

Нвтереср Н
М86

ОДЕССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ ХОЛОДА

На правах рукописи

Мохамед А. Амир Махди

ИССЛЕДОВАНИЕ АККУМУЛЯТОРОВ ХОЛОДА
СО СФЕРИЧЕСИМИ ЗЕРОТОРАМИ

Специальности 05.04.03 - Машины и аппараты холодильной и криогенной
техники и систем кондиционирования.
05.14.05 - Теоретические основы теплотехники

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Одесса - 1995

Работа выполнена в Одесской государственной академии холода

Научные руководители : - кандидат технических наук,
доцент Гарачук В.К.,
- кандидат технических наук,
доцент Деревянко Г.В.

Официальные оппоненты : - доктор технических наук,
профессор Смирнов Г.Ф.
- кандидат технических наук
Червоzubов А.М.

Ведущая организация : Инженерно-технологический
институт "Биотехника"

Защита диссертации состоится 30 марта 1995 г. в 11:00
часов на заседании специализированного Совета К. 068.27.01 при
Одесской государственной академии холода по адресу: 270100, УК-
РАИНА, г. Одесса, ул. Петра Великого, 1/3 - ученый совет ОГАХ.

Автореферат разослан "20" февраля 1995 г.

Изм.	Лист	№ докум.	Подлин.

ученый секретарь
специализированного Совета

технических наук

Р.К. Никульшин
Р.К. Никульшин

Институт ОГАХ. Подписано к печати 17.02.95
№ 100. Заказ 215-95

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

xv 1153
ИНСТИТУТ ХОЛОДА
ОНАХТ
бібліотека

Актуальность темы. Современные промышленные и сельскохозяйственные технологии требуют для реализации значительных энергетических и материальных затрат. Суточный уровень энергопотребления упомянутых технологий зачастую характеризуется значительной неравномерностью, которая внутренне ^{не} может быть устранена путем их реорганизации. Характерными примерами в этом плане могут быть технологические процессы на мясокомбинатах и молочных заводах, где поступление сырья весьма нерегулярно. Пиковый характер нагрузок приводит, как правило, к нарушениям технологических требований обработки пищевых продуктов и, как следствие, к снижению их качества.

Один из возможных путей технического решения этой проблемы - это включение в технологический цикл различного типа тепло- и хладоаккумуляторных устройств. Такого же типа аккумуляторы применимы и в системах кондиционирования воздуха. При этом становится возможным выравнивать не только суточную, но и сезонную неравномерность в энергопотреблении. Применение аккумуляторов холода зероторного типа открывает перспективу использования естественного холода, решая параллельно экологические задачи по снижению загрязнения атмосферы хладоагентами и экономии энергетических ресурсов. Указанные соображения определяют актуальность исследований, направленных на разработку тепло- и хладоаккумуляторных устройств.

Целью работы является разработка и исследование аккумулятора холода зероторного типа с рабочими элементами сферического типа, заполненными водой.

В работе решались следующие задачи:

- разработать математическую модель аккумулятора холода с элементами сферической формы;
- экспериментально установить особенности замораживания воды в сферических зероторах в условиях вынужденной и естественной конвекции;
- экспериментально выявить особенности динамики охлаждения элементов в аккумуляторе холода;
- экспериментально определить особенности динамики замораживания жидкости в системе сферических элементов аккумулятора холода;

- обобщить полученные результаты в рамках методики расчета аккумулятора холода.

Научное положение, закрепленное в работе. Фазовый переход в зероторах, заполняющих аккумулятор холода, приводит к формированию вдоль по течению температурной волны с убывающей по времени амплитудой и смещением максимума в сторону выходного сечения охлаждающей среды.

Научная новизна и основные научные результаты.

1. Разработана математическая модель аккумулятора холода с зероторными сферическими элементами.

2. Получено аналитическое решение уравнения энергии охлаждающей среды, описывающее динамику полей температур вдоль по течению.

3. На основе задачи Стефана разработан алгоритм численного решения уравнения энергии промежуточного теплоносителя, определяющий динамику замораживания и температурных полей в сферических зероторах.

4. Экспериментально получены данные о динамике изменения объемной доли замороженной воды и температурных полей в сферических зероторах при естественной и вынужденной конвекции.

5. Опытным путем определена динамика изменения полей температур охлаждающего теплоносителя.

6. Численным путем получены данные о динамике температурных полей в охлаждающем теплоносителе внутри зероторов, а также данные по доле замороженной воды.

Практическая значимость полученных результатов исследования заключается в том, что разработанная методика расчета аккумулятора холода позволяет создавать их на базе зероторов, обладающих целым рядом преимуществ, существенных для снижения неравномерности энергопотребления в технологических циклах.

Результаты работы переданы для использования в институте *„Агрохолод“ Минсельхоза Украины*

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных семинарах ОГАХ, а также представлены в двух печатных работах.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четы-

рех глав, выводов, списка использованных источников (113 наименований). В ней содержится 119 страниц основного текста, в том числе 28 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлена общая характеристика работы и обосновывается актуальность темы.

В первой главе представлены обзор и анализ публикаций различных исследователей, технических решений, авторских свидетельств и патентов в области создания устройств для аккумуляции тепловой энергии. Анализ технических решений по теплоаккумулирующим устройствам показывает, что наибольший эффект для устройств такого типа достигается при использовании теплоаккумулирующей среды (промежуточного теплоносителя), претерпевающей в обоих циклах (нагрев, охлаждение) фазовый переход. Эффективность процессов в этих циклах во многом определяется развитием поверхности контакта с промежуточным теплоносителем. Целый ряд соображений (известных по литературе) показывает, что применение в аккумуляторах холода сферических элементов, заполняемых водой, представляется достаточно целесообразным. Путь от технической идеи до конкретной реализации устройства лежит либо через модельный (полупромышленный) эксперимент, либо через разработку математической модели. Применение того либо иного подхода определяется экономической целесообразностью. Наибольший эффект обычно достигается путем соединения обоих подходов; при этом математическая модель дополняется экспериментальными данными, макетирующими реальный объект.

Анализ математических моделей, используемых для описания теплоаккумулирующих устройств, позволил выделить пять различных подходов, из которых наиболее реалистичной представляется задача, сформулированная Нуссельтом в предположении, что теплопроводность аккумулялирующей среды равна нулю в направлении движения теплоносителя и конечна по нормали к нему. Очевидно, что этот подход замыкается на процессы в элементах с промежуточным теплоносителем, претерпевающим фазовый переход. Обычно, при постановке задач с фазовым переходом используются представления, выработанные Стефаном. Анализ задач, реализующих этот подход, показывает, что в настоящее время используется две гипотезы, в рамках которых источник тепла фазового перехода локализуется либо на границе раздела фаз,

либо в объеме жидкости. В обоих случаях задачи замыкаются через предположение равенства температуры на границе раздела фаз (в приграничной области) некоторому фиксированному значению, называемому температурой фазового перехода. В обзоре рассмотрены возможности аналитического и численного решения задачи о фазовом переходе, дающие оценки времени затвердевания, температурных полей и массы замороженного льда.

В конце главы формулируются основные задачи диссертационной работы.

Вторая глава посвящена разработке математической модели и алгоритма расчета теплоаккумулирующих устройств с фазовым переходом. Поверхность теплообмена для сферических элементов аккумулятора может быть выражена через их объемную концентрацию $\beta = \Phi_0/\Phi_A$ и коэффициент формы $f = F_0/\Phi_0$.

С учетом введенных обозначений уравнение энергии для охлаждающего (нагревающего) теплоносителя может быть записано в балансных представлениях:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + U \frac{\partial t}{\partial x} = \alpha \frac{\beta f}{\rho C (1-\beta)} (t_{\text{пе}}^0 - t). \quad (1)$$

В предположении, что скорость потока и коэффициент теплоотдачи постоянны, уравнение (1) допускает аналитическое решение:

$$t(x, \tau) = t' e^{-\frac{\gamma}{U} x} + \frac{\gamma}{U} \int_0^x e^{-\frac{\gamma}{U}(y-x)} t_{\text{пе}}(\tau - \frac{x-y}{U}, y) dy. \quad (2)$$

$$\text{где } \gamma = \alpha \frac{\beta f}{\rho C (1-\beta)}.$$

При замораживании воды в объеме, масштаб которого сравним с масштабом конвективных движений, вызванных естественной конвекцией, увеличение интенсивности теплообмена может быть учтено путем ввода в уравнение энергии эффективного коэффициента теплопроводности. Тогда

$$\rho_{\text{см}} C_{\text{см}} \frac{\partial t_{\text{в}}}{\partial \tau} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (\lambda_{\text{эф}} r^2 \frac{\partial t_{\text{в}}}{\partial r}) + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} (\lambda_{\text{эф}} \times \sin \theta \frac{1}{r} \frac{\partial t_{\text{в}}}{\partial \theta}) + q \quad (3)$$

с начальными условиями

$$\tau = 0, \quad t_{\text{в}} = t_{0\text{в}}(r, \theta) \quad (4)$$

и краевыми условиями

$$t_{\text{в}}(\tau, 0, r) = t(\tau, 2\pi, r); \quad \left. \frac{\partial t}{\partial \theta} \right|_{\theta=0} = \left. \frac{\partial t}{\partial \theta} \right|_{\theta=2\pi}. \quad (5)$$

$$r = 0, \quad \frac{\partial t}{\partial r} = 0; \quad r = r_{\text{пе}}, \quad \lambda_{\text{эф}} \frac{\partial t_{\text{в}}}{\partial r} = -\alpha (t_{\text{пе}} - t). \quad (6)$$

Задача (3) представляет собой модифицированную задачу Стефана с коэффициентами переноса, претерпевающими разрыв на границе раздела фаз. В рамках предлагаемого подхода предполагается, что источник тепла фазового перехода находится не на поверхности раздела фаз, а в объеме жидкости. Очевидно, что источник объемного тепловыделения пропорционален объемной доле вымороженной воды ϕ и может быть представлен соотношением:

$$q = \rho_{\text{см}} L \frac{\partial \phi}{\partial \tau} \frac{\partial t_{\text{в}}}{\partial \tau}. \quad (7)$$

Решение уравнения (2)-(4) из-за нелинейности может быть получено только численными методами с использованием конечно-разностной аппроксимации уравнения (3). Для построения алгебраического аналога уравнения (3) воспользуемся методом локального интегрирования. В рамках этого подхода формально интегрируя уравнение энергии по некоторому контрольному объему (рис. 1) и полагая:

- 1) на каждой плоскости объема потоковые характеристики могут быть определены как среднеарифметические;
- 2) на каждом временном слое массовые характеристики определяются как среднеобъемные;
- 3) производная $\partial t_{\text{в}}/\partial \tau$ ориентирована по направлению теплового потока.

приходим к итерационной схеме для интегрального узла:

$$t(i, j, k) = \sum_{\substack{l=1 \\ j=m \\ m=k}}^{l=N} t_{1,m,n} \frac{A_{1,m,n}}{A_{1,j,k}}. \quad (8)$$

Устойчивость схемы (8) обеспечивается преобладанием массовой теплоемкости ρC над коэффициентом теплопроводности. Решение задачи для всех узлов сеточной области сканирования всех точек. Для определения температуры охлаждающего теплоносителя в разрабо-

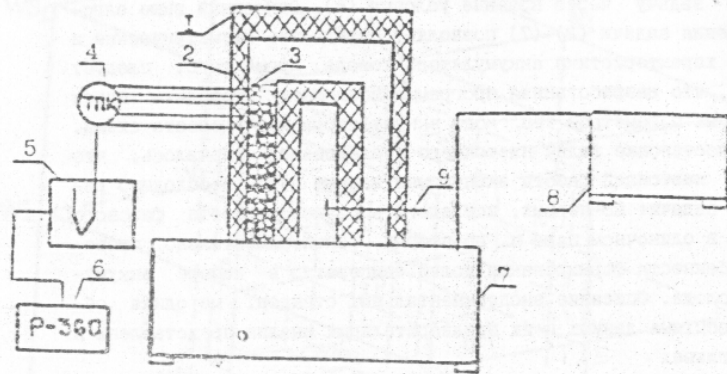


Рис. 2. Схема экспериментального стенда
 1 - корпус рабочего участка; 2 - изоляция; 3 - сферические элементы; 4 - переключатель; 5 - холодный спай; 6 - потенциометр; 7 - морозильная камера; 8 - холодильная машина; 9 - шifter

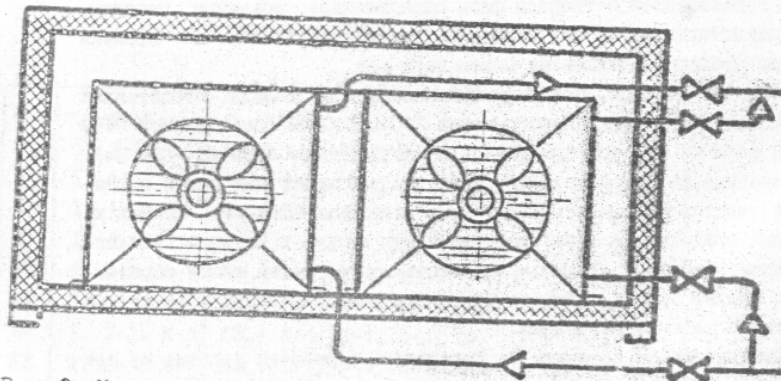


Рис. 3. Морозильная камера

данных расстояниях от входа: $x/L = 0, 0,38, 0,62, 1$. Время замораживания воды фиксировалось по температуре внутри шара. В эксперименте через фиксированные промежутки времени проводились замеры полей температуры в каждом из четырех сечений рабочего участка. Эксперимент проводился вплоть до стабилизации температуры внутри шара в последнем по ходу потока сечении рабочего участка. Как отмечалось выше, в связи с тем, что в эксперименте при фазовом переходе высока вероятность случайной ошибки наблюдений в каждой временной точке замеры воспроизводились не менее пяти раз. Для оценки статистической надежности опытных данных для каждой точки рассчитывалось математическое ожидание и дисперсия результатов наблюдений, а затем в предположении нормальности закона распределения измеряемых величин проводилась оценка доверительного интервала и гипотезы равенства центров распределения случайной величины.

Оценка погрешности величин, непосредственно измеряемых в опыте, проводилась по приборной погрешности, а погрешность результатов косвенных наблюдений - путем логарифмирования и последующего дифференцирования соответствующих их определению выражений.

Как методика проведения опытов, так и методика обработки данных позволили получить сведения об изменении объемного содержания льда и динамике полей температур при образовании твердой фазы для сферических элементов аккумулятора холода и информации о динамике полей температуры охлаждающей среды.

В четвертой главе представлен анализ как экспериментальных, так и теоретических исследований процессов переноса в аккумуляторе холода. На первом этапе численных исследований на основе уточнения влияния естественной конвекции на процессы переноса при фазовом переходе в элементах аккумулятора холода проводилась корректировка модельных представлений, предложенных во второй главе. Коррекция модели проводилась на основе согласования времени вымораживания воды в объеме элемента, полученного в натурном и численном экспериментах. Расчеты показали, что для малых объемов наличие естественной конвекции при фазовом переходе интенсифицирует процессы переноса в жидкой фазе приблизительно в двадцать раз, что согласуется с известными в литературе данными. Некоторые из результатов расчета в сопоставлении с опытными данными в виде зависимости $\bar{\varphi} = f(\tau/\tau_0)$ представлены на рис. 4. Следует отметить, что в диапазоне изменения диаметра сферы ($d = 80-56$ мм) как в ус-

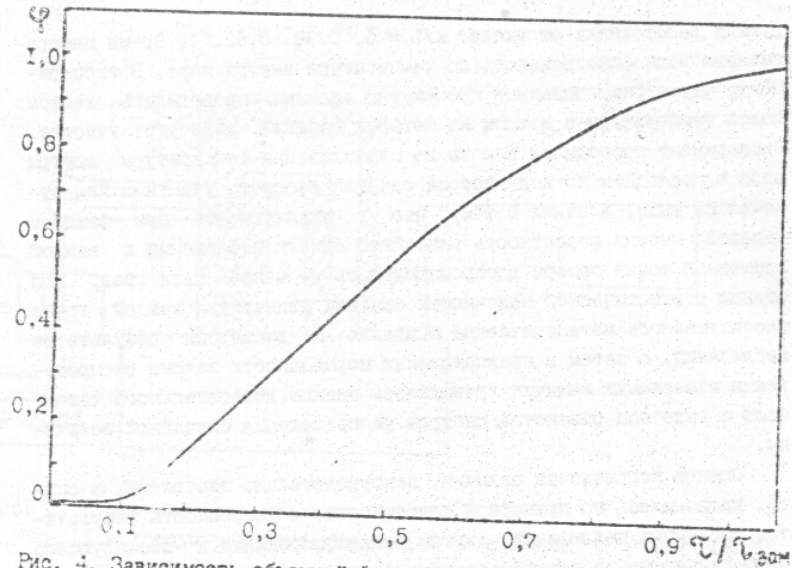


Рис. 4. Зависимость объемной формы твердой фазы от безразмерного времени

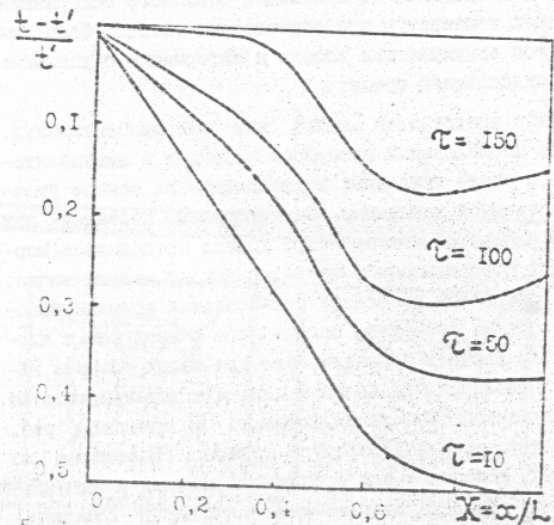


Рис. 5. Динамика температурных полей охлаждающего теплоносителя

ловиях охлаждения при естественной, так и при вынужденной конвекции эта зависимость имеет универсальный характер и аппроксимируется в диапазоне изменения $\tau/\tau_3 = 0,05-0,95$ со среднеквадратичной погрешностью 7% функцией:

$$\bar{\varphi} = 1 - \exp \{- 3,28 (\tau/\tau_3)^2\}. \quad (9)$$

Изучение динамики температурных полей и изменения во времени среднеантальпийной температуры показывает, что в начальный момент времени процессы переноса внутри сферы определяются, в основном, тепловой инерцией, а в диапазоне изменения $\tau/\tau_3 = 0,4-0,8$ - фазовым переходом. Эти результаты согласуются как с данными натурных, так и численных исследований и косвенно подтверждают существенное влияние естественной конвекции на процессы переноса при фазовом переходе. Для определения эффективности работы аккумулятора холода чрезвычайно важным является анализ закономерностей изменения во времени температурных полей охлаждающего (нагреваемого) теплоносителя (рис. 5). Из рисунка видно, что температурное поле охлаждающего теплоносителя вдоль по течению имеет волнообразный характер. Величина амплитуды этой волны и расположение ее максимума существенно изменяются со временем. Причем со временем величина амплитуды убывает, а максимум - смещается к выходу из камеры в зависимости от значения комплекса γ и температуры поверхности элементов или, другими словами, определяется тепловой инерцией объекта в целом.

ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Применение аккумуляторов холода зероторного типа является эффективным средством энерго- и ресурсосбережения, позволяющим не только уменьшить установленную мощность оборудования, но и повысить качество продуктов, подверженных холодильной обработке. Наряду с известными традиционными преимуществами аккумуляторов с фазовыми переходами, зероторные позволяют организовать непосредственный контакт с обрабатываемым продуктом, исключая промежуточные теплоносители. Вместе с тем на сегодняшний день методы расчета зероторных аккумуляторов, базирующиеся на математическом моделировании практически отсутствуют, что сдерживает их разработку и внедрение. Необходимо отметить, что работы по экспериментальному

исследования зероторных аккумуляторов и отдельных зероторов также крайне редки.

Выбранные для теоретического и экспериментального изучения сферические пластмассовые зероторы представлялись весьма перспективными по целому ряду параметров: технологичность, возможности автоматизации и др.

2. Экспериментальное исследование сферических водозаполненных зероторов с $d = 56+80$ мм позволило установить интенсификацию процессов переноса тепла примерно в 20+25 раз. При этом среднеобъемное содержание льда является функцией как времени процесса, так и продолжительности процесса полного замораживания.

3. В аккумуляторах холода с фазовым переходом температурное поле охлаждающего теплоносителя имеет волнообразный характер с убывающей по времени амплитудой и со смещением максимума вниз по течению.

4. Разработанные математические модели аккумуляторов холода зероторного типа могут быть использованы для проектирования охлаждающих объектов с целью оптимизации как отдельных элементов, так и систем в целом.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Гарачук В.К., Деревянко Г.В., Мохамед А. Амир Махди. Расчетная модель аккумулятора холода регенеративного типа со сферическими зероторами. - Деп. в ИКНТБ Украины. - 1994.
2. Деревянко Г.В., Мохамед А. Амир Махди. Исследование динамики вымораживания льда в сферических элементах. - Деп. в ИКНТБ Украины. - 1995.

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

t - температура, $^{\circ}\text{C}$; ϵ - коэффициент формы, $1/\text{м}$; β - объемная концентрация, $\text{м}^2/\text{м}^3$; ρ - плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$; C - теплоемкость, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$
 U - скорость, $\text{м}/\text{с}$; τ - время, с ; x, y - продольные координаты, м ;
 θ - угловая координата элемента; r - радиальная координата элемента, м ; λ - коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{K})$; A - коэффициент квадратичных формул; φ - объемное содержание льда; Φ - объем, м^3 .
 Индексы: v - элемент; pe - поверхность элемента; cm - смесь; ef - эффективный; zm - замораживание; i, j, k - координатные индексы.

xv 1153
 ИНСТИТУТ ХОЛОДА
 ОНАХТ
 бібліотека

Анотация

Мохамед А. Амир Махди. Дослідження акумуляторів холоду із сферичними зероторами. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук по спеціальностям: 03.04.05 - машини та апарати холодної і криогенної техніки та систем кондиціонування повітря; 05.14.05 - теоретичні основи теплотехніки. Одеська державна академія холоду. Одеса, 1995. Досліджуються проблеми: математичне моделювання акумуляторів холоду на основі сферичних водозаповнених пластмасових зероторів, їх експериментальне дослідження, а також модельне та дослідне живчення окремих сферичних зероторів з точки зору інтенсифікації процесів переносу тепла. Встановлено хвильовий характер температурного поля охолоджуючого агенту внаслідок зміни фазового стану в зероторах. При цьому амплітуда зменшується, а максимум зміщається вниз за течією. Розроблені математичні моделі акумуляторів холоду зероторного типу можуть використовуватися при їх проектуванні та при оптимізації систем охолодження.

Ключові слова: акумулятор, зеротор, температурне поле, лід, наморожування.

Summary

Mokhamed A. Amir Makhdi. The cold accumulator with spherival zerotors research. The dissertation for scientific degree of technical sciences on the speciality: 03.04.05 - the machines and apparatus of refrigeration and cryogenics and air condition systems; 05.14.05 - the thermal engineering foundations. Odessa State Academy of Refrigeration. Odessa, 1995. Investigated problems: mathematical modelling of the cold accumulators on the basis of spherical water filled plastic zerotors, their experimental investigation of individual spherical zerotors from the heat transfer process's intensification point of view. Wave regime of the temperature field of the cooling agent was established in the wake of phase transition in zerotors. In this time the temperature amplitude reduce and maximmue displace down in stream. Designed math models of the cold accumulators of zero-toring type are usefull in the cooling system development and optimization.

Key words: accumulator, zerotor, temperature field, ice, building.