



ISSN 0861-9727

**Механика
на
Машините**

44

ПРЕИМУЩЕСТВА, ПРОИЗВОДСТВО И ПРИМЕНЕНИЕ ЛЕДЯНЫХ СУСПЕНЗИЙ КАК ВТОРИЧНЫХ ХЛАДОНОСИТЕЛЕЙ

Владимир СОКОЛОВ^a, Костадин ФИКИИН^b, Никола КАЛОЯНОВ^b

v.sokolov@rambler.ru, agf@tu-sofia.acad.bg, ngk@tu-sofia.acad.bg

^a Кафедра общей и холодильной технологии пищевых продуктов, Санкт-Петербургский государственный университет низкотемпературных и пищевых технологий, ул. Ломоносова 9, 191002 Санкт-Петербург, Россия

^b Кафедра тепловой и холодильной техники, Технический университет – София бул. Климент Охридски № 8, 1756 София, Болгария

В настоящей работе сделан краткий обзор современного состояния промышленных технологий, использующих перекачиваемые ледяные суспензии, известные под различными техническими и торговыми наименованиями, такими как ice slurry (айс сларри), FLO-ICE, бинарный лед, жидкий лед, флюидный лед, Pumpable ICE и т.д. Рассмотрены основные методы и технические средства получения мелкокристаллических ледяных суспензий. Уделено внимание системам накопления, хранения и распределения ледяной суспензии потребителям холода. Отмечены основные сферы применения суспензий льда в разных отраслях промышленности, а также перспективы развития передовых айс-сларри технологий, открываемые научно-техническим прогрессом.

Ключевые слова: мелкокристаллическая ледяная суспензия, ice slurry, генераторы льда.

ВВЕДЕНИЕ

Мелкокристаллические ледяные суспензии являются смесью кристаллов льда, чаще всего диаметром 0.01-0.2 мм, воды и антифризов (одноили многокомпонентных растворенных веществ, понижающих температуру замерзания раствора – спирты, соли и т.п.) [Kauffeld *et al.* 1999]. Такие ледяные суспензии известны под различными наименованиями как ice slurry (айс сларри), жидкий лед, флюидный лед, бинарный лед, FLO-ICE, Binary-ICE, Fluid-ICE, Liquid-ICE, Pumpable-ICE и т.д. Поскольку эти двухфазные системы ведут себя подобно жидкостям, их можно перекачивать по трубам (Рис. 1), но в отличие от однофазных хладоносителей эффективная теплоемкость айс-сларри гораздо выше вследствие использования теплоты фазового перехода кристаллов льда. Поэтому можно уменьшить почти в 2 раза размеры теплообменников и диаметры трубопроводов без потери холодопроизводительности, что значительно снижает соответствующие капитальные расходы. Благодаря огромному энергетическому потен-

циалу, ледяные суспензии обеспечивают чрезвычайно интенсивную поверхностную теплопередачу, сравнимую с кипением холодильных агентов, а также большую скорость иммерсионного охлаждения или замораживания пищевых продуктов [Fikiin *et al.* 1998, 2001].



Рис. 1. Аккумуляция холода с помощью айс-сларри

МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ МИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ЛЕДЯНЫХ СУСПЕНЗИЙ И ГЕНЕРАТОРЫ АЙС СЛАРРИ

Промышленное производство айс-сларри является главной задачей этой технологии, где основную роль играют генераторы мелкокристаллического льда, основные типы которых рассмотрены ниже:

Генераторы с двигающимися скребками. На Рис. 2 показан генератор с вращающимися приспособлениями для снятия намораживаемого льда с цилиндрической поверхности. Он состоит из двух concentрических цилиндров, между которыми кипит хладагент и скребок, снимающих образованный тонкий ледяной слой. Одним из недостатков такого типа льдогенераторов является дополнительный расход энергии на привод движущихся частей. Другой недостаток – сравнительно высокая цена. Однако, весьма существенное преимущество этих генераторов состоит в высокой надежности независимо от концентрации антифриза в айс сларри [Malter 1996].

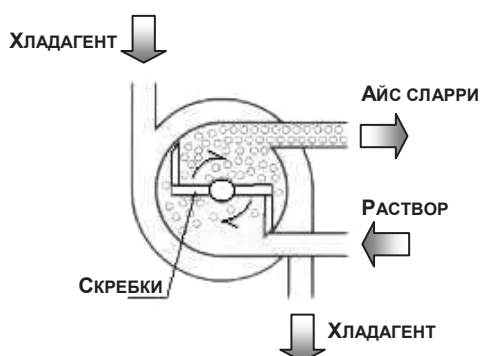


Рис. 2. Генератор скребкового типа.

Генераторы, использующие переохлаждение раствора. Конструкция другого перспективного агрегата изображена на Рис. 3. Этот принцип основан на кипении хладагента снаружи трубок кожухотрубного теплообменника. Раствор, медленно двигающийся внутри труб, переохлаждается на несколько градусов ниже криоскопической температуры. На выходе из аппарата поток турбулизируется специальным устройством с образованием кристаллов. Содержание льда повышается на 1.25 % при снижении на 1 °С температуры выходящей переохлажденной жидкости [Kauffeld et al. 1999].

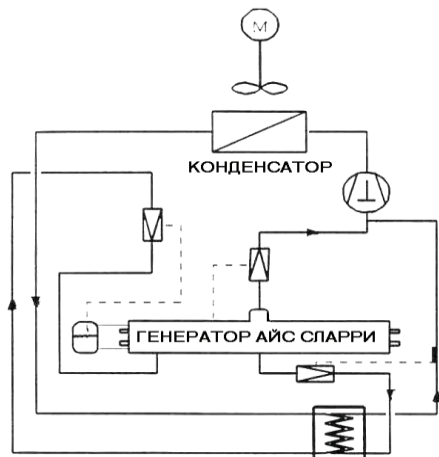


Рис. 3. Генератор айс-сларри без механически движущихся частей.

Генераторы, применяющие непосредственный контакт хладагента с раствором. Такой генератор показан на Рис. 4. Ледяная суспензия образуется посредством пропускания кипящего хладагента сквозь раствор, который охлаждается и образует мелкие кристаллы. Преимуществом этого типа генератора является отличное качество образующихся кристаллов, но в то же время система пожароопасна [Kauffeld et al. 1999].

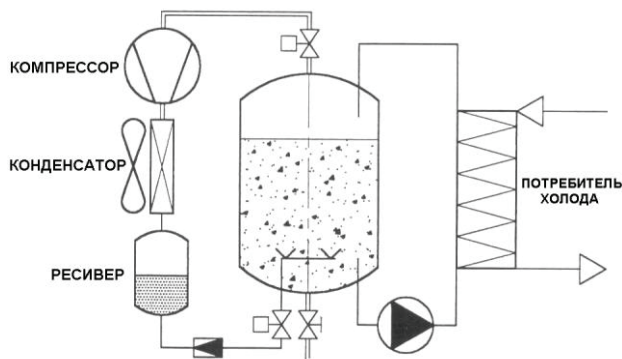


Рис. 4. Генератор с прямым кипением хладагента в растворе [Chuard et al. 1999].

Вакуумные генераторы. Этот принцип получения айс-сларри заключается в использовании воды в качестве хладагента. Схематическое изображение такого цикла показано на Рис. 5. Вода из солевого раствора, находящаяся вблизи своей тройной точки, испаряется специально создаваемым вакуумом и вследствие охлаждения частично кристаллизуется, т.е. образуется так называемый вакуумный лед [Kauffeld et al. 1999].

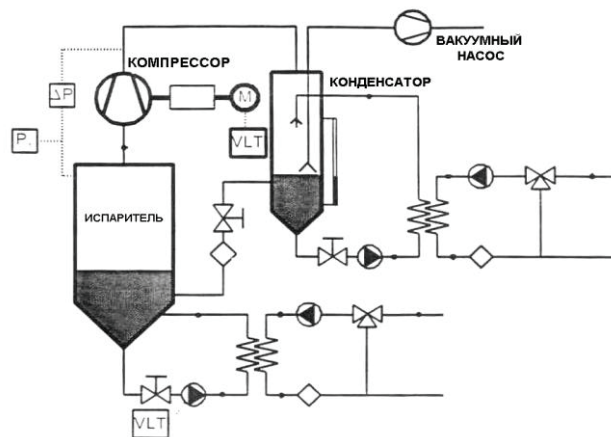


Рис. 5. Айс-сларри генератор вакуумного типа.

Флюидизационные генераторы. Они используют вертикальный кожухотрубный теплообменник (Рис.6). В кожухе кипит хладагент, а раствор подается в распыленном виде снизу внутри трубок, где соприкасаясь с холодными стенками начинает замерзать. Вместе с тем, в трубах находятся стальные или ударопрочные стеклянные шарики, диаметром 4 мм, которые при скоростях раствора ≥ 0.2 м/с переходят во

псевдоожженное состояние. Флюидизированный слой предотвращает намораживание толстого ледяного слоя и обеспечивает проходимость труб. Лед постоянно скалывается шариками со стенок и выходит через верхнюю часть аппарата. Высота теплообменника может достигать 10 м, при диаметре трубок 70-100 мм [Meewisse *et al.* 2001].

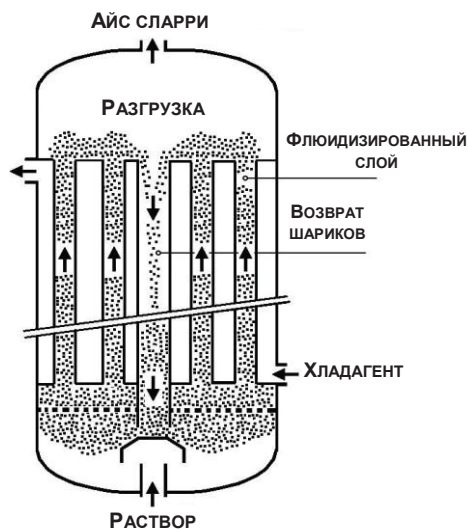


Рис. 6. Флюидизационный генератор айс сларри.

АККУМУЛЯЦИЯ, ХРАНЕНИЕ И СНАБЖЕНИЕ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЛЕДЯНОЙ СУСПЕНЗИЕЙ

Основные типы систем накопления ледяной суспензии можно систематизировать следующим образом:

Децентрализованная система аккумуляции. Суспензия льда, полученная в одном центральном генераторе, распределяется по различным накопительным сосудам (аккумуляторам холода), находящимся вблизи потребителей (Рис. 7).

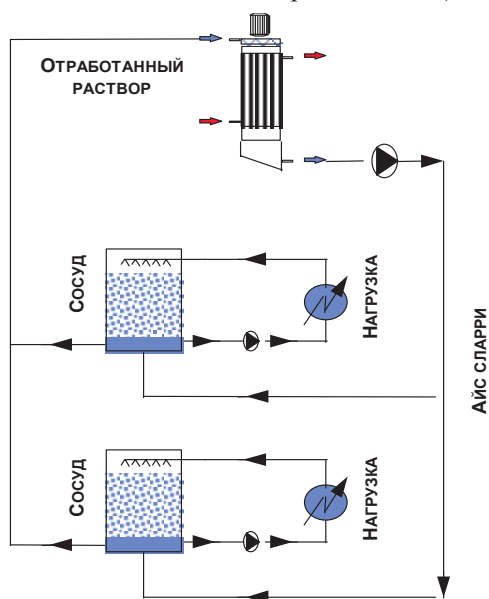


Рис 7. Децентрализованная система аккумуляции.

Локальные емкости хранения льда действуют подобно буферным сосудам между системой генерации и потребителями холода. Такое распределение по емкостям покрывает прежде всего среднюю тепловую нагрузку у каждого потребителя, нежели пиковые нагрузки.

Централизованная система. Высокопроизводительные охлаждающие системы могут требовать установки центрального аккумулятора, как показано на Рис. 8. Ледяная суспензия может храниться в аккумуляторе и использоваться только для охлаждения воды, циркулирующей в системе распределения. Однако, лучше использовать прямо айс сларри для снабжения потребителей холода в часы пиковой нагрузки.

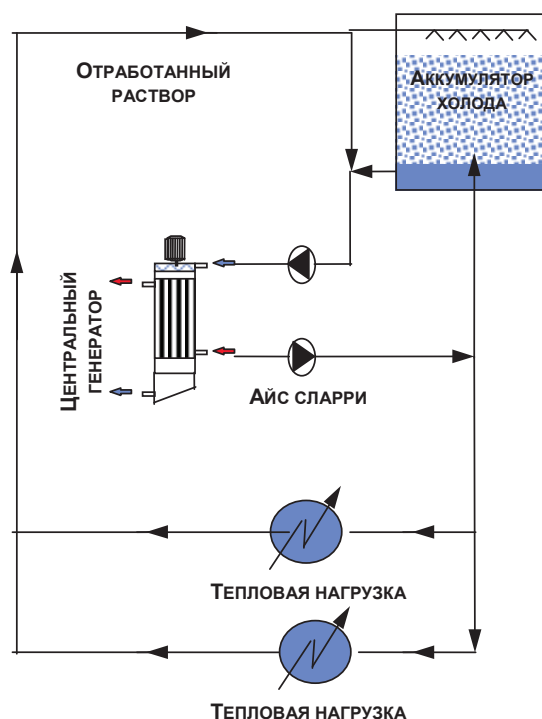


Рис. 8. Централизованная система аккумуляции холода при помощи айс сларри.

Аккумулятор льда со слоем свободной жидкости. Он представляет собой большой сосуд, находящийся при атмосферном давлении и заполненный приблизительно на 80% жидкостью. Когда айс сларри поступает в емкость, кристаллы льда всплывают на поверхность и лед постепенно заполняет пространство от верха до дна (Рис. 9). Существуют верхняя и нижняя подачи суспензии в емкость, чьи преимущества и недостатки рассмотрены Ure [1998].

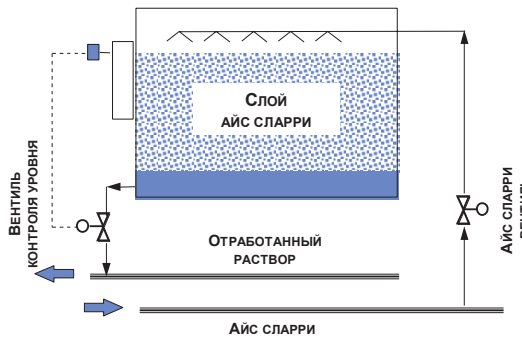


Рис 9. Аккумулятор холода со слоем свободной жидкости.

Несколько типичных систем холодоснабжения при помощи айс-сларри описаны далее:

Система непосредственного распределения. Айс-сларри через трубопроводную сеть подается непосредственно потребителям холода (Рис. 10). Эксперименты с различными типами оборудования показали, что риск образования ледяных пробок в системе довольно мал, а эффективность теплопередачи велика [Ure 1998].

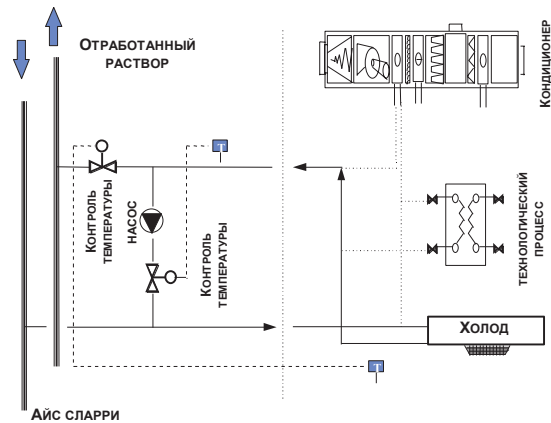


Рис. 10. Система непосредственного распределения.

Система опосредованного распределения. В этом случае используется локальная емкость, в которой кристаллы льда отделяются от жидкости и эта "ледяная вода" подводится к потребителям (Рис. 11). Опосредованное распределение является достаточно простым способом, чтобы применять ледяную суспензию вместе с наличным оборудованием, не прибегая к существенным изменениям.

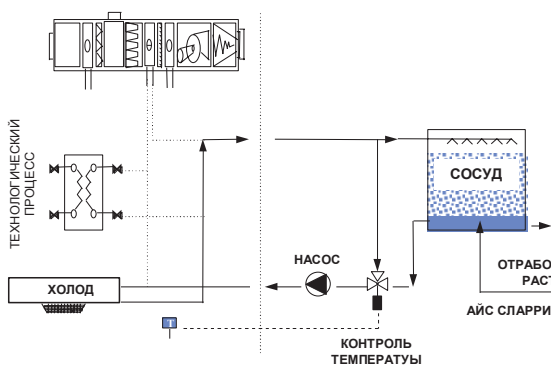


Рис 11. Система опосредованного распределения.

Система с применением блока смешения. Эта конструкция тоже облегчает использование ледяной суспензии с уже наличным оборудованием, не требуя установки локальных емкостей для накопления айс-сларри. Нагретый отработанный раствор смешивается в специальном сосуде с входящей ледяной суспензией до полного расплавления ледяных кристаллов (Рис. 12). Потребителям подается однофазная жидкость с регулируемым расходом и температурой.

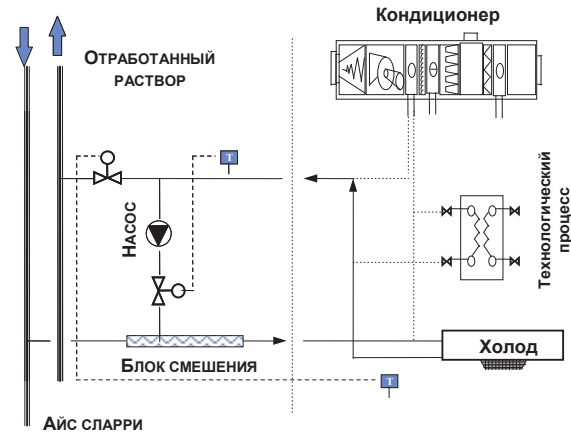


Рис. 12. Система с блоком смешения.

ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЛЕДЯНЫХ СУСПЕНЗИЙ КАК ВТОРИЧНЫХ ХЛАДОНОСИТЕЛЕЙ

Мелкокристаллические ледяные суспензии представляют собой отличный экологически чистый вторичный хладоноситель – надежная альтернатива хлоро-фторо-углеродным, гидро-хлоро-фторо-углеродным и гидро-фторо-углеродным хладагентам, разрушающим озоновый слой и/или вызывающим парниковый эффект. Можно перечислить следующие типичные области применения айс сларри:

Кондиционирование воздуха. Применяя айс сларри, можно снизить мощности холодильных установок на 20-35% при компактности оборудования и использовании низких электрических тарифов ночью. Работа существующего оборудования может стать эффективной и гибкой (Рис. 13).

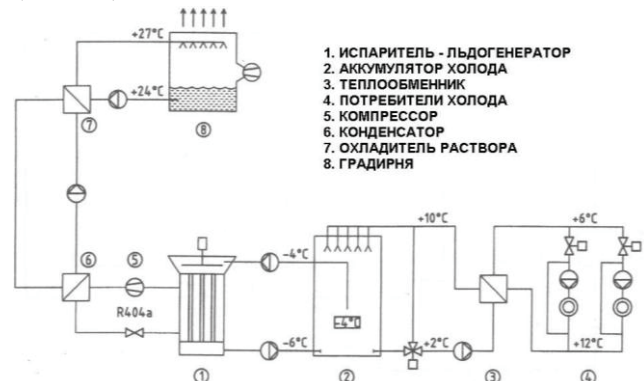


Рис. 13. Кондиционирование воздуха в большом офисном здании [Schaedle 2001]

Торговое холодильное оборудование в супер- и гипермаркетах. В камерах, шкафах и витринах с низкими положительными температурами (Рис. 14) обычно применяется ледяная суспензия при температуре около $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$, что позволяет избежать остановки этого оборудования на удаление инея. Торговое оборудование для замороженных продуктов использует айс сларри при $-22/-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ и частоту остановок на оттайку тоже можно значительно снизить [Malter 1996].

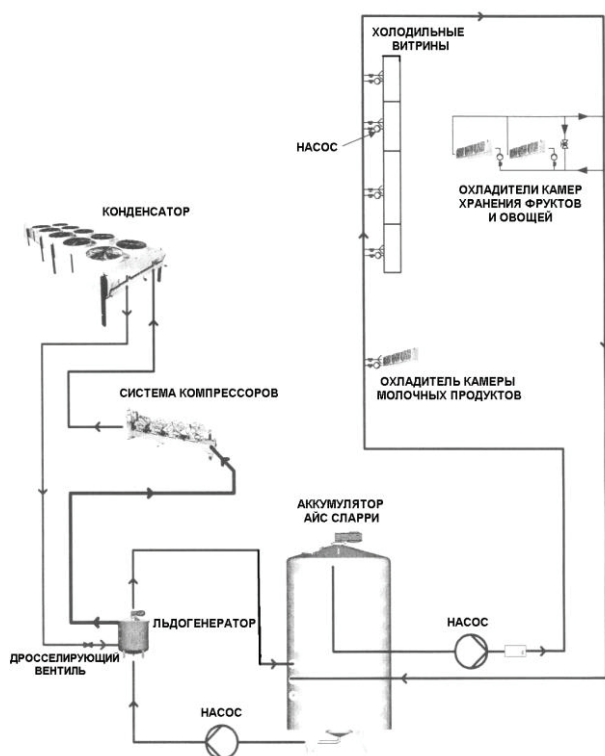


Рис. 14. Система охлаждения супер- и гипермаркетов при помощи перекачиваемой мелкокристаллической ледяной суспензии [Ben Lakhdar *et al.* 2001].

Иммерсионное охлаждение и замораживание пищевых продуктов. Все виды плодов и овощей нужно незамедлительно охладить сразу после сбора урожая, чтобы сохранить их качество и натуральные характеристики, и ледяные суспензии являются прекрасной охлаждающей средой для погружения. Холодильная обработка морепродуктов (рыбы, креветок и др.) бинарным льдом очень эффективна в сравнении с блочным, колотым и чешуйчатым льдом, так как отсутствуют воздушные пространства на поверхности продукта, который не травмируется благодаря мягкой консистенции айс сларри. Кроме того, морская вода естественный соледержатель для производства айс сларри на борту рыболовных кораблей.

Быстрое охлаждение жидкостей. При необходимости охладить быстро значительные объемы молока, соков, масел и т.п. применение ледяных суспензий тоже оказывается чрезвычайно выгодным вследствие их превосходных термодинамических свойств и энергетического потенциала, которые обеспечивают большую производительность установок.

Криоконцентрация растворов и опреснение воды. Пропуская раствор через льдогенератор, растворенные вещества можно отделить от воды. Вследствие удаления образовавшихся кристаллов льда раствор концентрируется и, с другой стороны, получается чистая вода. Этот метод можно использовать для криоконцентрации пищевых растворов и напитков (например, молоко, соки и пиво), опреснения морской воды, разделения воды и масла и т.д. [Malter 1996].

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АЙС-СЛАРРИ ТЕХНОЛОГИЙ В РАЗНЫХ ОБЛАСТЯХ СОВРЕМЕННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Обладая превосходными теплофизическими и энергетическими характеристиками, перекачиваемые ледяные суспензии в высшей степени удачная альтернатива однофазным вторичным хладагентам и кипящим хладагентам. При аккумуляции холода бинарному льду по-видимому нет ныне равных по эксплуатационным качествам и эффективности. Айс сларри уже доказали свои значительные преимущества при обеспечении холодом крупных промышленных и офисных зданий, охлаждении ядерных реакторов на суше а в атомных подводных лодках. В США ведутся активные исследовательские работы по холодоснабжению целых жилых кварталов в крупных городах. Несомненно, будущее откроет новые заманчивые перспективы для неограниченного применения айс-сларри технологий во всех сферах мирового хозяйства.

БЛАГОДАРНОСТИ

Настоящий обзор подготовлен при финансовой поддержке научно-исследовательского проекта Европейского союза IC15 СТ98 0912 (Административный координатор: Б. Николай, Католический университет Левен, Бельгия; Научный координатор: К. Фикиин, Технический университет – София, Болгария).

ЛИТЕРАТУРА

- Ben Lakhdar M. A., Blain G., Compigt A., Liopé D. and Smah M., 2001.** Direct expansion and indirect refrigeration with ice-slurry: Comparison in supermarket. *Proceedings of the Third IIR Workshop on Ice Slurries*, Lucerne, Switzerland, pp.166-167.
- Chuard M. and Fortun J., 1999.** COLDECO – A new technology system for production and storage of ice. *Proceedings of the First IIR Workshop on Ice Slurries*, Yverdon-les-Bains, Switzerland, pp.139-145.
- Fikiin A.G. and Fikiin K.A., 1998.** Individual quick freezing of foods by hydrofluidisation and pumpable ice slurries. In *Advances in the Refrigeration Systems, Food Technologies and Cold Chain* (Ed.: Kostadin Fikiin) – *Proceedings of the IIR Conference*, Sofia, Bulgaria, 1998-6, p.319-326. (Published also in AIRAH Journal, 2001, Vol.55, No.11, pp.15-18.)
- Fikiin K., Tsvetkov O., Laptev Yu., Fikiin A. and Kolodyaznaya V., 2001.** Thermophysical and engineering issues of the immersion freezing of fruits in ice slurries based on sugar-ethanol aqueous solutions. *Proceedings of the Third IIR Workshop on Ice Slurries*, Lucerne, Switzerland, pp.147-154.
- Kauffeld M., Christensen K.G., Lund S. and Hansen T.H., 1999.** Experience with ice slurry. *Proceedings of the First IIR Workshop on Ice Slurries*, Yverdon-les-Bains, Switzerland, pp.42-54.
- Malter L., 1996.** Binary ice generation and applications of pumpable ice slurries for indirect cooling. In *Application for Natural Refrigerants – Proceedings of the IIR Conference*, Aarhus, Denmark, 1996-3, pp.527-534.
- Meewisse J.W. and Infante Ferreira C.A., 2001.** Experiments on fluidised bed ice slurry production. *Proceedings of the Third IIR Workshop on Ice Slurries*, Lucerne, Switzerland, pp.105-112.
- Schaedle K.H., 2001.** Binary ice plant for the UBS-Basel. *Proceedings of the Third IIR Workshop on Ice Slurries*, Lucerne, Switzerland, p.168.
- Ure Z., 1998.** Slurry Ice Based Cooling Systems. In *Advances in the Refrigeration Systems, Food Technologies and Cold Chain* (Ed.: Kostadin Fikiin) – *Proceedings of the IIR Conference*, Sofia, Bulgaria, pp.172-179. (Published also in AIRAH Journal, 2001, Vol.55, No.9, pp.24-27.)

ADVANTAGES, PRODUCTION AND APPLICATIONS OF PUMPABLE ICE SLURRIES AS SECONDARY REFRIGERANTS

Vladimir SOKOLOV, Kostadin FIKIIN and Nikola KALOYANOV

The present contribution gives a short overview of up-to-date industrial technologies employing pumpable ice slurries (known under different trade names, such as FLO-ICE, BINARY ICE, Liquid ICE, Fluid ICE, Slurry-ICE or Pumpable-ICE). Principal methods and existing engineering systems for generation of fine-crystalline ice-slurries are considered. Special attention is devoted to the ice slurry accumulation, storage and refrigeration supply to remote users. Main enterprise applications of ice slurries are also outlined, along with current challenges, trends and prospects for development of advanced ice-slurry-based technologies.