

Быстрое замораживание пищевых продуктов посредством гидрофлюидизации и перекачиваемых ледяных суспензий

К.А. ФИКИИН, А.Г. ФИКИИН

Технический университет, София

В последние 70 лет в развитых странах быстрое замораживание утвердилось как промышленный метод, обеспечивающий долгосрочное хранение скоропортящихся пищевых продуктов. Как хорошо известно, интенсивность замораживания значительно влияет на качество замороженных продуктов, в которых основная часть содержащейся воды должна быть быстро превращена в мелкозернистую кристаллическую структуру, чтобы предотвратить повреждение тканей и немедленно ингибировать нежелательные микробиологические и ферментативные процессы. Наиболее популярны сейчас воздушные и плиточные скороморозильные аппараты. Флюидизационные аппараты применяются в основном для индивидуального быстрого замораживания мелкоштучных продуктов. Использование криогенных быстрозамораживающих аппаратов все еще весьма ограничено из-за высокой стоимости сжиженных газов.

Флюидизационное замораживание. Воздушная флюидизация хорошо изучена и промышленно реализуется уже более 40 лет. Авторами настоящей статьи проведены некоторые из основополагающих исследований по созданию флюидизационных морозильных аппаратов, а также по анализу параметров процесса флюидизации [3, 4, 15, 18–20].

Сразу после появления систем LEWIS (Lewis Refrigeration Co., США) и FloFREEZE (FRIGOSCANDIA, Швеция) болгарская пи-

The paper is devoted to the so-called HydroFluidisation Method, recently suggested and patented by the authors to bring together the advantages and to overcome the drawbacks of both air fluidisation and immersion food freezing techniques. Two main innovative aspects can clearly be distinguished: (i) employment of unfreezable liquids as fluidising agents and (ii) use of pumpable ice slurries as fluidising media. This freezing principle provides an extremely high heat transfer rate, short freezing times, great throughput and better product quality at refrigerating temperatures maintained by a single-stage refrigeration machine. Thus, nearly two times lower investments and power costs are necessary as compared with the popular individual quick freezing methods. Moreover, such hydrofluidisation freezing systems are less hazardous from the environmental viewpoint, since the refrigerant is closed in a small isolated circuit only. Some collaborative research activities directed towards the method's development and implementation within the European Union are also outlined.

щевая промышленность была оснащена оригинальными флюидизационными аппаратами (АЗФ). Фрукты и овощи, замороженные в АЗФ, успешно экспортировались в Западную и Северную Европу.

Воздушная флюидизация имеет ряд преимуществ:

- высокая интенсивность замораживания благодаря малым размерам и низкому тепловому сопротивлению замораживаемых продуктов, большой общей площади теплопередающей поверхности и высоким коэффициентам поверхностной теплоотдачи;
- отличное качество замороженных продуктов, которые имеют привлекательный внешний вид и не слипаются между собой;
- непрерывность процесса замораживания и возможность полной его автоматизации.

Однако воздушная флюидизация имеет также некоторые недостатки:

- большие капитальные и эксплуатационные затраты в связи с применением двухступенчатых холодильных установок (для достижения температуры кипения -45°C), работающих в основном на озоноразрушающих хладагентах.
- меньшие коэффициенты поверх-

ностной теплоотдачи и интенсивность замораживания по сравнению с иммерсионными способами;

- необходимость создания воздушных потоков высоких скорости и давления ведет к значительным затратам электроэнергии на работу вентиляторов;
- выделение влаги с поверхности продуктов приводит к быстрому образованию инея на воздухоохладителях из-за большой разности температур продуктов и кипящего хладагента;
- чрезмерная чувствительность параметров процесса к форме, массе и размерам продукта требует тщательного контроля за каждым отдельным продуктом.

Иммерсионное замораживание

Иммерсионное замораживание в некипящих жидких хладоносителях — хорошо известный метод, который позволяет получить высокую интенсивность теплопередачи, мелкокристаллическую структуру льда в замороженных продуктах, высокую производительность процесса, а также снизить капитальные и эксплуатационные затраты [8, 9, 12, 14].

Применение иммерсии было ограничено вследствие неконтролируемо-

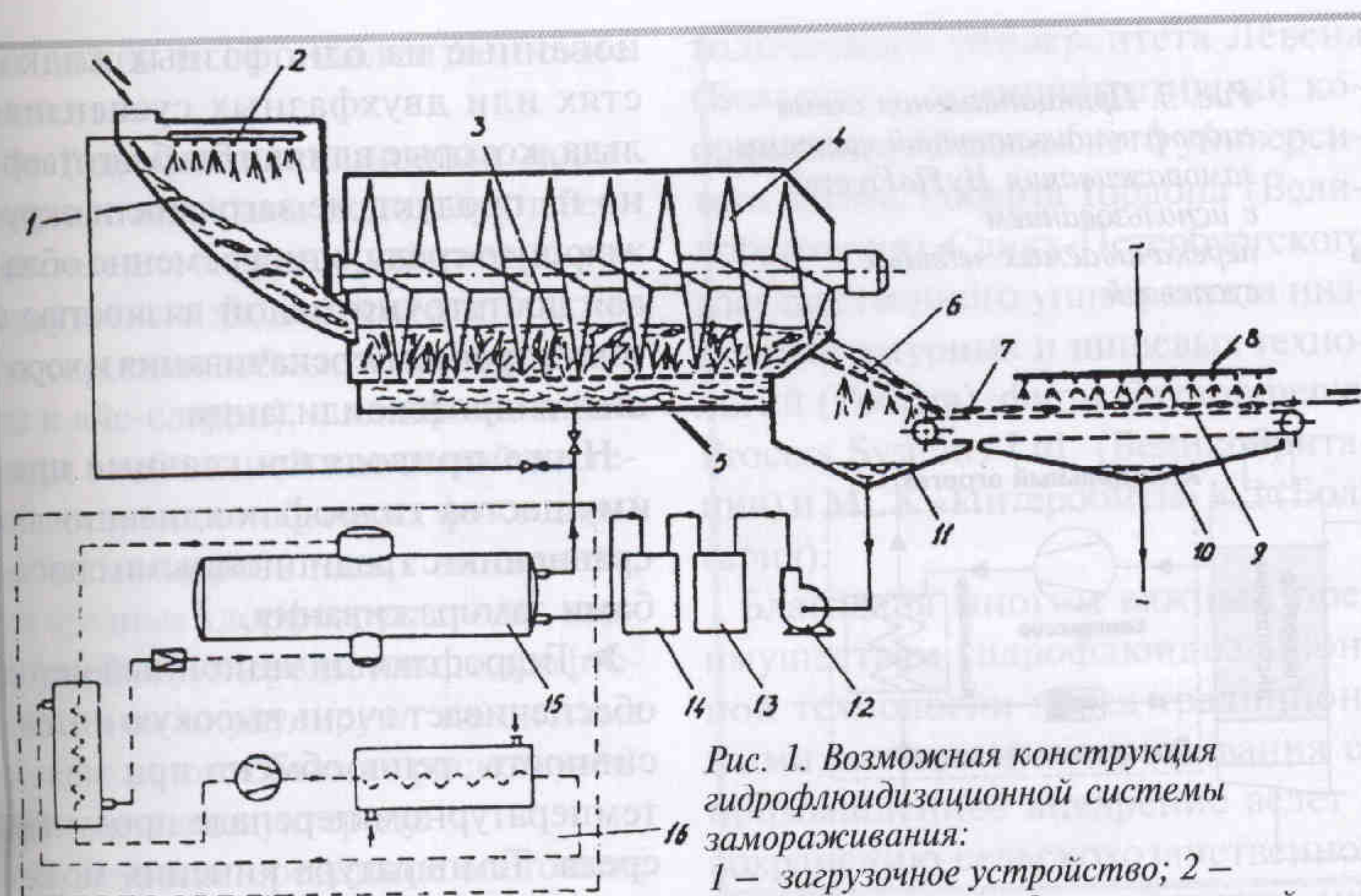


Рис. 1. Возможная конструкция гидрофлюидизационной системы замораживания:

1 — загрузочное устройство; 2 — система орошения; 3 — морозильный

отсек; 4 — перфорированный шнек; 5 — двойное дно; 6 — перфорированный желоб для удаления охлаждающей среды; 7, 9 — сетчатый ленточный конвейер; 8 — орошающее устройство для глазирования; 10, 11 — коллекторы; 12 — насос; 13, 14 — фильтры грубой и тонкой очистки; 15 — охладитель промежуточного хладагителя; 16 — холодильная установка

недостатков и суммирования преимуществ методов замораживания воздушной флюидизацией и иммерсией [5, 6, 16].

Сущность метода гидрофлюидизации состоит в использовании циркуляционной системы, которая перекачивает жидкий хладоноситель вверх через отверстия или сопла в замораживающий сосуд, создавая таким образом перемешивающие струи. Они формируют флюидизированный слой высокотурбулентной жидкости и движущихся продуктов, что обеспечивает очень высокие коэффициенты поверхностной теплоотдачи. Принцип действия гидрофлюидизационной морозильной системы показан на рис. 1.

Незамерзающие жидкие хладоносители как флюидизационные агенты

Хотя различные иммерсионные методы известны уже длительное время, принципы гидрофлюидизации не использовались до сих пор для охлаждения и замораживания пищевых продуктов. Эксперименты по гидрофлюидизационному замораживанию мелкой рыбы и некоторых овощей в водном растворе хлорида натрия показали намного более высокую интенсивность замораживания в сравнении с другими методами индивидуального быстрого замораживания [5, 6]. Максимальный коэффициент поверхностной теплоотдачи превысил $900 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, в то время как при погружении в движущуюся жидкость он был равен $378 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, $432 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ при орошении и $475 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ при погружении с барботированием воздуха [17]. Даже при слабом или умеренном перемешивании струями и сравнительно высокой температуре охлаждающей среды (около -16°C) ставрида, находившаяся при температуре 25°C , была заморожена до -10°C в центре за 6...7 мин, мелкая сельдь и зеленая фасоль — за 3...4 мин, а зеленый горошек — за 1...2 мин (рис. 2).

Перекачиваемые ледяные суспензии как флюидизационные агенты

Перекачиваемые ледяные суспензии, известные под различными тор-

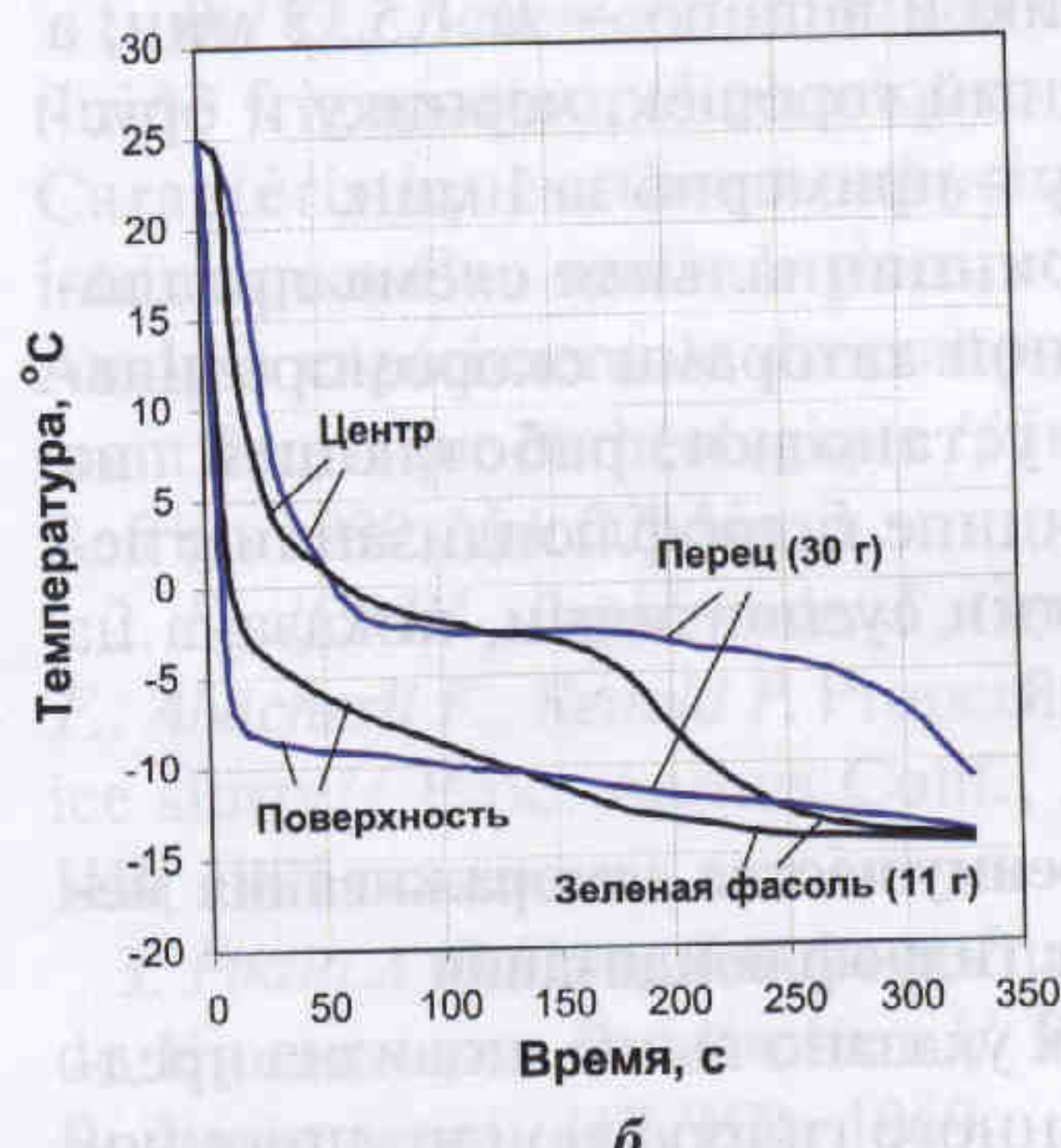
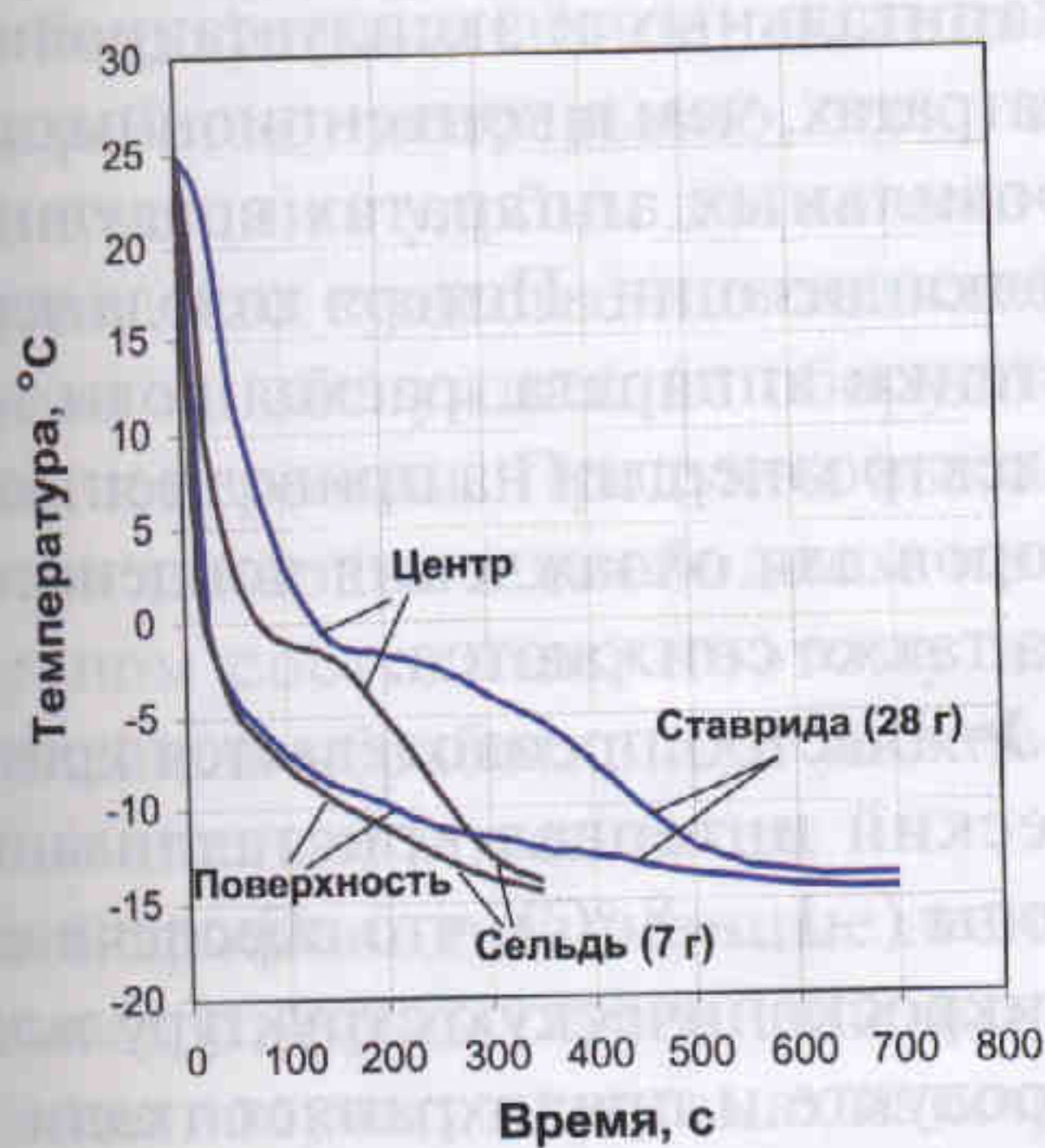


Рис. 2. Экспериментальные кривые гидрофлюидизационного замораживания некоторых видов рыбы (а) и овощей (б) с использованием раствора хлорида натрия при температуре охлаждающей среды $-15...-16^\circ\text{C}$ и средней скорости струй 2 м/с

го проникновения растворенных веществ внутрь продукта, а также эксплуатационными проблемами с иммерсионными жидкостями (высокая вязкость при низких температурах, трудность поддержания среды с постоянной концентрацией и без органических загрязнений). Последние достижения в тепломассопередаче, физической химии, гидродинамике и автоматике позволили в значительной степени решить эти проблемы и разработать передовые иммерсионные аппараты быстрого замораживания.

Цель настоящей статьи — ознакомить читателей с одним из новых методов индивидуального быстрого за-

мораживания, который увеличивает поверхностную теплопередачу, скорость замораживания, производительность, энергетическую и экономическую эффективность процесса посредством гидрофлюидизации с незамерзающими жидкостями или перекачиваемыми ледяными суспензиями.

Незамерзающие жидкости и перекачиваемые ледяные суспензии как флюидизационные агенты

Гидрофлюидизационный метод быстрого замораживания пищевых продуктов был недавно предложен и запатентован с целью преодоления

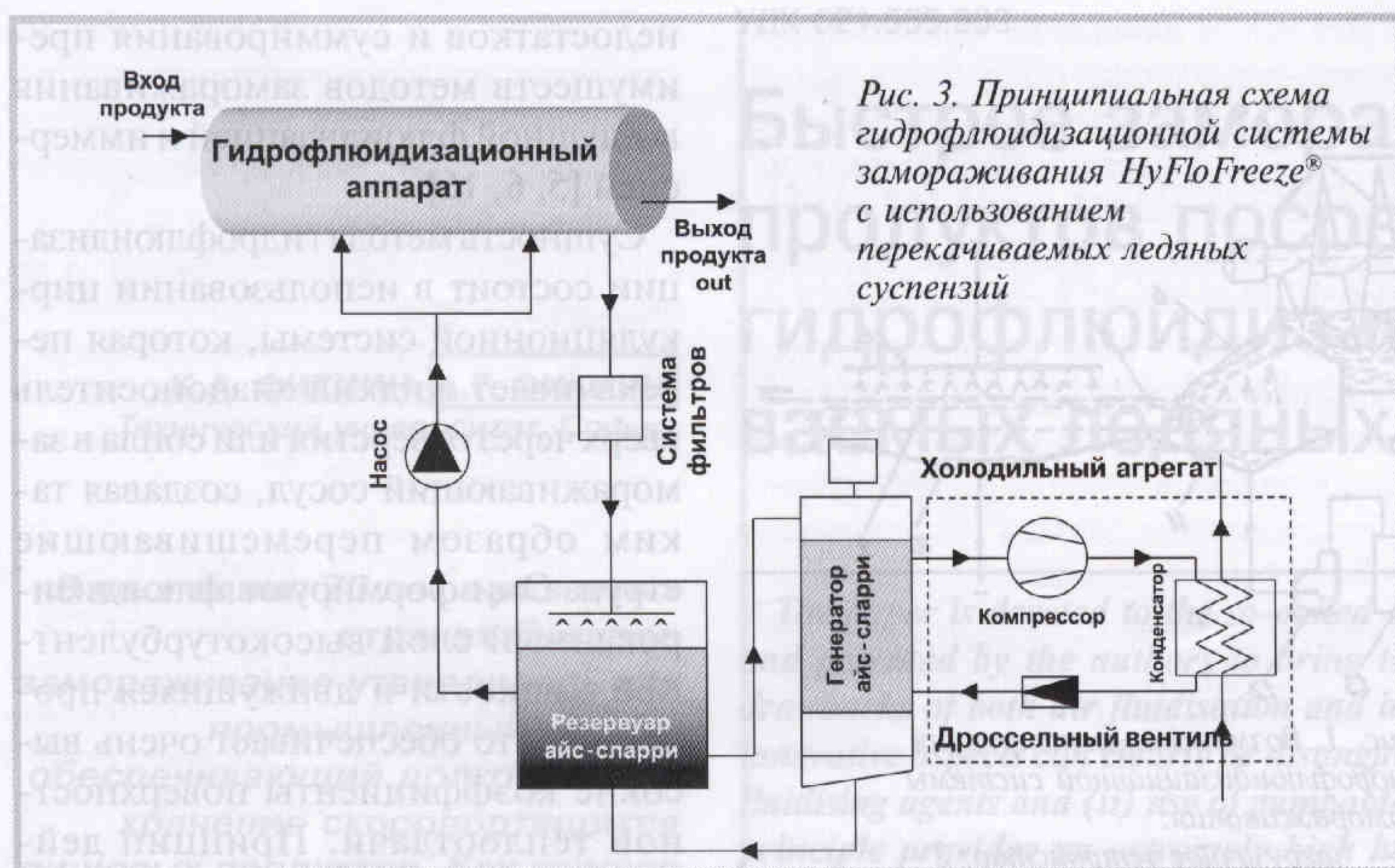


Рис. 3. Принципиальная схема гидрофлюидизационной системы замораживания HyFloFreeze® с использованием перекачиваемых ледяных суспензий

говыми наименованиями — FLO-ICE, BINARY ICE, Slurry-ICE, Liquid-ICE, Fluid ICE или Pumpable-ICE (далее айс-сларри), — были недавно предложены в качестве безопасных для окружающей среды промежуточных хладоносителей, циркулирующих в теплообменном оборудовании холодильных установок вместо традиционных вредных хлорфторуглеродных и гидрохлорфторуглеродных хладагентов [1, 2, 10, 11, 13].

Авторы выдвинули идею — усилить преимущества гидрофлюидизации, используя двухфазные ледяные суспензии как флюидизационные среды. Ледяные суспензии обладают высоким энергетическим потенциалом, так как микроскопические частицы льда абсорбируют тепло фазового превращения при плавлении на поверхности продукта. Таким образом, целью внедрения айс-сларри является обеспечение чрезвычайно высокого коэффициента поверхностной теплоотдачи [порядка $1000...2000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$], исключительно малого времени замораживания и равномерного распределения температуры по всему объему морозильного аппарата. Метод гидрофлюидизации с использованием айс-сларри позволяет достичь интенсивности теплопередачи, свойственной криогенным методам замораживания. Например, при температуре замораживающего айс-сларри -25°C и коэффициенте

теплоотдачи $1000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ малину, абрикосы и сливы с температурой 25°C можно заморозить до конечной среднеобъемной температуры -18°C за 8...9 мин; землянику садовую, черешню и вишню — за 1,5...3 мин; а зеленый горошек, чернику и бруснику — примерно за 1 мин.

Принципиальная схема предложенной авторами скороморозильной установки, работающей на принципе гидрофлюидизации с ледяными суспензиями, показана на рис. 3.

Преимущества замораживания методов гидрофлюидизации

Как указано выше, новизна предложенного гидрофлюидизационного метода состоит в применении незамерзающих жидкостей или перекачиваемых ледяных суспензий в качестве флюидизационных агентов. Хорошо известно, что история иммерсионного замораживания началась с использования рассолов при замораживании рыбы, мяса и овощей. Бинарные или трехкомпонентные водные растворы, содержащие растворимые углеводы (например, сахарозу, инвертный сахар, глюкозу, фруктозу и другие моно- и дисахариды) с добавлением этанола, солей, глицерина и т.д., изучались как возможные иммерсионные среды. Существуют практически неограниченные возможности комбинировать составляющие и создавать необходимые многокомпонентные гидрофлюидизационные среды, ос-

нованные на однофазных жидкостях или двухфазных суспензиях льда, которые влияли бы благотворно на продукт, не загрязняли окружающую среду, одновременно обладая достаточно малой вязкостью с точки зрения перекачивания и хорошей гидрофлюидизации.

Ниже приводятся главные преимущества гидрофлюидизации по сравнению с традиционными способами замораживания.

➤ Гидрофлюидизационный метод обеспечивает очень высокую интенсивность теплообмена при малом температурном перепаде продукт — среда. Температура кипения может поддерживаться на более высоком уровне ($-25...-30^\circ\text{C}$) посредством одноступенчатой холодильной машины со значительно более высоким холодильным коэффициентом и при почти в 2 раза меньших капитальных и эксплуатационных затратах, чем в конвенционных морозильных аппаратах воздушной флюидизации. Потеря холода через стенки аппарата, расход воды или электроэнергии на привод вентиляторов для охлаждения конденсатора также снижаются.

➤ Быстро преодолевается критический интервал кристаллизации воды ($-1...-8^\circ\text{C}$), что обеспечивает микроскопическую структуру льда в продукте и предохраняет ткани от ощутимых повреждений.

➤ Мгновенно замораживается поверхность продукта, превращаясь в твердую корочку, что подавляет осмотический перенос и придает продукту привлекательный товарный вид. Потери влаги практически нет, тогда как в воздушных тоннелях она обычно составляет 2–3 %.

➤ Используя некоторые специально подобранные среды (например, фрукты, замороженные в сиропоподобных сахарных растворах, превращаются в десертные продукты с улучшенными вкусом, запахом и структурой), можно легко создавать новые деликатесные продукты. Такие среды могут также включать подходящие антиоксиданты, ароматизаторы и микроэлементы, чтобы увеличить срок хранения продуктов и улучшить их пищевую

ценность и органолептические свойства.

► Гидрофлюидизационные морозильные аппараты используют безопасные для окружающей среды промежуточные хладоносители (такие, как сиропоподобные водные растворы и айс-сларри), а хладагент находится в небольшой замкнутой системе в отличие от обычных флюидизационных морозильных аппаратов, где вредные хлорфторуглероды, гидрохлорфторуглероды или гидрофторуглероды циркулируют по системе значительного объема с риском утечки в окружающую среду.

► Флюидизированное состояние достигается при низких скоростях и давлениях флюидных струй благодаря силам Архимеда и плавучести продуктов, что ведет к экономии энергии и минимальному механическому воздействию на продукт.

► Гидрофлюидизационные аппараты работают непрерывно, легки в эксплуатации и удобны для автоматизации, что существенно снижает затраты на обслуживание оборудования и персонал. Продукты выходят из аппарата в свободном поштучном состоянии, поэтому их дальнейшая обработка или упаковка значительно упрощается.

► Гидрофлюидизационные агенты на базе ледяных суспензий можно легко получать в системах накопления тепловой энергии, которые аккумулируют айс-сларри ночью при дешевых тарифах на электроэнергию.

Новая технология гидрофлюидизации, получившая награду Болгарского патентного агентства как выдающееся изобретение, привлекла внимание исследователей и представителей промышленности. Оптимизация конструкции гидрофлюидизационных морозильных систем требует междисциплинарного подхода исследователей [7].

Европейская комиссия решила финансировать проект Европейского союза INCO-COPERNICUS для разработки этого метода международным консорциумом, включающим исследовательские группы из Технического университета в Софии (Болгария) — научный координатор, Ка-

толического университета Лёвена (Бельгия) — административный координатор, Абердинского университета имени Роберта Гордона (Великобритания), Санкт-Петербургского государственного университета низкотемпературных и пищевых технологий (Россия), фирм Environmental Process Systems Ltd. (Великобритания) и МСК «Интеробмен» КД (Болгария).

Благодаря многим важным преимуществам гидрофлюидизационной технологии перед традиционными методами замораживания ее промышленное внедрение ведет к сохранению сельскохозяйственной продукции, экономии энергии, инвестиций и эксплуатационных расходов, а также к улучшению качества замороженных продуктов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bel O., Lallemand A.* Etude d'un fluide frigoporteur diphasique: 1 — Caractéristiques thermophysiques intrinsèques d'un coulis de glace; et 2 — Analyse expérimentale du comportement thermique et rhéologique // *Int. J. Refrig.*, 1999, Vol. 22, No. 3.
2. *Egolf P.W., Brühlemeier J., Özvegyi F., Abächerli F., Renold P.* Properties of ice slurry // *Proc. Aarhus Conf., IIF/IIR*, 1996.
3. *Fikiin A.G.* Congélation de fruits et de légumes par fluidisation // *Proc. Budapest Conf., IIF/IIR*, 1969.
4. *Fikiin A.G.* Bases théoriques du procédé de fluidisation lors de l'intensification de la congélation des fruits et des légumes // *Proc. 15th Int. Congress Refrig., Venice*, 1979, Vol. 4/
5. *Fikiin A.G.* New method and fluidized water system for intensive chilling and freezing of fish // *Food Control*, 1992, Vol. 3, No. 3.
6. *Fikiin A.G.* Quick freezing of vegetables by hydrofluidization. *Proc. Istanbul Conf., IIF/IIR*, 1994.
7. *Fikiin K.A., Tsvetko, O.B., Lapte, Yu.A., Fikiin A.G., Kolodyaznaya V.S.* Thermophysical and engineering issues of the immersion freezing of fruits in ice slurries based on sugar-ethanol aqueous solutions // *Proc. 3rd IIR Workshop on Ice Slurries*, Lucerne, Switzerland, 2001.
8. *Fleshland O., Magnussen O. M.*

Chilling of farmed fish // *Proc. Aberdeen Conf., IIF/IIR*, 1990.

9. *Lucas T., Raoult-Wack A.L.* Immersion chilling and freezing in aqueous refrigerating media: review and future trends // *Int. J. Refrig.*, 1998, Vol. 21, No. 6.

10. *Paul J.* Binary ice as a secondary refrigerant // *Proc. 19th Int. Congress Refrig., The Hague*, 1995, Vol. 4b.

11. *Pearson S.F., Brown J.* Use of pumpable ice to minimise salt uptake during immersion freezing. // *Proc. Oslo Conf., IIF/IIR*, 1998.

12. *Tressler D.K.* Food freezing systems. In: *Tressler, D.K., Van Arsdel, W.B., Copley, M.J.* The Freezing Preservation of Foods, Vol. 1, The AVI Publishing Co., Westport, Connecticut, 1968.

13. *Ure Z.* Slurry-ice based cooling systems // *Proc. Sofia Conf., IIF/IIR*, 1998.

14. *Woolrich W. R.* Handbook of Refrigerating Engineering, Vol. 2: Applications. The Avi Publishing Co., Westport, Connecticut, 1966.

15. *Фикийн А.Г.* Физические условия флюидизационного замораживания плодов и овощей // *Холодильная техника*. 1980. № 7.

16. *Фикийн А.Г.* Метод и система за имерсионно охлаждане и замразяване на хранителни продукти чрез хидрофлюидизация. Авторско свидетелство № 40164, Българско патентно ведомство — ИНРА, 1985.

17. *Фикийн А.Г., Фам В.Х.* Система за изследване на режимите на топлообмен при хидроохлаждане на хранителни продукти. Авторско свидетелство № 39749, Българско патентно ведомство — ИНРА, 1985.

18. *Фикийн А.Г., Дичев С.П., Карагеров Д.И.* Флюидизационен замразителен апарат за плодове и зеленчуци с различна големина. Авторско свидетелство № 10967, Българско патентно ведомство — ИНРА, 1965.

19. *Фикийн А.Г., Дичев С.П., Фикийна И.К.* Основные параметры, характеризующие флюидизации слоев плодов и овощей // *Холодильная техника*. 1966. № 11.

20. *Фикийн А.Г., Дичев С.П., Карагеров Д.И.* Флюидизационный морозильный аппарат АЗФ // *Холодильная техника*. 1970. № 7.