600	28,400	26,800	30,700	27,300	31,200	30,100	33,300	31,600
	27,500	27,100	28,500	27,300	30,100	27,800	32,000	30,000	33,200	31,800
	27,700	26,900	27,900	27,500	29,900	28,800	31,800	30,200	33,000	31,800
среднее	28,525	27,300	28,694	27,394	29,700	28,556	31,806	30,625	33,019	31,669
средний	27,913		28,044		29,128		31,216		32,344	
d1-d2	1,225		1,300		1,144		1,181		1,350	
прирост	<i>диаметр</i>		0,169	0,094	1,006	1,163	2,106	2,069	1,213	1,044
к последнему	<i>к среднему</i>		0,131		1,084		2,088		1,128	
прирост	<i>диаметр</i>		0,169	0,094	1,175	1,256	3,281	3,325	4,494	4,369
к начальному	<i>к среднему</i>		0,131		1,216		3,303		4,431	

Масса

<i>проволока</i>	23.01.2006		24.01.2006		25.01.2006		26.01.2006		31.01.2006	
	m_2	m_1	m_2	m_1	m_2	m_1	m_2	m_1	m_2	m_1
4,000										
<i>подвес</i>	163,660	149,140	181,590	163,660	208,230	181,590	234,990	208,230	262,310	231,210
47,650	$m_2 - m_1$									
<i>набор</i>	14,520		17,930		26,640		26,760		31,100	
212,390	<i>прирост к начальному</i>		32,450		59,090		85,850		113,170	
<i>чистый</i>										
160,740										
<i>чаша</i>										
63,250										

Проведение опытов

Дата	Время	Температура	Время опускания
23.01.06	9:30	-25	5
24.01.06	12:50	-23	10
25.01.06	13:18	-37	10
26.01.06	11:20	-41	4,2
31.01.06	14:40	-29	21

Таблица А.7 – Набор №9

<i>дата</i>	20.01.2006		24.01.2006		25.01.2006		26.01.2006		01.02.2006	
<i>температура</i>	-18		-25		-33		-42		-27	
<i>диаметры</i>	<i>d₁</i>	<i>d₂</i>	<i>d₁</i>	<i>d₂</i>	<i>d₁</i>	<i>d₂</i>	<i>d₁</i>	<i>d₂</i>	<i>d₁</i>	<i>d₂</i>
	26,900	26,600	28,000	28,000	29,200	29,900	32,000	31,400	32,300	32,800
	26,100	26,600	26,100	26,700	27,000	27,800	30,500	28,700	30,300	30,900
	26,200	27,300	27,800	27,200	28,900	28,200	29,600	29,400	32,000	31,800
	27,200	27,600	30,500	29,200	31,600	30,100	29,700	30,100	35,000	33,300
	30,500	28,300	29,300	28,500	30,400	29,500	31,800	30,000	33,300	32,100
	29,100	27,300	26,300	27,000	27,700	27,800	30,700	30,200	30,700	30,800
	27,200	27,600	25,500	27,000	27,200	28,400	32,900	32,000	31,800	31,700
	27,200	27,200	26,800	26,500	28,200	28,300	33,900	31,600	31,300	30,400
	26,100	27,100	30,900	28,700	32,000	29,800	30,200	30,200	34,900	32,900
	28,300	27,600	29,500	28,500	30,700	29,600	30,500	30,600	33,400	33,000
	26,100	27,200	27,300	27,200	28,400	27,800	30,000	30,000	31,400	31,200
	27,600	27,200	28,400	27,300	29,200	27,800	32,800	32,000	32,200	31,100
	30,500	28,300	26,700	26,800	27,500	28,000	34,000	32,500	30,400	31,000
	27,600	27,200	26,500	26,400	27,600	27,300	31,200	30,400	31,200	30,900
	26,100	26,100	25,400	27,000	27,200	27,800	29,300	30,200	29,700	31,200
	29,100	27,300	28,700	27,400	29,900	28,800	31,600	32,300	32,500	32,000
среднее	27,613	27,281	27,731	27,463	28,919	28,556	31,294	30,725	32,025	31,694
средний	27,447		27,597		28,738		31,009		31,859	
d1-d2	0,331		0,269		0,362		0,569		0,331	
прирост	<i>диаметр</i>		0,119	0,181	1,187	1,094	2,375	2,169	0,731	0,969
к последнему	<i>к среднему</i>		0,150		1,141		2,272		0,850	
прирост	<i>диаметр</i>		0,119	0,181	1,306	1,275	3,681	3,444	4,412	4,413
к начальному	<i>к среднему</i>		0,150		1,291		3,563		4,412	

Масса

<i>проволока</i>	23.01.2006		24.01.2006		25.01.2006		26.01.2006		31.01.2006	
	m_2	m_1	m_2	m_1	m_2	m_1	m_2	m_1	m_2	m_1
4,780										
<i>подвес</i>	164,990	150,570	185,170	164,990	212,970	185,170	239,550	212,970	267,980	236,070
50,500	$m_2 - m_1$									
<i>набор</i>	14,420		20,180		27,800		26,580		31,910	
213,820	<i>прирост к начальному</i>		34,600		62,400		88,980		117,410	
<i>чистый</i>										
158,540										
<i>чаша</i>										
63,250										

Проведение опытов

Дата	Время	Температура	Время опускания
23.01.06	9:30	-25	5
24.01.06	12:50	-23	15
25.01.06	13:18	-37	10
26.01.06	11:20	-41	4,6
31.01.06	14:40	-29	20

Таблица А.8 – Набор №10

<i>дата</i>	<i>20.01.2006</i>		<i>24.01.2006</i>		<i>25.01.2006</i>		<i>26.01.2006</i>		<i>01.02.2006</i>	
<i>температура</i>	<i>-18</i>		<i>-25</i>		<i>-36</i>		<i>-40</i>		<i>-27</i>	
<i>диаметры</i>	<i>d₁</i>	<i>d₂</i>	<i>d₁</i>	<i>d₂</i>	<i>d₁</i>	<i>d₂</i>	<i>d₁</i>	<i>d₂</i>	<i>d₁</i>	<i>d₂</i>
	29,000	27,200	28,500	27,600	31,200	28,600	32,200	31,300	34,000	32,000
	29,000	26,500	29,000	27,300	30,000	28,400	33,100	31,400	33,400	32,700
	28,500	27,500	28,600	27,100	30,100	29,600	32,700	31,400	33,600	31,600
	29,000	27,800	29,700	27,300	30,000	28,800	33,800	31,000	32,200	32,800
	27,900	27,500	29,000	27,100	29,900	27,900	32,900	31,800	33,800	32,400
	29,400	27,400	27,800	27,400	30,600	28,400	32,700	31,800	33,300	32,200
	28,000	27,000	29,500	27,200	30,000	28,900	32,400	31,200	32,100	31,800
	28,600	27,400	28,300	27,400	29,900	28,400	32,700	31,600	34,000	32,800
	27,800	27,400	28,900	27,200	30,400	28,500	32,200	31,000	33,000	32,400
	28,300	27,200	28,400	27,300	29,000	28,400	33,300	30,900	32,100	33,700
	28,800	27,200	29,200	27,800	29,700	28,400	32,800	30,500	34,200	32,000
	29,300	27,300	29,100	27,800	30,100	28,600	31,500	30,900	33,700	31,900
	28,600	27,400	29,100	27,300	30,600	28,600	32,500	31,400	34,300	32,700
	27,400	27,300	28,900	27,700	30,200	28,700	32,700	31,800	33,500	33,000
	28,300	27,100	28,500	27,000	30,400	28,300	34,500	31,300	33,400	32,400
	29,300	27,200	28,700	27,500	30,300	28,300	33,000	31,200	34,700	32,400
среднее	28,575	27,275	28,825	27,375	30,150	28,550	32,813	31,281	33,456	32,425
средний	27,925		28,100		29,350		32,047		32,941	
d1-d2	1,300		1,450		1,600		1,531		1,031	
прирост	<i>диаметр</i>		0,250	0,100	1,325	1,175	2,663	2,731	0,644	1,144
к последнему	<i>к среднему</i>		0,175		1,250		2,697		0,894	
прирост	<i>диаметр</i>		0,250	0,100	1,575	1,275	4,238	4,006	4,881	5,150
к начальному	<i>к среднему</i>		0,175		1,425		4,122		5,016	

Масса

<i>проволока</i>	23.01.2006		24.01.2006		25.01.2006		26.01.2006		31.01.2006	
	m_2	m_1	m_2	m_1	m_2	m_1	m_2	m_1	m_2	m_1
4,000										
<i>подвес</i>	167,680	152,100	190,950	167,680	218,650	190,950	252,860	218,650	280,080	247,890
49,330	$m_2 - m_1$									
<i>набор</i>	15,580		23,270		27,700		34,210		32,190	
217,650	<i>прирост к начальному</i>		38,850		66,550		100,760		127,980	
<i>чистый</i>										
164,320										
<i>чаша</i>										
63,250										

Проведение опытов

Дата	Время	Температура	Время опускания
23.01.06	9:30	-25	5
24.01.06	12:50	-23	30
25.01.06	13:18	-37	10
26.01.06	11:20	-41	10,2
31.01.06	14:40	-29	20

Таблица А.9 – Набор №11

<i>дата</i>	<i>20.01.2006</i>		<i>24.01.2006</i>		<i>25.01.2006</i>		<i>26.01.2006</i>		<i>01.02.2006</i>	
<i>температура</i>	<i>-18</i>		<i>-25</i>		<i>-36</i>		<i>-40</i>		<i>-27</i>	
<i>диаметры</i>	<i>d₁</i>	<i>d₂</i>	<i>d₁</i>	<i>d₂</i>	<i>d₁</i>	<i>d₂</i>	<i>d₁</i>	<i>d₂</i>	<i>d₁</i>	<i>d₂</i>
	28,500	27,000	28,700	27,400	29,600	28,400	32,700	31,000	34,700	32,600
	27,900	27,200	29,300	27,000	30,500	28,300	32,600	31,000	34,000	32,600
	28,700	27,200	28,900	26,900	30,000	28,000	32,700	31,000	33,800	32,300
	28,300	27,500	28,800	27,200	30,100	28,500	33,000	31,900	33,500	32,000
	28,000	27,300	28,800	27,200	30,200	28,300	32,700	31,300	32,300	33,300
	28,100	27,400	28,300	27,400	29,900	28,500	32,100	31,000	34,500	32,300
	29,100	27,100	29,400	27,400	30,500	28,400	32,900	31,500	32,800	32,200
	28,400	27,400	28,700	27,300	29,900	28,400	32,300	31,500	33,300	32,000
	28,100	27,300	29,200	27,400	30,000	28,200	33,000	31,300	33,100	32,600
	28,800	27,000	29,600	27,400	30,700	28,600	33,100	31,300	33,700	32,300
	28,400	27,700	28,700	27,700	29,400	28,300	32,600	31,000	34,200	32,300
	28,900	26,800	28,800	27,500	30,100	29,100	33,500	31,500	34,000	31,700
	28,800	26,600	28,900	27,800	30,500	28,900	33,300	31,500	33,200	32,700
	28,700	27,000	28,300	27,400	29,900	28,900	32,600	31,200	33,600	32,900
	28,900	27,700	28,300	27,000	29,700	28,900	32,400	32,000	33,000	30,600
	27,600	27,900	28,400	27,400	29,900	29,200	32,800	31,500	33,400	31,400
среднее	28,450	27,256	28,819	27,338	30,056	28,556	32,769	31,344	33,569	32,238
средний	27,853		28,078		29,306		32,056		32,903	
d1-d2	1,194		1,481		1,500		1,425		1,331	
прирост	<i>диаметр</i>		0,369	0,081	1,237	1,219	2,713	2,788	0,800	0,894
к последнему	<i>к среднему</i>		0,225		1,228		2,750		0,847	
прирост	<i>диаметр</i>		0,369	0,081	1,606	1,300	4,319	4,088	5,119	4,981
к начальному	<i>к среднему</i>		0,225		1,453		4,203		5,050	

Масса

<i>проволока</i>	23.01.2006		24.01.2006		25.01.2006		26.01.2006		31.01.2006	
<i>4,000</i>	<i>m₂</i>	<i>m₁</i>	<i>m₂</i>	<i>m₁</i>	<i>m₂</i>	<i>m₁</i>	<i>m₂</i>	<i>m₁</i>	<i>m₂</i>	<i>m₁</i>
<i>подвес</i>	164,460	150,160	190,870	164,460	220,420	190,870	256,440	220,420	285,440	253,110
<i>49,330</i>	<i>m₂-m₁</i>									
<i>набор</i>	14,300		26,410		29,550		36,020		32,330	
<i>217,650</i>	<i>прирост</i>		40,710		70,260		106,280		135,280	
<i>чистый</i>	<i>к начальному</i>									

Таблица 3. – Вероятностные значения скорости намораживания льда

t°С	V, Г/(с•М ²)	n, шт.	s, Г/(с•М ²)	$\pm \delta$, Г/(с•М ²)	V _{min} , Г/(с•М ²)	V _{max} , Г/(с•М ²)
25	70,133	134	4,30	0,73	69,405	70,860
27	79,425	89	15,02	3,16	76,261	82,588
33	110,049	142	9,58	1,58	108,473	111,625
42	190,052	32	8,17	2,95	187,097	193,007

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Показатели роста гранул льда в кипящем слое

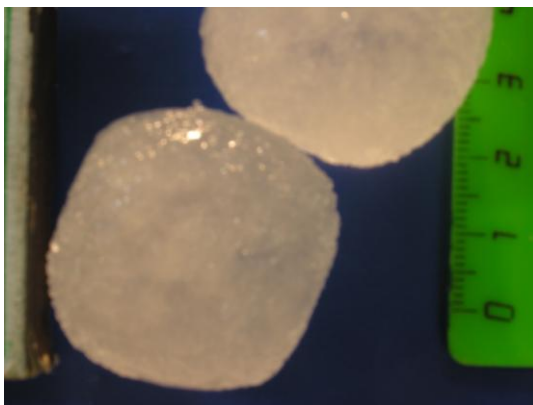
Б.1 Округление кубической затравки. Оценка динамики
производилась с помощью фотосъемки (рисунок Б.1).



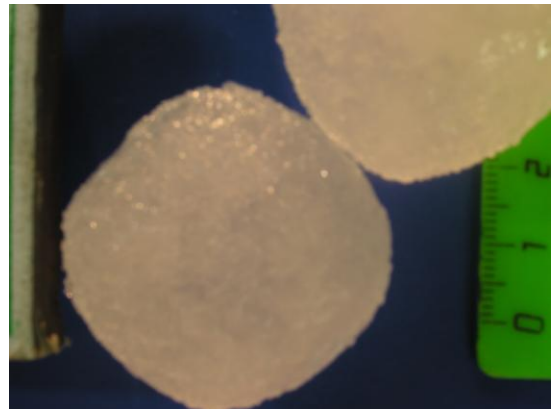
$a=12$ мм; $\tau=0$ мин.



$a=14$ мм; $\tau=3$ мин.



$a=35$ мм; $\tau=24$ мин.



$a=39$ мм; $\tau=27$ мин.

Рисунок Б.1 – Хронология изменения ледяной затравки в аппарате с плоским кипящим слоем в режиме уноса (фото)

Б.2 Изменение фракционного состава

Эксперимент №11 (6.03.07). $t_{y.}=-12^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{вх}}=-10^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{вых}}=-7^{\circ}\text{C}$.

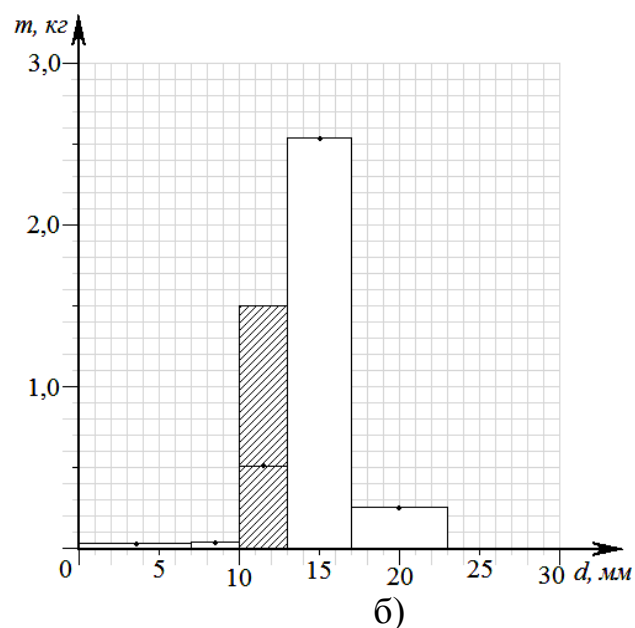
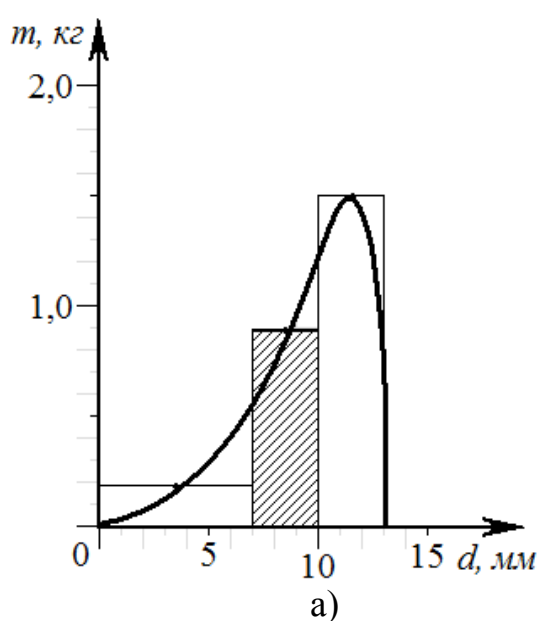
Таблица Б.1 – Изменение фракционного состава №11

Масса льда, кг	Номер фракций					
	№0 ($d_{\text{cp}}=3,5\text{мм}$)	№7 ($d_{\text{cp}}=8,5\text{мм}$)	№10 ($d_{\text{cp}}=11,5\text{мм}$)	№13 ($d_{\text{cp}}=15,0\text{мм}$)	№17 ($d_{\text{cp}}=20,0\text{мм}$)	№23 ($d_{\text{cp}}=25,0\text{мм}$)
m_1			1,498			
m_2	0,035	0,043	0,513	2,538	0,253	
Δm	+0,035	+0,043	-0,985	+2,538	+0,253	

Эксперимент №12 (7.03.07). $t_{y.}=-23^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{вх}}=-19^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{вых}}=-16^{\circ}\text{C}$; $\tau=27\text{мин.}$

Таблица Б.2 – Изменение фракционного состава №12

Масса льда, кг	Номер фракций					
	№0	№7	№10	№13	№17	№23
m_1		0,917				
m_2	0,114	0,119	1,387	2,313	0,316	
Δm	+0,114	-0,798	+1,387	+2,313	+0,316	



а – эксперимент 10; б – 11;

Рисунок Б.2 – Изменение фракционного состава затравки

Б.3 Кинетика намораживания в кипящем слое

Таблица Б.3 – Данные экспериментов в плоском кипящем слое

Дата	Параметры									
	$t_{\text{вх}}$	$t_{\text{вых}}$	d_3	m_1	m_2	$F_{\text{ср}}$	τ	$G_{\text{ср}}$	$Q_{\text{ср}}$	$K_{\text{ср}}$
	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	мм	кг	кг	м^2	мин	кг/ч	Вт	$\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$
25.12.06 ¹	-18	-12	22...25	0,453	0,798	0,08468	8,25	2,509	232,80	458,196
25.12.06 ¹	-18	-13	22...25	0,459	0,785	0,08387	5	3,912	362,95	865,51
06.02.08 ²	-13	-6	13...17	2,209	3,301	0,5387	12	5,460	506,57	134,34

Примечание 1. Эксперимент провели на установке с малой рабочей камерой. Значительная скорость воздуха в рабочей камере привела к уносу затравки и частично орошаемой воды в выхлопную трубу. С целью задержания гранул в камере, ее верхнюю часть накрыли решеткой с диаметром отверстий 5 мм.

Таблица Б.4 – Данные экспериментов в вихревом кипящем слое

Дата	$t_{\text{вх}}$	$t_{\text{вых}}$	d_3	m_1	m_2	Δm	$m_{\text{ср}}$	$F_{\text{ср}}$	τ	$G_{\text{ср}}$
	(-)	(-)	мм	кг	кг	кг	кг	м^2	мин	кг/ч
	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$								
22.02.07	9	4	10...13	0,694	2,084	1,390	1,553	0,3895	19	4,389
22.02.07	9	4	7...10	1,240	3,901	2,661	2,894	0,9437	24,75	6,451
06.03.07	7	3	7...10	0,888	3,359	2,471	2,457	0,8012	30,25	4,901
06.03.07	7	3	10...13	1,498	3,364	1,866	2,604	0,6532	29	3,861
07.03.07	16	8	7...10	0,917	4,212	3,295	3,048	0,9939	27	7,322
08.03.07	18	7	13...17	1,143	2,039	1,796	2,230	0,4278	14,27	7,552
14.01.08	11	8	7...10	1,540	3,401	1,861	1,894	0,5436	14,75	5,451
14.01.08	17	7	7...10	1,188	2,359	0,329	1,457	0,7017	20,25	4,901
14.01.08	17	5	8...10	1,798	2,364	0,574	2,504	0,6536	39	4,861
22.01.08	14	5	8...10	0,617	5,212	4,595	3,348	0,8934	37	6,322
23.01.08	15	4	7...10	1,345	4,939	3,584	2,630	0,6275	11,27	8,552
19.02.08	22	8	8...13	1,840	4,407	2,567	1,494	0,4436	13,27	4,457
19.02.08	19	9	8...13	1,488	3,353	1,865	1,557	0,2017	11,75	5,906
19.02.08	16	6	10...13	1,398	3,366	1,968	2,524	0,5536	18,25	6,865
21.02.08	21	10	10...11	0,717	4,218	3,501	3,148	0,5934	32	4,328
21.02.08	22	10	10...11	1,645	5,935	4,290	2,830	0,3275	31	6,557

Продолжение таблицы Б.4

Дата	$t_{\text{ВХ}}$	$t_{\text{ВЫХ}}$	d_3	m_1	m_2	Δm	$m_{\text{ср}}$	$F_{\text{ср}}$	τ	$G_{\text{ср}}$
	(-) °C	(-) °C	ММ	КГ	КГ	КГ	КГ	М ²	МИН	КГ/Ч
22.02.07	9	4	10...13	0,694	2,084	1,390	1,553	0,3895	19	4,389
22.02.07	9	4	7...10	1,240	3,901	2,661	2,894	0,9437	24,75	6,451
06.03.07	7	3	7...10	0,888	3,359	2,471	2,457	0,8012	30,25	4,901
06.03.07	7	3	10...13	1,498	3,364	1,866	2,604	0,6532	29	3,861
07.03.07	16	8	7...10	0,917	4,212	3,295	3,048	0,9939	27	7,322
08.03.07	18	7	13...17	1,143	2,039	1,796	2,230	0,4278	14,27	7,552
14.01.08	11	8	7...10	1,540	3,401	1,861	1,894	0,5436	14,75	5,451
14.01.08	17	7	7...10	1,188	2,359	0,329	1,457	0,7017	20,25	4,901
14.01.08	17	5	8...10	1,798	2,364	0,574	2,504	0,6536	39	4,861
22.01.08	14	5	8...10	0,617	5,212	4,595	3,348	0,8934	37	6,322
23.01.08	15	4	7...10	1,345	4,939	3,584	2,630	0,6275	11,27	8,552
19.02.08	22	8	8...13	1,840	4,407	2,567	1,494	0,4436	13,27	4,457
19.02.08	19	9	8...13	1,488	3,353	1,865	1,557	0,2017	11,75	5,906
19.02.08	16	6	10...13	1,398	3,366	1,968	2,524	0,5536	18,25	6,865
21.02.08	21	10	10...11	0,717	4,218	3,501	3,148	0,5934	32	4,328
21.02.08	22	10	10...11	1,645	5,935	4,290	2,830	0,3275	31	6,557
02.12.08	17	9	7...10	0,694	2,364	1,770	2,857	0,7934	36	6,782
02.12.08	17	9	7...10	1,240	5,212	3,972	2,998	0,9275	10,27	8,342
03.12.08	19	9	7...10	0,888	4,939	4,051	2,858	0,5436	11,27	4,237
03.12.08	24	7	7...10	1,498	4,407	2,909	2,708	0,6017	10,75	5,456
03.12.08	24	7	7...10	0,917	3,353	2,436	3,746	0,8536	17,25	6,235
06.12.08	23	7	10...13	1,143	3,366	2,223	1,635	0,5934	31	4,898
06.12.08	18	7	10...13	1,540	4,218	2,678	1,096	0,4275	38	6,677

ПРИЛОЖЕНИЕ В. Несущая способность ледяных брусков

Таблица В.1- Результаты прочностных испытаний ледяных брусков

Р, кг	Чистый		Композит		Примечание
	у, мм	у/х	у, мм	у/х	
57,01			56	0,57	Чистый лед (моноблоки)
61,90	68	0,872			
62,80	45	0,468			
62,80	68	0,872			
71,00	58	0,61			
82,20	79	1,162			
100,60	68	0,872			
111,33			69	0,812	Гранулы
116,70			67	0,779	Колотый лед
118,10	86	1,06			Чистый лед
121,00			56	0,59	Гранулы
127,70			73	0,74	
135,60			68	0,829	
135,60			76	0,80	
135,60			75	0,84	
137,70			74	0,75	
136,58			67	0,82	
135,43			75	0,83	
133,11			73	0,85	
127,70			73	0,74	
135,34			68	0,829	
134,03			76	0,80	
135,66			75	0,84	
137,70			74	0,74	
138,88			67	0,80	