

Д-р техн. наук **С.О. ФИЛИН**,
канд. техн. наук
Б. ЗАКШЕВСКИЙ
Щецинский технический университет
(Польша)

УДК 621.565.2

АККУМУЛЯЦИЯ ХОЛОДА: СПОСОБЫ И СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ

Настоящая статья открывает цикл публикаций, посвященных аккумуляции холода в различных сферах применения холодильного оборудования.

Сферические насадки. Сферические, или шаровые, насадки, называемые также зероторами, широко используют в промышленных технологических процессах, главным образом как аккумуляторы теплоты. Не менее успешно их можно применять для аккумуляции холода в малых и средних холодильных установках различного назначения.

Шаровой зеротор представляет собой водонепроницаемую герметичную шаровую оболочку, частично заполненную теплоаккумулирующим веществом (ТАВ), температура плавления которого не превышает температуры термостатирования охлаждаемого объекта. В пищевых холодильных технологиях в качестве ТАВ обычно используют воду, реже – солевые растворы и другие антифризы. Степень заполнения водой внутреннего объема зеротора составляет 85–92%, что позволяет за счет свободного воздушного пространства компенсировать увеличение объема при замерзании. Оболочку зеротора выполняют эластичной (из пищевой пластмассы) или жесткой (из соответствующих металлов и сплавов).

При охлаждении напитков зероторами заменяют опускаемые в бокал кубики льда. Индивидуальным потребителям предлагаются комплекты из 8–12 разноцветных шариков диаметром 28...32 мм, которые предназначены для предварительного замораживания в бытовом холодильнике. Важное преимущество такого способа охлаждения напитка состоит в том, что здесь нет непосредственного контакта льда с напитком, а сам напиток не разбавляется водой при таянии льда.

При проектировании холодильного оборудования или технологического

Spherical eutectic plates as used for cold accumulation in small and medium size refrigeration installation have been described. The methods for the intensification of heat exchange during freezing of the eutectic plates in an ice maker and during cooling of the object have been shown. The designs of refrigeration accumulating packs used in heat insulated containers are presented.

процесса с аккумуляцией холода в зероторах задача распадается на несколько составляющих:

➤ *Оптимальное проектирование самого зеротора* с целью снижения энергозатрат или уменьшения продолжительности замораживания и достижения максимальной эффективности его работы.

➤ *Организация технологического процесса охлаждения объекта.* Эта задача состоит в основном в оптимальном размещении зероторов в объеме объекта, организации движения зероторов или взаимного перемещения их и объекта охлаждения с целью интенсификации теплообмена или обеспечения равномерности (или заданного профиля) температурного поля в среде объекта. Эти задачи характерны для промышленных теплообменных аппаратов с регулярными и нерегулярными насадками.

➤ *Проектирование устройства для замораживания шаровых зероторов, или иначе, льдогенераторов особого типа.* Задачу создания таких специализированных замораживающих устройств до сих пор вообще не ставили, хотя при промышленном и полупромышленном (в общественном питании) применении зероторов возможностей бытового холодильника уже явно не хватает.

Представленное деление на составляющие в значительной степени условно, и только комплексное решение всей цепочки взаимосвязанных проблем дает наилучший результат.

Теория и методы расчета промораживания шара достаточно подробно описаны в ряде работ [3, 5, 9, 12]. Динамика льдообразования в сферических зероторах иллюстрируется с помощью рис. 1. На рис. 1, а приведена по-

лученная численными методами расчетная зависимость положения фронта кристаллизации от времени в сферическом зероторе [4] в сопоставлении с экспериментальными данными, полученными автором на водонаполненных сферических зероторах наружным диаметром 29 мм.

На рис. 1 приняты следующие обозначения:

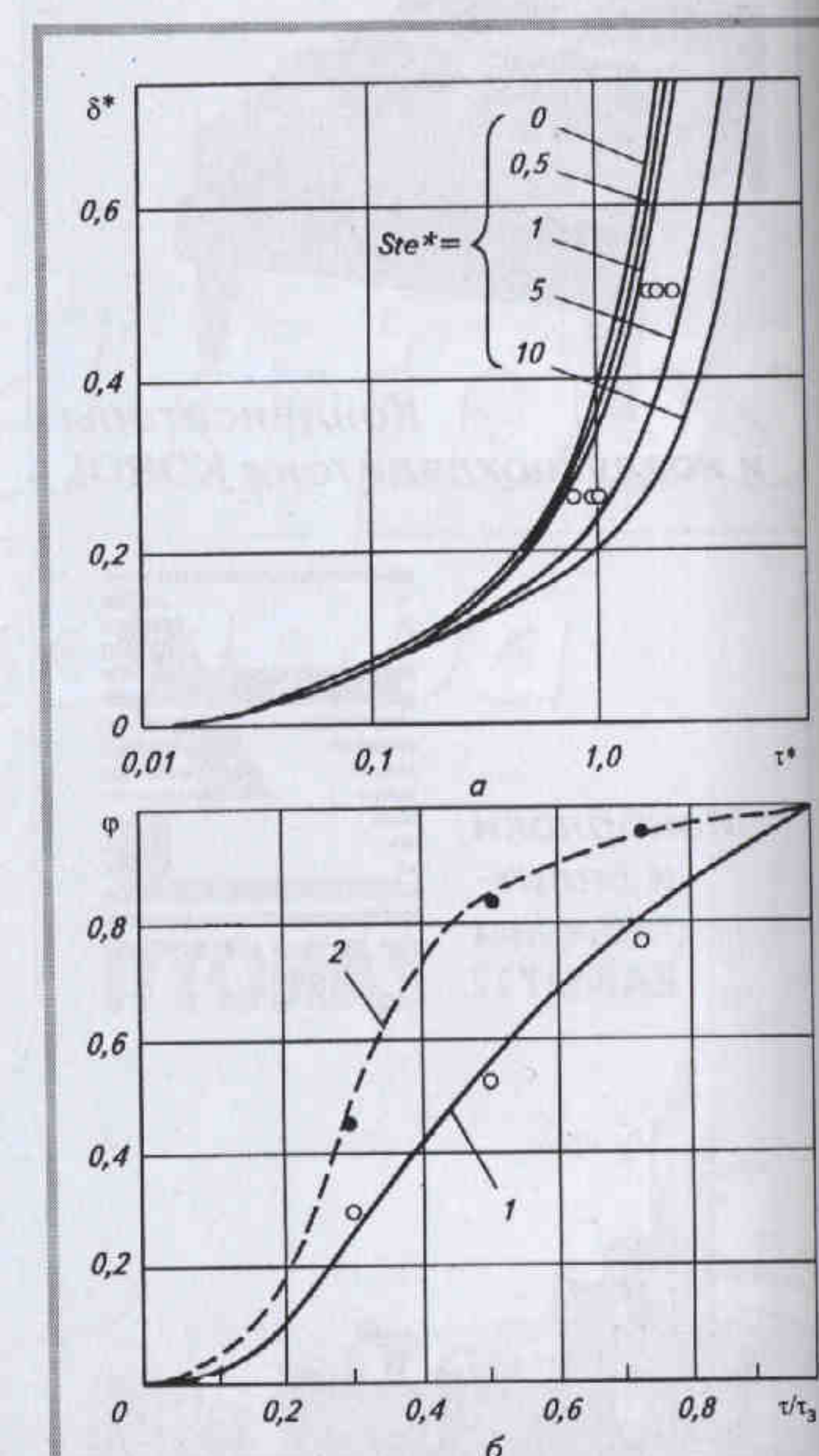


Рис. 1. Динамика льдообразования в сферических зероторах:
а – расчетная зависимость безразмерной координаты от безразмерного времени для различных модифицированных чисел Стефана, по данным [5]; б – обобщенная эмпирическая зависимость объемной доли вымороженной воды от относительного времени для зероторов: 1 – диаметром 56...80 мм, по данным [6]; 2 – диаметром 29 мм с внутренним ребрением в виде стального стержня, по данным авторов; ●○ – усредненные данные эксперимента

относительная толщина замороженного слоя

$$\delta^* = \delta/r_0; \quad (1)$$

относительное время

$$\tau^* = q\tau/(\rho Rr_0); \quad (2)$$

модифицированное число Стефана

$$Ste^* = qcr_0/\lambda R, \quad (3)$$

где δ — толщина замороженного слоя;

r_0 — радиус сферы;

q — удельный тепловой поток на единицу поверхности теплообмена;

τ — время;

ρ — плотность;

R — удельная теплота плавления ТАВ;

c — теплоемкость;

λ — теплопроводность.

Экспериментально полученные значения продолжительности замораживания ТАВ в зероторах превышают на 15–30 % расчетные, что можно объяснить неучтенным в методике расчета влиянием термического сопротивления оболочки и неполнотой заполнения объема зеротора. Удовлетворительное совпадение данных по динамике льдообразования с данными Махди [6], полученными на зероторах большего диаметра, свидетельствует, что предложенная им обобщающая зависимость в виде

$$\varphi = 1 - \exp[-3,28(\tau/\tau_z)], \quad (4)$$

где φ — объемная доля вымороженной воды;

τ_z — время замораживания,

может быть распространена и на сферы диаметром 25...50 мм, используемые в пищевых технологиях охлаждения напитков.

В то же время при исследовании процессов замораживания зероторов в льдогенераторах с целью их рационального проектирования вопрос об определении положения фронта кристаллизации в данный момент времени представляет, скорее, теоретический, а не практический интерес, так как минимизации подлежит полное время замораживания.

Время замораживания и таяния существенно зависит от наружных условий теплообмена зеротора с жидкой средой, определяемых режимом движения среды относительно зеротора, или наоборот. Так, при перемешивании трубочкой с частотой 1 об/с 2–4 шариков в стакане с водой, начальная температура которой равна 20 °С, пол-

ное время таяния, определяемое визуально, сокращалось с 19 до 12 мин. Но, поскольку не всегда можно обеспечить прямое механическое воздействие на зеротор, следует искать и другие пути интенсификации теплообмена при замораживании и таянии ТАВ в зероторах.

Во всех упомянутых выше источниках рассматривается правильная сфера, так как только эта геометрическая форма обеспечивает одновременно: технологичность изготовления зеротора; удобство его использования; соответствие гигиенической обработки требованиям санитарных норм.

Поэтому, несмотря на очевидность повышения скорости протекания теплообменных процессов, вопрос о наружном оребрении пищевых зероторов пока не стоит, так же как и вопрос об использовании других форм с большим отношением площади поверхности к объему. Следовательно, в поле нашего зрения остаются следующие средства интенсификации теплообменных процессов внутри и снаружи зеротора:

- внутреннее оребрение;
- перемешивание ТАВ внутри зеротора;
- обеспечение движения зеротора относительно окружающей его газовой или жидкой среды и на стадии замораживания, и на стадии таяния, т.е. создание условий для работы зеротора в режиме аккумулятора холода.

Внутреннее оребрение зеротора позволяет активизировать наиболее удаленную от поверхности центральную зону объема ТАВ. При соответствующей настройке таймера режима охлаждения эта зона в большинстве зероторов остается незамороженной на 5...10% объема. В случае полного замораживания зеротора его центральная зона часто не успевает растаять в процессе охлаждения напитка. Она же является основным сдерживающим фактором повышения быстродействия льдогенератора при необходимости 100%-ного замораживания объема ТАВ. В отличие от открытой ячеистой льдоформы, где возможности формирования конфигурации получаемого льда и использования вмораживаемых теплопроводных элементов ограничиваются различными факторами [13],

при решении задачи внутреннего оребрения зеротора фантазия разработчика ограничивается только технологическими возможностями производства.

Для достижения максимальной эффективности работы внутреннее ребро выполняют из материала с высоким коэффициентом теплопроводности, например из меди или алюминия. Если при этом оболочка зеротора выполнена из полимерного материала, например из полипропилена высокого давления, то выход ребер на наружную поверхность нежелателен не только из-за контакта с напитком, но и по причине необходимости герметизации места соединения ребра с оболочкой.

В известной конструкции насадки с диаметрально установленным трубчатым стержнем [7] решена первая из вышеперечисленных задач, но только для зероторов с металлической оболочкой (рис. 2, а). Здесь внешняя среда может свободно протекать по трубчатому стержню, омывая при этом центральную зону ТАВ в зероторе. Развитие этой идеи, предложенное В.А.Антоненко, предполагает наличие нескольких сквозных трубчатых полостей в насадке, расположенных по взаимно перпендикулярным осям. Такие конструкции из-за сложности их санитарной обработки не могут быть рекомендованы для непосредственного охлаждения употребляемых в пищу жидкостей. Все поставленные задачи одновременно решаются с помощью следующих вариантов конструкций, которые не накладывают ограничений на выбор материала оболочки и области применения.

На рис. 2, б изображен единичный зеротор с магнитным стержнем [15]. Стержень 5 из ферромагнитного материала жестко закреплен внутри оболочки 2, состоящей из двух сваренных между собой половинок. В процессе замораживания жидкой фазы ТАВ 3 зеротор помещают в емкость льдогенератора, заполненную антифризом 6, имеющим рабочую температуру –10...–20 °С. При включении магнитного поля стержень 5 ориентируется по силовым линиям магнитного поля, поворачивая зеротор в объеме антифриза и интенсифицируя при этом

теплообмен снаружи и внутри зеротора. При изменении полярности поля на противоположную стержень вместе с зеротором поворачивается на 180° . Воздействуя на частоту изменения поля, можно управлять интенсивностью теплообмена и соответственно скоростью замораживания. Таким образом магнитный стержень-ребро увеличивает и конвективную, и теплопроводную составляющие коэффициента теплопередачи, сокращая расчетное значение времени полного замораживания ТАВ в 2–3 раза по сравнению с неоребранным зеротором.

В конструкции зеротора, показанной на рис. 2, в [8], роль внутреннего оребрения играет цельнометаллический или полый шарик из магнитного материала, свободно перемещающийся в объеме ТАВ. Замораживание в этом зероторе имеет свои особенности. В начале процесса до включения поля шарик находится в состоянии покоя внизу зеротора. После включе-

ния поля он притягивается к одному из полюсов магнита 7, увлекая за собой зеротор. При переключении полярности шарик и зеротор стремятся подвинуться к противоположному полюсу. Колебания шарика внутри зеротора приводят к интенсивному перемешиванию жидкой фазы ТАВ. В роли ребра шарик менее эффективен, чем стержень, но значительно более эффективен в качестве перемешивателя. Частота изменения поля должна быть такой, чтобы шарик не успевал вмерзнуть в слой льда и в самом конце замораживания занял центральную зону объема, выполняя при этом и свойственную только ему формообразующую функцию, являясь аналогом вставки в ячейку льдоформы [13]. Еще одной, хотя и менее важной, функцией шарика является возможность придания зеротору нулевой плавучести, для чего массу и диаметр шарика соответствующим образом рассчитывают. Ту же функцию должен выполнять и стержень. При охлаждении напитков нулевая плавучесть интересна главным образом с эстетической точки зрения, так как потребитель может добиться произвольного размещения зероторов в объеме напитка, чего нельзя достигнуть при работе с обычным льдом.

Взаимная увязка тепловых и магнитных свойств зероторов открывает широкие возможности для саморегуляции интенсивности теплообмена. Суть предложенного технического решения [1] состоит в том, что один из элементов зеротора, например оболочка, выполнен из материала с переменными температурозависимыми магнитными свойствами, а именно температура точки Кюри этого материала лежит в интервале между температурой плавления ТАВ и температурой термостатирования объекта. Иными словами, выполняется соотношение

$$T_{\text{ст}} > T_{\text{к}} > T_{\text{пл}}$$

Такие зероторы, попадая в зазор магнитной системы, находятся в ней до тех пор, пока температура оболочки не превысит температуры точки Кюри. А это, в свою очередь, происходит только после полного расплавления ТАВ внутри зеротора. В результате оболочка теряет магнитные свойства и за счет создавшейся асимметрии тепловых и

магнитных полей зероторы выталкиваются из объема зоны теплообмена, а на их место втягиваются новые предварительно замороженные зероторы. Применение в составе зеротора материала с фиксированной точкой Кюри позволяет удерживать зероторы в зоне эффективного теплообмена до полного использования ресурса аккумулированного холода. Наиболее целесообразно применять это решение в контурах принудительной циркуляции теплоносителя с зероторной насадкой, где движущей силой служит магнитотепловой насос [1].

Задача расчета процессов теплообмена в зероторах с внутренним оребрением чрезвычайно сложна и пока не имеет примеров решения даже в простейшем виде, т.е. без учета воздействия магнитного поля, влияния вращательно-колебательных движений и конвективной составляющей в жидкой фазе ТАВ. Для приближенных расчетов таких зероторов и протекающих в них процессов можно пользоваться упрощенной методикой [2], применяя поправочные эмпирические коэффициенты [11], вводимые в формулу определения коэффициента формы.

Экспериментальные данные по замораживанию в антифризе зеротора диаметром 29 мм с установленным внутри него стальным стержнем диаметром 5 мм показаны на рис. 1, б. Полное время замораживания сокращается по сравнению с временем замораживания неоребранного зеротора в 1,6–1,9 раза. Как видно из рис. 1, б, в наибольшей степени эффект ускорения льдообразования проявляется на средней стадии процесса, когда он идет примерно в 2 раза быстрее.

Пример устройства для замораживания зероторов, не имеющего прямых аналогов в мире, показан на рис. 3 [10]. При малой производительности таких устройств, применяемых в небольших барах и кафе, в качестве источника холода целесообразно использовать термоэлектрический модуль. Представленное устройство, по традиции названное льдогенератором ЛНТ-0,6, состоит из морозильного блока и блока питания. Шарик замораживается в объеме охлажденного до темпера-

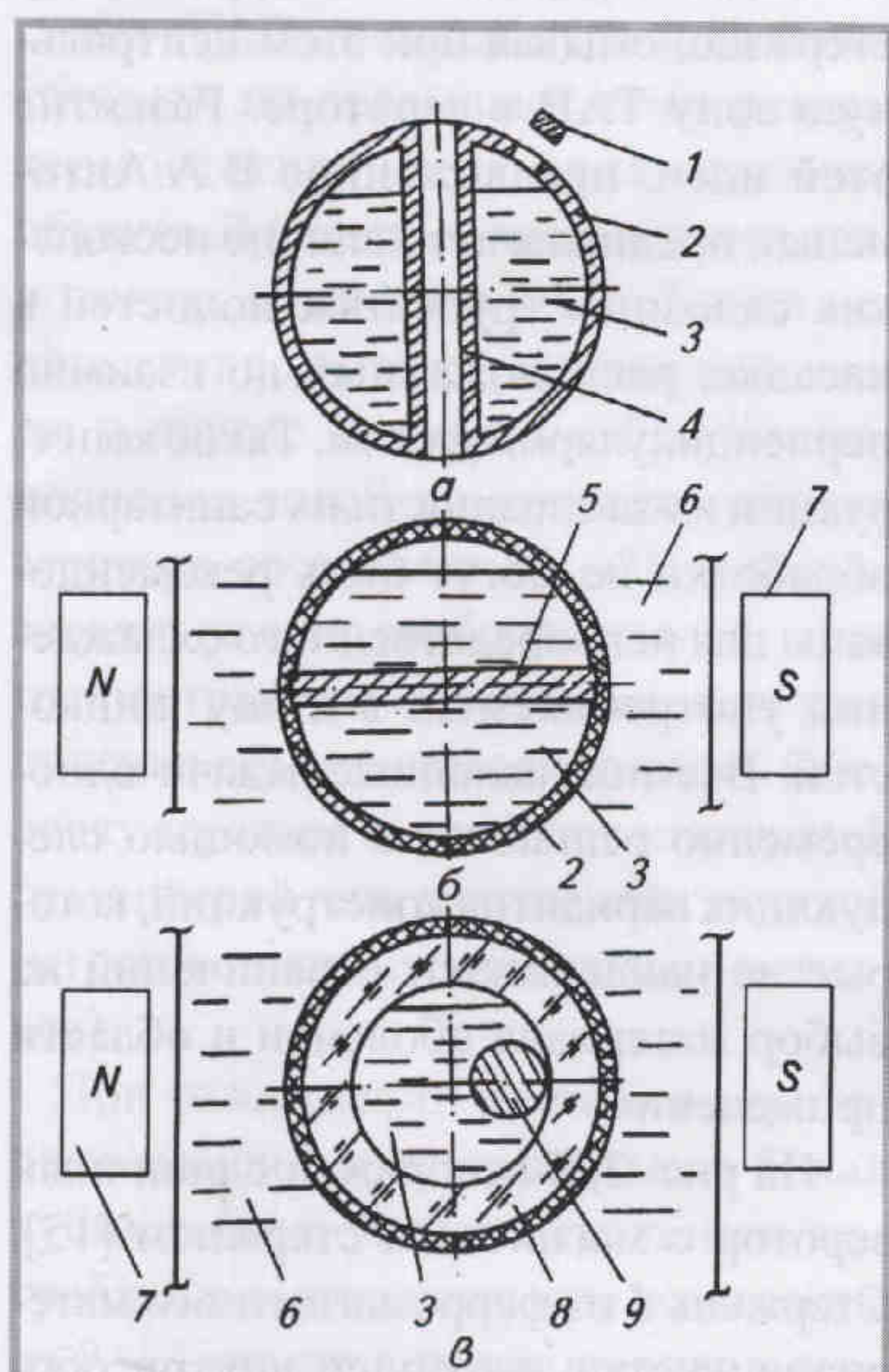


Рис. 2. Водозаполненные сферические зероторы с внутренним оребрением: а — по патенту США № 4205656; б — по патенту ГДР № 264128; в — по патенту Украины № 22422; 1 — заглушка; 2 — оболочка; 3 — жидкая фаза ТАВ; 4 — трубчатый стержень-ребро; 5 — магнитный стержень-ребро; 6 — антифриз (в льдогенераторе) или охлаждаемая среда (напиток); 7 — полюса электромагнита; 8 — твердая фаза ТАВ; 9 — незакрепленный металлический шарик

туры $-7...-10^{\circ}\text{C}$ антифриза, в качестве которого используют водный раствор спирта в пропорции 4–5 частей воды на 1 часть спирта.

Барабан 2 (рис. 3, б), установленный в камере 7, имеет расположенные со сдвигом по углу две кассеты, вмещающие по 16 шаровых зероторов. Зеротор 1 попадает в свободную ячейку кассеты по наклонному желобу из загрузочного бункера. Далее, пошагово вращаясь с барабаном 2, каждый зеротор совершает вместе с ним почти полный оборот. Время оборота, достаточное для полного замораживания зеро-

тора, составляет около 30 мин при суммарной холодопроизводительности агрегата 70 Вт. Номинальная частота выдачи зероторов составляет 1 шт./мин при норме их расхода 2 шт. на стакан напитка.

Среди преимуществ описанного устройства для замораживания зероторов отметим следующие, имеющие непосредственное отношение к эффективности аккумуляции холода.

➤ Конструкция льдогенератора позволяет применять почти все описанные выше средства интенсификации теплообмена при замораживании шаровых зероторов в жидкости.

➤ Льдогенератор не содержит специального хранилища зероторов, но сама камера с антифризом может выполнять функцию хранилища вместимостью около 0,3 кг в пересчете на чистый лед. Для перевода льдогенератора в режим хранения отключают одну секцию или переводят обе секции в режим пониженной силы тока питания; при этом режиме холодопроизводительность равна сумме теплопритоков в камеру. Схема автоматики обеспечивает автоматический перевод льдогенератора в режим хранения, когда температура антифриза становится ниже установленной.

➤ Конструкция барабана допускает большой разброс по диаметру зероторов (± 5 мм от номинального). Кроме того, при вращении барабана зероторы прокатываются по охлаждаемой стенке, что позволяет свести к минимуму термические сопротивления на участке стенка – антифриз – зеротор и благодаря вращению шарика дополнительно интенсифицировать теплообмен внутри зеротора.

➤ Отсутствие необходимости в оттайке существенно увеличивает энергетическую эффективность использования компрессионного холодильного агрегата при производительности льдогенератора (в пересчете на чистый лед) более 1 кг/ч. Замена термоэлектрического модуля компрессорным агрегатом сопровождается минимальными изменениями в

конструкции морозильного блока. В этом случае компрессорный агрегат выполняют выносным, соединяя его гибкими фреоновыми шлангами с морозильным блоком, а в морозильном блоке устанавливают капилляр (или TRV) и обвитый вокруг камеры трубчатый испаритель.

Описанная конструкция фактически служит примером двойного использования аккумуляции холода: вначале при замораживании зероторов аккумуляция происходит в объеме охлажденного антифриза, а позже при использовании зероторов – в объеме зеротора.

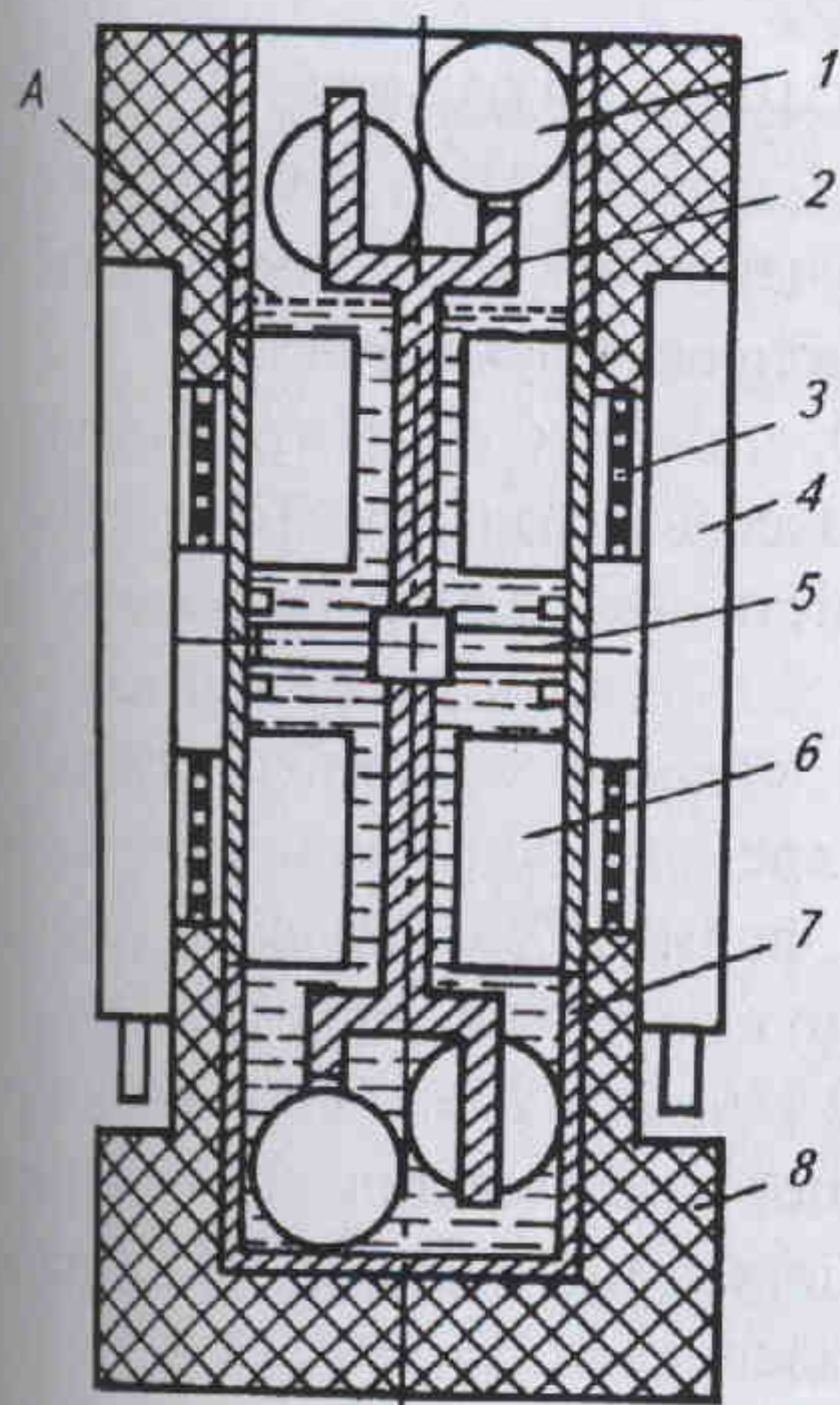
Пакеты. В переносных теплоизолированных контейнерах, например для перевозки бакпрепаратов, широко используют холодоаккумулирующие пакеты. Пакет представляет собой заполненную жидкостью емкость в виде параллелепипеда и имеет герметично закрывающуюся пробку. В качестве замерзающей жидкости используют воду, слабые водные растворы этиленгликоля или глицерина.

Пакеты выпускают несколько европейских фирм. Размеры пакетов не унифицированы: высота 160...170 мм, ширина 90...100 мм, толщина 20...40 мм. Масса 0,3...0,5 кг.

Разброс геометрических параметров пакетов и их профилированная поверхность не создают особых проблем при их замораживании в бытовых холодильниках и морозильниках, но существенно затрудняют задачу проектирования специальных морозильных устройств для



а



б

Рис. 3. Морозильный блок льдогенератора ЛНТ-0,6:
а – внешний вид; б – схема;
1 – зеротор; 2 – двоянный барабан;
3 – термоэлектрический модуль;
4 – проточный водяной теплообменник;
5 – ось; 6 – ребристый холодный теплообменник; 7 – стенка камеры;
8 – теплоизоляция; А – уровень антифриза



Рис. 4. Пакетный аккумулятор холода для переносных термоконтейнеров

ТермоКул
Группа Компаний

Послепродажное
обслуживание
компрессоров Bitzer

Диагностика

Ремонт

Техническое
консультирование

СЕРВИС

Bitzer

ЦЕНТР

Сертификат Соответствия РОСТЕСТ-МОСКВА №0000431

Москва, Лихоборская наб., 9, тел./факс: (095) 153-7098, 153-7118, e-mail: tk_liho@mail.ru, www.thermocool.ru

пакетов. Пакет следует устанавливать в камеру морозильника только вертикально, пробкой вверх, поскольку в верхней части находится воздушная зона, предусмотренная для расширения льда и компенсации роста давления при замерзании воды.

Размещение в 9-литровом термоконтейнере «Комфорт» производства Киевского АО «Полюс» двух таких пакетов позволяет сохранять в нем 20 порций мороженого в течение 6...8 ч.

Наиболее типичной конструкцией можно считать показанный на рис. 4 пакет «Iceblock» немецкой фирмы «Rubbermaid», сертифицированный российским стандартом АЯ19.

Характерно, что пакеты используют не только в качестве самостоятельного «источника холода», но и как вспомогательное средство в маломощных холодильниках, например в термоэлектрических [14], для снятия пиковых тепловых нагрузок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.с. СССР № 1255828. Способ работы термостатирующего устройства / С.О.Филин, Н.С.Кирпач, Б.Д.Бирук. – МКИ F25B19/04. БИ № 33, 1986.
2. Бобков В.А. Производство и применение льда. – М.: Пищевая промышленность, 1977.
3. Деревянко Г.В., Мохамед А.Амир Махди. Исследование динамики вымораживания льда в сферических элементах. – Деп. в ГКНТБ Украины, 1995.
4. Левенберг В.Д., Ткач М.Р., Гольстрем В.А. Аккумулирование тепла. – Киев: Техника, 1991.
5. Лыков А.В. Тепломассообмен. Справочник. – М.: Энергия, 1972.
6. Мохамед А.Амир Махди. Исследование аккумуляторов холода со сферическими зероторами: Автореф. дис... канд.техн.наук, 1995.
7. Патент США № 4205656, МКИ F24H7/00, 1981.
8. Патент Украины № 22422. Холодоаккумуляющий элемент льдогенератора / С.О.Філін - МКИ F25C1/10,

F28D19/00, 03.03.1998.

9. Сморгин Г.И. Теория и методы получения искусственного льда. – Новосибирск: Наука, 1988.

10. Филин С.О. Интенсификация процессов и создание эффективных устройств получения пищевого льда. Дис. ...д-ра техн.наук. – Одесса, 1996.

11. Филин С.О. Приближенный расчет времени получения льда в ячеистых формах // Холодильная техника и технология, 1994. Вып. 56.

12. Чижов Г.Б. Теплофизические процессы в холодильной технологии пищевых продуктов. – М.: Пищевая промышленность, 1979.

13. S.Filin. Badania eksperymentalne wpływu kształtu komórki na wydajność wytwornicy lodu. – Chłodnictwo, 2002, n.5.

14. S.Filin. Termoelektryczne urządzenie chłodnicze. – Masta. Gdańsk, 2002.

15. Wirtschaftspatent DDR № 264128 WrmSpeichereinsatz und Herstellungsverfahren / Kirpач N.S., Filin S.O. Сымарнага О.В. – F28D19/02, 25.01.89.