



**Всероссийский научно-исследовательский институт холодильной промышленности - филиал  
ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН**

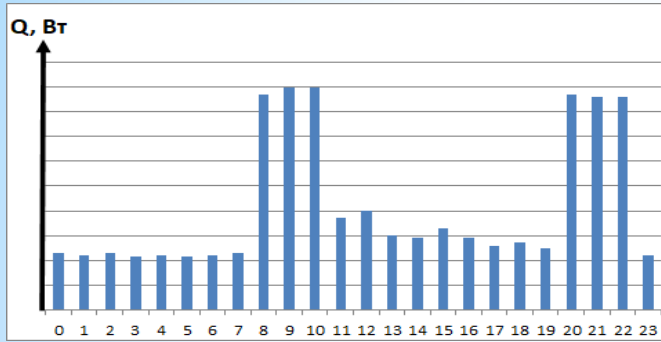
**\* Исследование процессов теплообмена при пленочном обтекании ледовых поверхностей с фазовым переходом для создания нового поколения льдоаккумуляторов**

Авторы: Гончарова Г.Ю., Пытченко В.П.,  
Борзов С.С., Борщев Г.В.

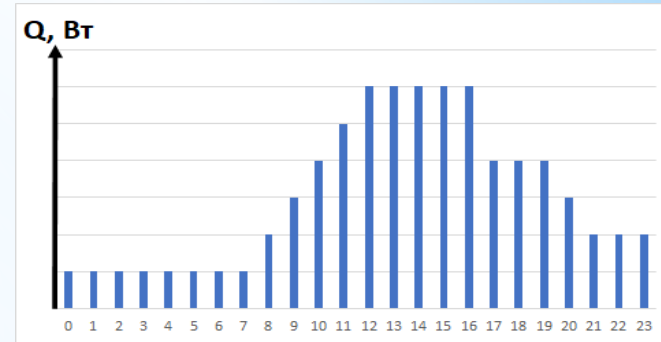
Докладчик: Борщев Г.В.

# 1.Актуальность

Охлаждение объектов пищевой промышленности с высокой степенью неравномерности распределения тепловой нагрузки



Характерное суточное распределение тепловой нагрузки на низовом предприятии молочной промышленности



Характерное суточное распределение тепловой нагрузки на промышленном молочном предприятии



**ХОЛОДИЛЬНОЕ  
ОБОРУДОВАНИЕ**

Охлаждение без  
аккумуляции

Преимущества  
льдоаккумуляции

1. Высокая стоимость оборудования
2. Высокий тариф на электроэнергию при работе в дневное время
3. Суммарная холодопроизводительность холодильного парка должна быть равна  $Q_{\max}$  – максимальной тепловой нагрузке



1. Снижение капитальных затрат на холодильное оборудование
2. Снижение затрат на электроэнергию при использовании ночного тарифа
3. Суммарная холодопроизводительность холодильного парка значительно ниже  $Q_{\max}$  – максимальной тепловой нагрузки

## 2. Цель исследования

*Цель - исследование процессов тепломассообмена при пленочном обтекании ледовых структур с фазовым переходом для создания теплообменных аппаратов нового поколения с высокой интенсивностью теплоотвода, сопрягаемой с графиком действующей тепловой нагрузки.*



Водный лёд

$$t_{пл} = 0^{\circ}\text{C}$$

нетоксичен

$$\lambda = 335 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Главный недостаток аккумуляторов данного типа – низкий коэффициент теплоотдачи при плавлении льда в большом объеме.

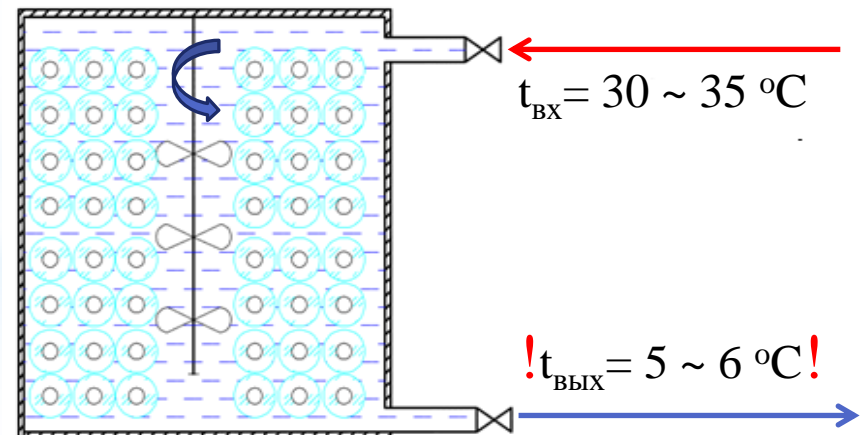
$$\alpha = 300 \sim 500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}) \longrightarrow \uparrow t_{\text{ВЫХ}}$$

### Решаемые задачи:

- разработка экспериментального стенда
- разработка методики проведения эксперимента
- проведение экспериментальных исследований
- определение влияния расхода и температуры подаваемой воды на интенсивность тепломассообмена
- обработка экспериментальных данных и анализ полученных результатов.



Льдоаккумулятор с объёмным типом плавления



Процесс разрядки объёмного льдоаккумулятора

### 3.Преимущества пленочного плавления

Пленочное обтекание без фазового перехода

**Применение:**

Оросительные теплообменные аппараты

**Особенность:**

Высокая интенсивность теплообмена

Существующие зависимости:

$$\alpha = a \frac{\Gamma^{0,257}}{H^{0,05}} (1 + bt) \text{ (Плэг)}$$

$$\alpha = 40 \frac{\Gamma^{0,4}}{d^{0,6}} \text{ (Адамс)}$$

$$\alpha = 122l^{0,4} \text{ (Семилет)}$$

$$\alpha > 5000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$$

Плавление в объёме

**Применение:**

Льдоаккумуляторы объёмного типа плавления

**Особенность:**

Фазовый переход льда в объёме жидкости

$$\downarrow \alpha = 300 \sim 500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$$

Пленочное обтекание плавящихся поверхностей

**Применение:**

Пленочные Льдоаккумуляторы

**Особенность:** Высокая интенсивность теплообмена + фазовый переход льда

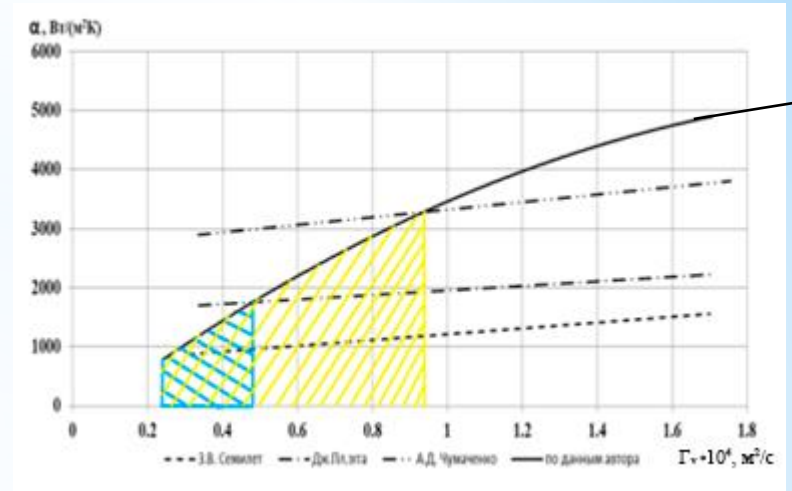
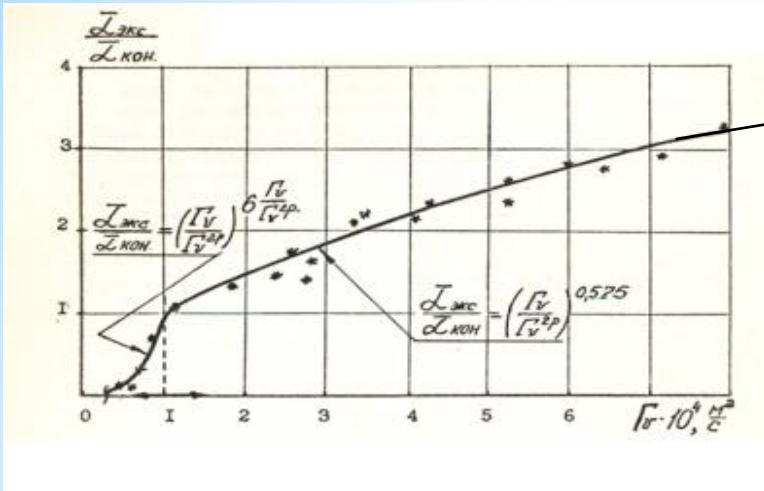


Существующие зависимости: ?

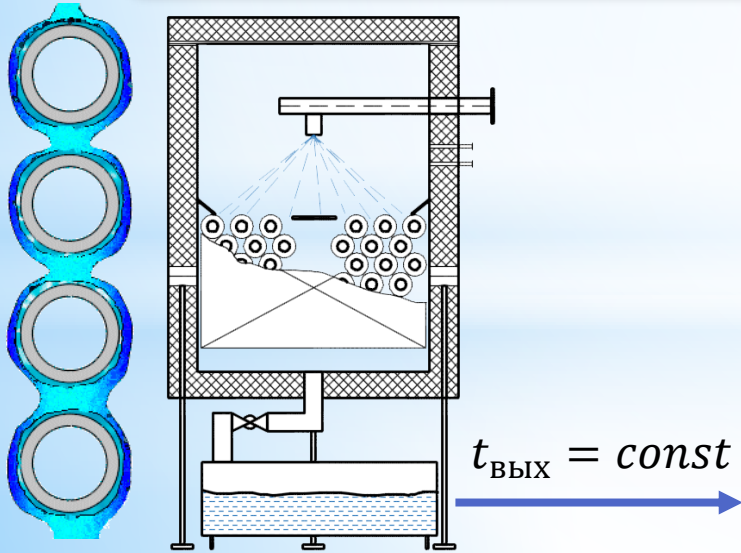
$$\uparrow \alpha = 7000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$$



# 4. Результаты обзора литературных источников



Данные, полученные при исследовании горизонтально-отрывного обтекания коаксиально расположенных цилиндрических ледовых поверхностей.



Эскиз пленочного коаксиального льдоаккумулятора

Основной режимный параметр

$$\Gamma_v = \frac{G}{2 * \Pi} \left( \frac{\text{м}^2}{\text{с}} \right)$$

$G$  – расход  $\left( \frac{\text{м}^3}{\text{с}} \right)$

$\Pi$  – линейный периметр м

Тепловой баланс для охлаждаемого потока жидкости

$$\frac{m_{вi} * C_{pi} * (t_{вxi} - t_{выxi})}{\Delta\tau} = \frac{r * m_{плi} + m_{плi} * C_{pi} * (t_{выxi} - t_0)}{\Delta\tau}$$

## 5.Схема экспериментального стенда

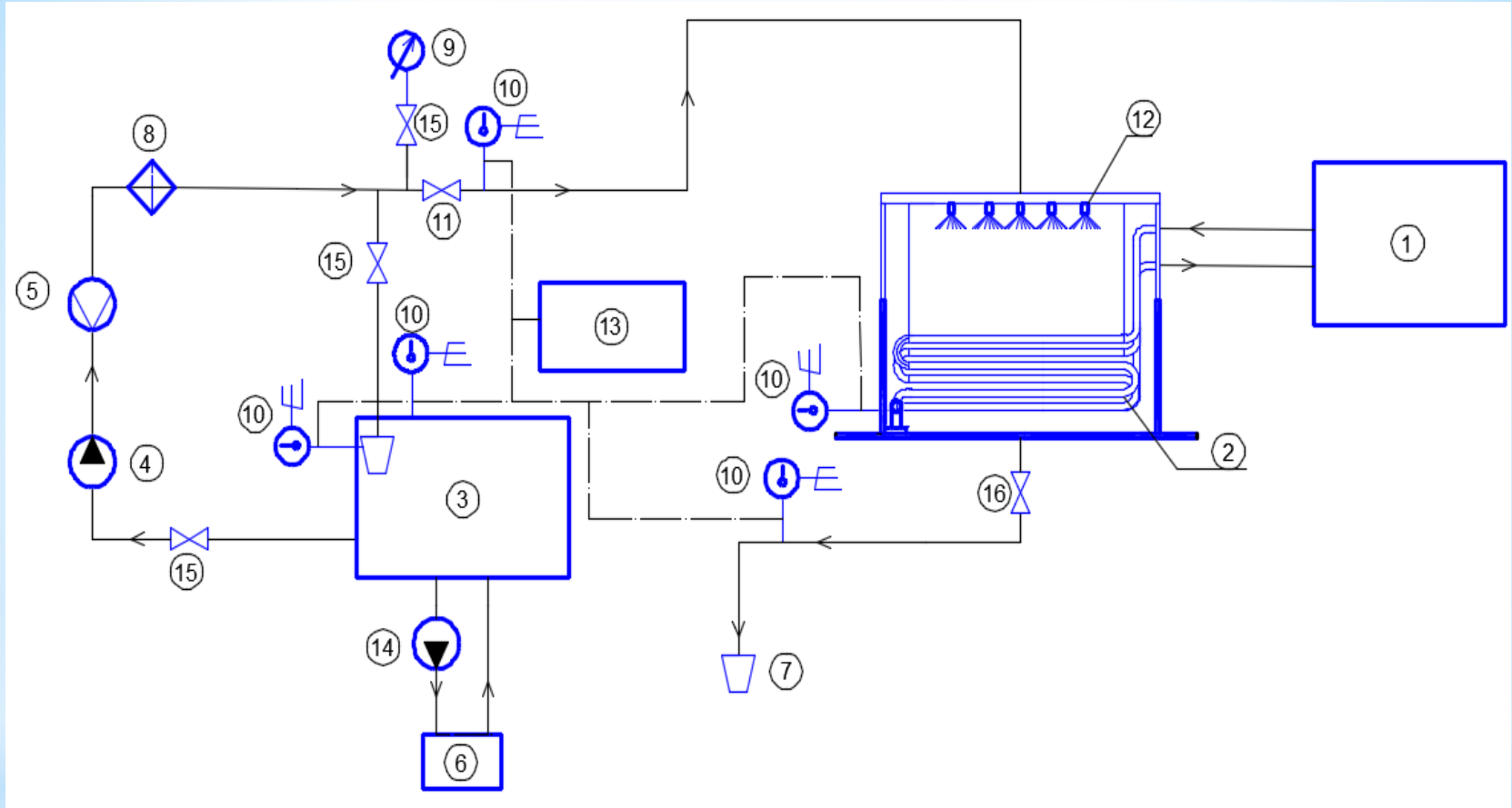
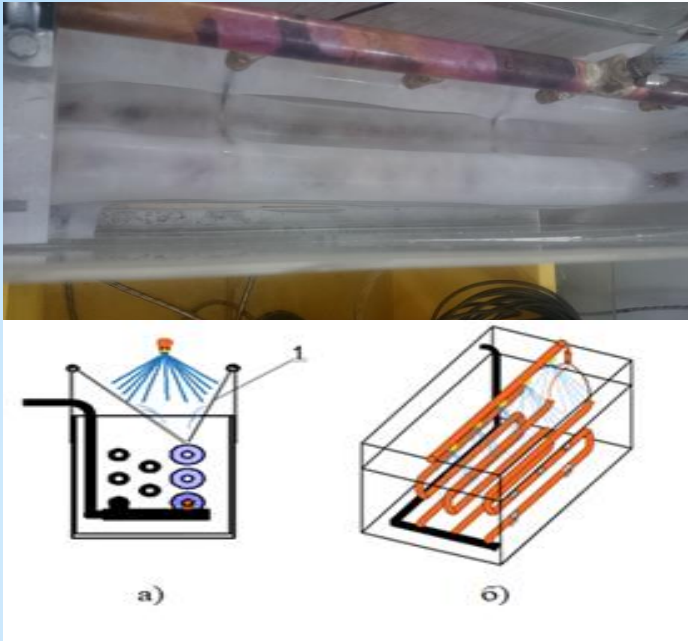


Схема экспериментального стенда: 1 - Компрессорно-конденсаторный блок, 2 – Льдоаккумулятор, 3 - Бак накопитель, 4 - Насос с частотным преобразователем, 5 – Ротаметр, 6 – Нагреватель, 7 - Мерная емкость, 8 – Фильтр, 9 – Манометр, 10 - Термометр электронный, 11 - Регулирующий вентиль, 12 - Форсуночный распылитель, 13 – Регистратор, 14 - Погружной насос, 15 – Запорный вентиль, 16 – Сливной вентиль

## 6. Экспериментальный стенд



Пленочный теплообменный аппарат с плоскими змеевиками (ПТА): а) распределение воды при орошении одной секции; б) трёхсекционный теплообменный аппарат с подачей воды через форсунки: поз. 1 – щелевой распределитель воды

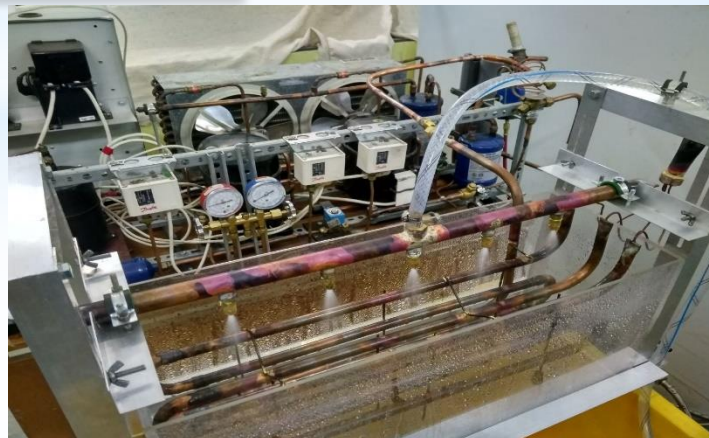
Пленочный теплообменный аппарат с Коаксиальным расположением труб

Необходимо определить:

-Отводимую тепловую

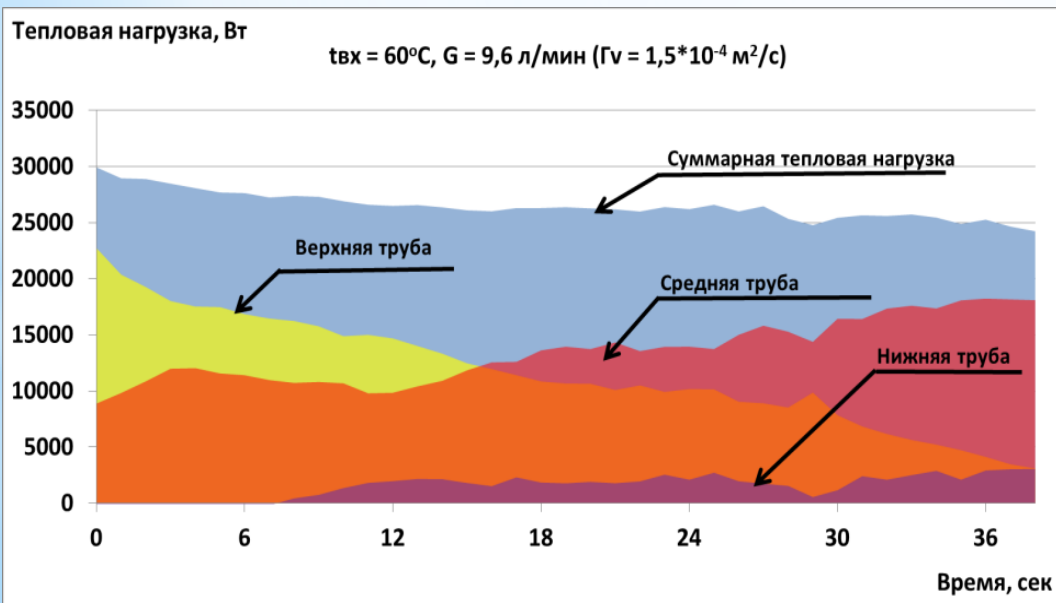
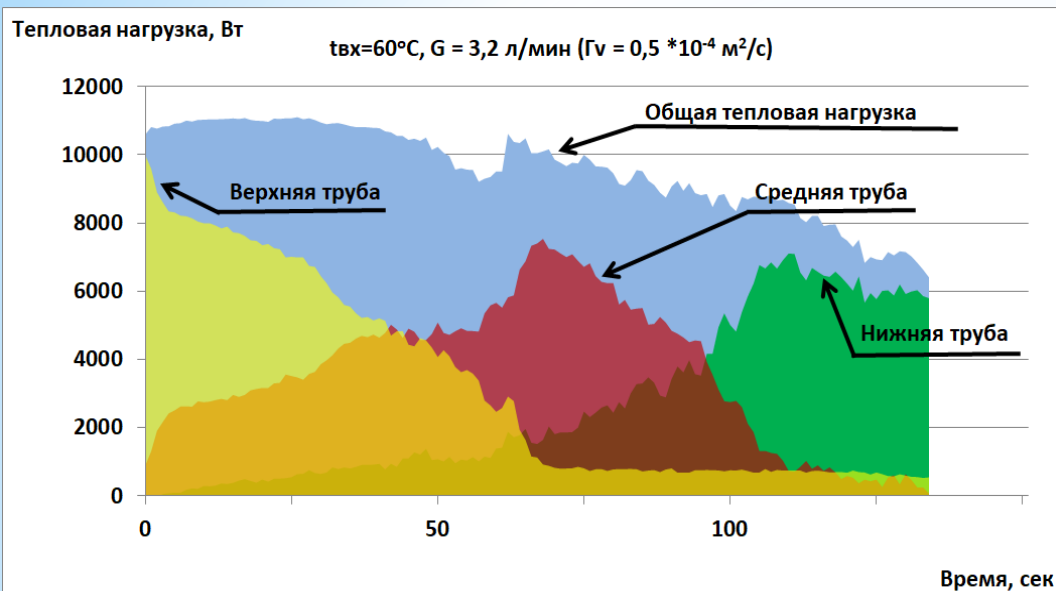
Нагрузку  $Q$

-Коэффициент теплоотдачи  $\alpha$



*Исследование  
выполнено при  
финансовой  
поддержке РФФИ в  
рамках научного  
проекта № 20-08-  
00120*

# 7. Отводимая тепловая нагрузка



Графики распределения тепловой нагрузки между трубами одной секции ПТА с площадью  $S=0,078 \text{ м}^2$ .

## Диапазон изменения режимных параметров

Наименование параметра	Диапазон регулирования
Температура подаваемой воды	от $20^{\circ}\text{C}$ до $60^{\circ}\text{C}$
Расход подаваемой воды	от $3,2 \text{ кг/мин}$ до $9,6 \text{ кг/мин}$
Плотность орошения	от $0,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ до $1,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$

Удельный теплосъём  $[\text{кВт}/\text{м}^2]$   
нагрузки

## Сравнительная характеристика

Пластинчатые теплообменные аппараты:  
от  $12$  до  $65 \text{ кВт}/\text{м}^2$

Пленочный теплообменный аппарат (ПТА):  
от  $120$  до  $320 \text{ кВт}/\text{м}^2$



# 8. Интенсивность теплообмена

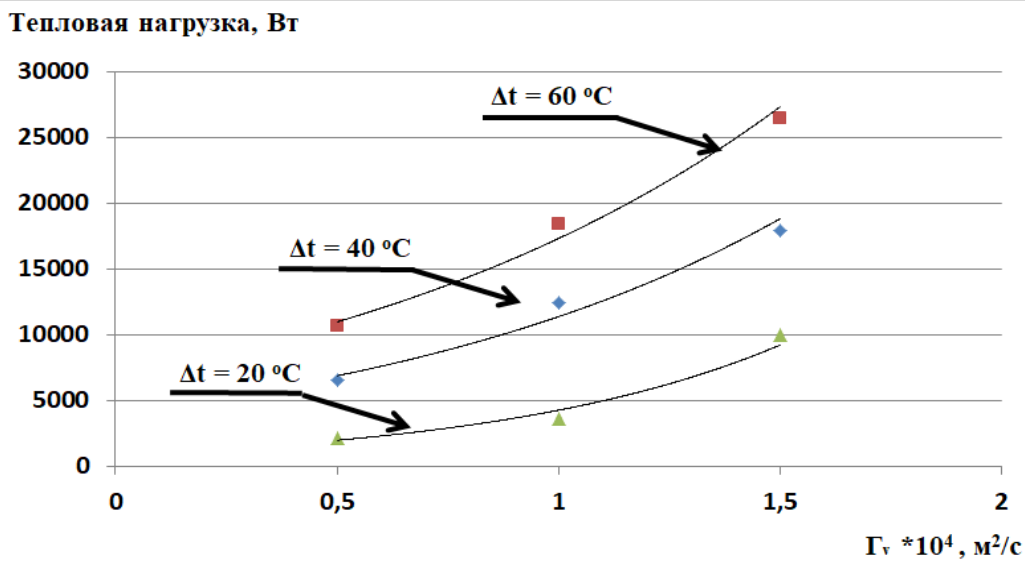
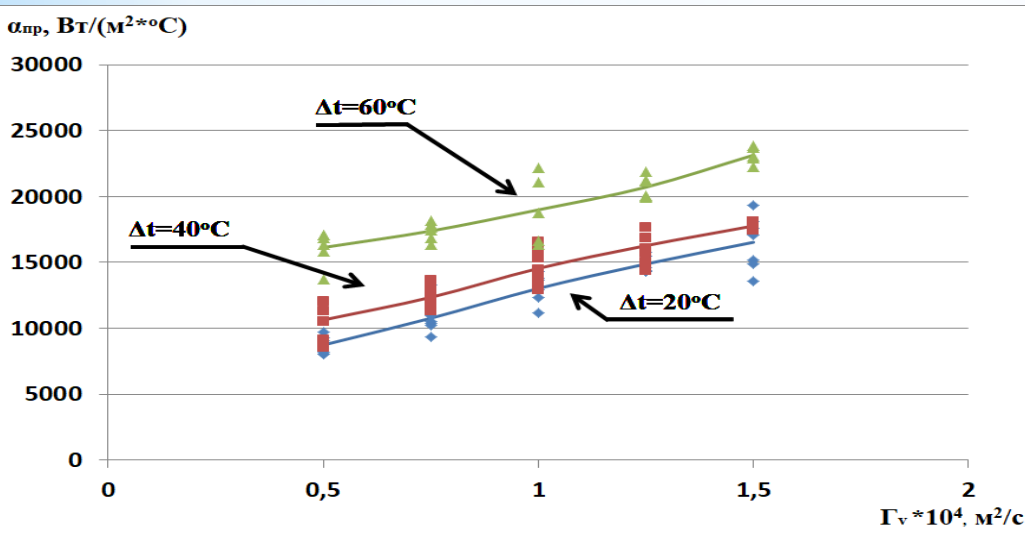


График зависимости тепловой нагрузки, снимаемой одной секцией ПТА с площадью  $S=0,078 \text{ м}^2$



Зависимость приведенного коэффициента теплоотдачи от плотности орошения

Закон Ньютона - Рихмана

$$q = \alpha(t_{ж} - t_c) \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

$\alpha$  – коэффициент пропорциональности

$$\alpha = f(Re, \Delta t)$$

$$F_{\text{льда}} = var \longrightarrow F_{\text{пта}}$$

$$\alpha_{пр} = \frac{Q_i}{(t_{ж} - t_{л})F_{\text{пта}}}$$

## 9. Заключение

Экспериментально доказано преимущество пленочного льдоаккумулятора по сравнению с объёмным:

- возможность охлаждения воды с температуры  $60^{\circ}\text{C}$  до  $1^{\circ}\text{C}$  за один проход;
- получена экспериментальная зависимость коэффициента теплоотдачи для пленочного льдоаккумулятора от плотности орошения.

В исследуемом диапазоне значения коэффициента теплоотдачи составляют  $\sim 22000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$  приведенные к поверхности теплообменного аппарата и  $\sim 7000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$  при отношении к плавящейся поверхности, а в льдоаккумуляторах с объёмным плавлением не превышают  $300 - 500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ .

Удельная тепловая нагрузка ПТА достигает  $320\,000 \text{ Вт}/\text{м}^2$ , что значительно превышает аналогичную величину для пластинчатых теплообменников, составляющую по данным открытых источников от  $12\,000$  до  $65\,000 \text{ Вт}/\text{м}^2$

### **Области применения:**

- Молочная промышленность
- Пивоваренная промышленность
- Кондиционирование помещений
- Аварийные и нештатные скачки тепловой нагрузки
- Охлаждение систем с импульсным характером тепловыделений (охлаждение лазеров и др.)

*Спасибо за внимание!*

## Дополнительные материалы



*Возможность использования естественного холода*