

На правах рукописи

УДК 621.565

**Круглов**

**Алексей Александрович**

**СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ  
РАЗВЕТВЛЕННЫХ ЦИРКУЛЯЦИОННЫХ КОНТУРОВ  
ХОЛОДИЛЬНЫХ УСТАНОВОК С ПРОМЕЖУТОЧНЫМ  
ХЛАДОНОСИТЕЛЕМ**

Специальность 05.04.03 — Машины и аппараты, процессы  
холодильной и криогенной техники, систем кондиционирования  
и жизнеобеспечения

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2003

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном  
университете низкотемпературных и пищевых технологий

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ — кандидат технических наук, доцент  
ПЕТРОВ Е. Т.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ: доктор технических наук, профессор  
Иванов Владислав Иванович  
кандидат технических наук  
Калюнов Виктор Сергеевич

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ — ОАО "ЛенНИИПроект", г. Санкт-Петербург

Защита состоится « 18 » декабря 2003 г. в 14 часов на заседании  
диссертационного Совета [Д 212.234.01](#) в Санкт-Петербургском государственном  
университете низкотемпературных и пищевых технологий:  
191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, СПбГУНиПТ

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГУНиПТ.

Автореферат разослан « 17 » ноября 2003 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор технических наук, профессор

Тимофеевский Л.С.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

Актуальность проблемы. В настоящее время при проектировании и строительстве пищевых предприятий все большее распространение получают схемы холодоснабжения с промежуточным хладоносителем. Широко используются упрощенные методы расчета холодильных установок. При этом диаметры труб и параметры теплоизоляционных конструкций определяются по нормативным значениям потерь давления и плотности теплового потока через изоляцию трубопроводов. Оптимизационные предпроектные исследования в практике проектных организаций проводятся редко. Существующими методами невозможно решение общей задачи автоматизированного проектирования холодильных установок, ввиду большого расхождения в значениях гидравлических сопротивлений и тепловых нагрузок, наличия локальных подсистем управления.

Отсутствие координированных методов автоматизированного проектирования, результатов оптимизационных исследований систем с промежуточным хладоносителем, необходимого методического и программного обеспечения не позволяет решать задачи повышения эффективности холодильных систем и сокращения сроков их проектирования.

Эти проблемы требуют разработки координированных методов автоматизированного проектирования указанных систем; проведения численных исследований с целью изучения характеристик разветвленных трубопроводных контуров; разработки программного обеспечения для реализации задач оптимизации, как в ходе проектирования, так и при эксплуатации систем охлаждения с промежуточным хладоносителем; оценки влияния свойств хладоносителей на работу холодильной установки.

Цель и задачи исследования: Разработка методического и программного обеспечения для автоматического проектирования систем холодоснабжения с промежуточным хладоносителем, обеспечивающих снижение уровня энергопотребления и размеров капиталовложений с учетом особенностей эксплуатации и управления.

Основными задачами исследования являются:

- разработка математической модели участка неразветвленного трубопровода и исследование при использовании различных видов материалов;
- анализ теплофизических свойств хладоносителей без изменения агрегатного состояния и их влияния на работу холодильной установки;
- разработка методологии структурно-параметрической оптимизации разветвленных контуров холодильных установок с промежуточным хладоносителем;
- разработка комплексного подхода к проектированию холодильной установки в целом и отдельных подсистем, выражающегося в создании подсистемы автоматизированного проектирования с единым скоординированным алгоритмом и тесным взаимодействием специалистов-проектировщиков и ЭВМ;
- численное исследование с целью теоретического и опытного изучения характеристик разветвленных трубопроводных систем.

Научная новизна. Впервые разработан обобщенный алгоритм автоматизированного проектирования на базе скоординированных отдельных этапов с использованием методологии структурно-параметрической оптимизации разветвленных трубопроводов, теплообменного, компрессорного оборудования и холодильных установок в целом.

Разработано программное обеспечение и проведено численное исследование неразветвленных и разветвленных трубопроводов, теплообменного оборудования.

Выполнено исследование свойств нового хладоносителя и сравнительный анализ характеристик перспективных хладоносителей.

На основе выполненного объема исследований сформированы направления совершенствования методов автоматизированного проектирования систем с промежуточным хладоносителем.

Практическая ценность. Разработанное методическое и программное обеспечение позволяет осуществить оптимальное проектирование холодильных установок с использованием промежуточного хладоносителя. Применение разработанных методов автоматизированного проектирования позволяет сократить время выполнения проектных работ, увеличить эффективность проектирования систем холодоснабжения.

Внедрение результатов работы. Результаты работы используются Проектно-конструкторским бюро СПбГУНиПТ, ЗАО "ИнтерНЕВМАШ", ЗАО "В-РИАЛ" и др. в процессе автоматизированного проектирования разветвленных трубопроводов и холодильных установок с промежуточным хладоносителем. Методика применялась при проектировании холодильных установок ОАО "Псковский городской молочный завод", ОАО "Петрохолод", ООО "Петрохолод. Молочные продукты", НПЗ г. Кстово.

Автор защищает: скоординированный метод многоуровневой структурно-параметрической оптимизации холодильных установок с промежуточным хладоносителем; результаты экспериментальных исследований теплофизических свойств и сравнительного анализа перспективных хладоносителей; результаты численных оптимизационных исследований неразветвленных и разветвленных трубопроводов.

Апробация работы. Материалы исследований по теме диссертации докладывались и обсуждались в 1998 - 2003 г.г. на конференциях профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников, аспирантов и студентов Санкт-Петербургского государственного университета низкотемпературных и пищевых технологий, Международной научно-технической конференции "Холодильная техника России. Состояние и перспективы накануне XXI века" (С.-Петербург, 1998 г.), Международной научно-технической конференции "Ресурсосберегающие технологии пищевых производств" (С.-Петербург, 1998 г.), Всероссийской научно-технической конференции "Прогрессивные технологии и оборудование пищевых производств" (С.-Петербург, 1999 г.), Международной научно-технической конференции "Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке" (С.-Петербург, 2001 г.).

Публикации. Основное содержание работы опубликовано в 5-и печатных работах.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав, и содержит 86 страниц основного текста, 3 таблицы, 20 рисунков. Список использованной литературы включает 73 наименования работ российских и зарубежных авторов.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Анализ существующих методов проектирования и оптимизации систем холодоснабжения с промежуточным хладоносителем выявил крайне ограниченное количество работ по данной теме. Поэтому основное внимание было уделено работам по оптимальному проектированию систем водо-, газо-, теплоснабжения и технологических трубопроводов химической и нефтеперерабатывающей промышленности. Работы В. Я. Хасилева, А. П. Меренкова, В. В. Кафарова, В. П. Мешалкина, М. Г. Сухарева, С. В. Сумарокова, И. Д. Зайцева, А. З. Миркина и других способствовали интенсивному развитию и совершенствованию методов оптимального проектирования разветвленных трубопроводных систем с использованием ЭВМ.

Наибольшее распространение получили алгоритмы, основанные на модульном принципе, методах последовательного анализа вариантов; задача оптимальной трассировки трубопроводов ставится как обобщение задачи Штейнера при отсутствии запрещенных областей. Значительное число публикаций связано с применением методов динамического программирования.

Обзор литературных данных позволяет сделать следующие выводы:

1. Существующие методы проектирования разветвленных трубопроводных систем не обеспечивают получение оптимальных параметров из-за:

- специфики характера изменения локальных и суммарной тепловых нагрузок холодильных установок;
- недостаточного координирования отдельных этапов оптимизации как всей холодильной установки, так и подсистемы трубопроводов;
- низкого уровня взаимосвязи локальных контуров управления и всей подсистемы трубопроводов в целом;
- специфики управления параметрами локальных подсистем и т. д.

Принятые в настоящее время упрощенные методы проектирования холодильных установок не позволяют достичь требуемого качества проработки проектов, оперативности решения проектных задач. Автоматизация отдельных стадий проектирования не дает заметного эффекта.

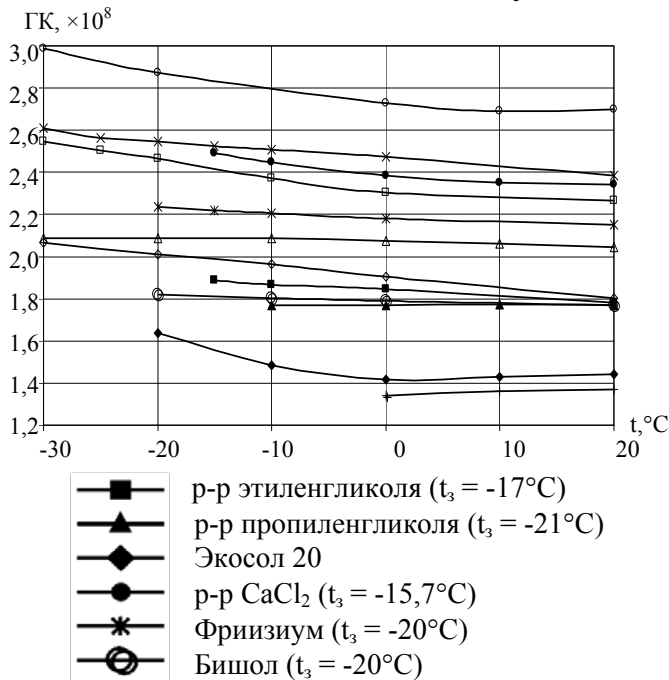
2. Практически отсутствуют оптимизационные исследования неразветвленных и разветвленных трубопроводов с изоляцией и неизолированных при существующем соотношении цен на энергоносители и материалы.

3. Исследование влияния свойств хладоносителей необходимо для определения направления их совершенствования, синтеза новых хладоносителей с наилучшим соотношением теплофизических свойств.

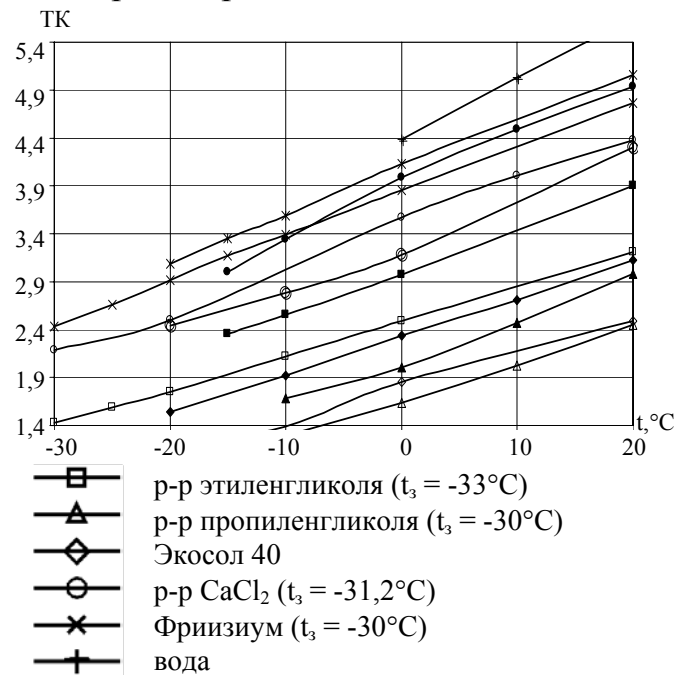
В данной работе реализуется комплексный подход к проектированию как холодильной установки в целом, так и отдельных подсистем, выражающийся в создании системы автоматизированного проектирования, когда единый скоординированный алгоритм основан на методике структурно-параметрической оптимизации систем, позволяющей координировать отдельные этапы проектирования, учитывающей особенности систем охлаждения с промежуточным хладоносителем.

При выборе хладоносителя учитываются:

- 1) возможность применения по экологическим, технологическим и др. условиям;
- 2) значение температуры замерзания;
- 3) отдельные теплофизические свойства и их комплексы, определяющие собой значения капитальных и эксплуатационных затрат и пр.



**Рис. 1.** Комплекс теплофизических свойств хладоносителя, влияющих на значение мощности насоса



**Рис. 2.** Влияние теплофизических свойств на значение коэффициента теплоотдачи

Можно выделить комплекс теплофизических свойств, влияющих на значение мощности привода насоса для транспортировки хладоносителя при тепловом потоке  $Q$  и температурном перепаде в охлаждающем устройстве  $\Delta t$ , – гидравлический комплекс (ГК):

$$\text{ГК} = \frac{1}{\rho_s^2 \cdot c_{ps}^3} \cdot \quad (1)$$

Интенсивность теплоотдачи в условиях вынужденной конвекции турбулентного движения в охлаждающем устройстве со стороны хладоносителя зависит от

$$\text{ТК} = \frac{\lambda_s^{0,57}}{\mu_s^{0,37} \cdot c_{ps}^{0,37}} \cdot \quad (2)$$

Результаты вычисления комплексов теплофизических свойств ГК и ТК для ряда наиболее распространенных хладоносителей, включая свойства нового хладоносителя "Бишол<sup>®</sup>" (природного происхождения) представлены на рис. 1, рис. 2.

Проведенные автором исследования свойств "Бишола<sup>®</sup>" показывают перспективность его применения в холодильных установках: по гидравлическим параметрам он уступает только "Экосолу", а по значению ТК – "Фриизиуму" (*Freezium*<sup>TM</sup>) и раствору  $\text{CaCl}_2$ , и обладает низкой коррозионной активностью.

Развитие вычислительной техники создает условия для перехода к новому этапу автоматизации процесса проектирования: созданию систем автоматизированного проектирования холодильных установок путем сопряжения локальных вычислительных комплексов, обеспечивающих проектирование отдельных узлов и элементов.

Для реализации всестороннего исследования систем холодоснабжения предлагается:

- введение универсальности иерархического принципа декомпозиции с использованием обобщенных функциональных особенностей выделенных подсистем;
- осуществление декомпозиции системы на подсистемы, которые имеют максимальную автономность (минимальное количество связей) как с позиции проведения предварительных экспериментальных и теоретических исследований, так и проведения синтеза и оптимизации непосредственно в процессе проектирования.

Учитывая функциональные особенности холодильных установок различного схемного исполнения, систему холодоснабжения можно разделить на основной и вспомогательный энергетический комплекс.

Задачей основного энергетического комплекса является реализация основных процессов холодильного цикла.

Задачей вспомогательного охлаждающего комплекса является реализация способностей хладоносителя того или иного потенциала (по давлению и температуре) по отводу теплоты от охлаждаемых объектов.

В состав вспомогательного комплекса входят:

- множество потребителей холода (совместно с элементами для организации и управления вынужденной локальной циркуляцией жидкости);
- испаритель;
- подсистема разветвленных подающих и обратных трубопроводов;
- подсистема "емкостное оборудование – насосы".

С учетом принятой формализации строится методология структурной и параметрической оптимизации систем холодоснабжения.

В общем случае задача комплексной оптимизации сводится к достижению максимального значения чистого дисконтированного дохода ЧДД

$$\max_{H \in H_0, X \in X_0, U \in U_0} \text{ЧДД}(H, X, U), \quad (3)$$

где  $H$  – вектор структурных параметров;

$X$  – вектор внутренних оптимизационных параметров;

$U$  – вектор параметров управления.

Для систем холодоснабжения при неизменности результатов (доходов) задача оптимизации может быть сведена к условию достижения минимума затрат

$$Z = \sum_{t=0}^T Z_t \cdot \frac{1}{(1 + E_{nt})^t} \rightarrow \min, \quad (4)$$

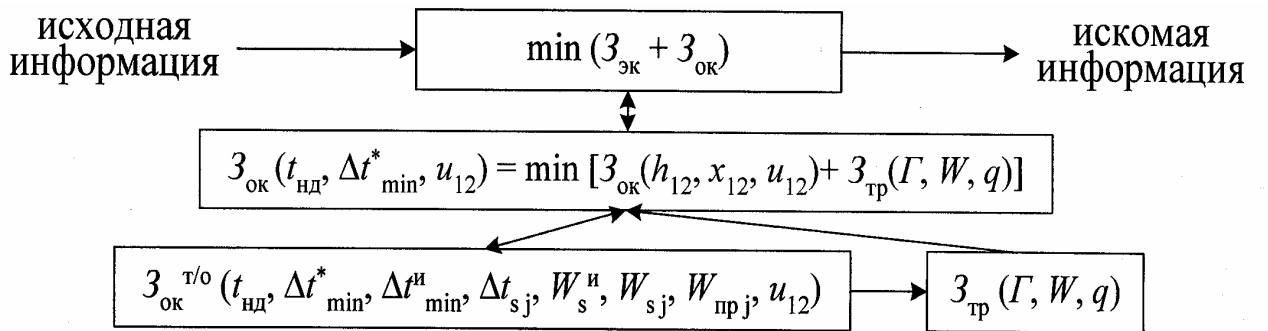
где  $Z_t = (Z_{\text{эк}} + Z_{\text{ок}})$  – затраты на реализацию проекта;

$Z_{\text{эк}}, Z_{\text{ок}}$  – затраты на основной и вспомогательный энергетический комплекс;

$E_{nt}$  – норма дисконта на  $t$ -ом шаге, учитывающая приемлемую для инвестора норму дохода, уровень инфляции и степень коммерческого риска.

Функция цели (ЧДД или  $Z$ ) выражается системой нелинейных и трансцендентных уравнений с большим числом ограничений и логических связей, поэтому данная задача составляет предмет нелинейного программирования. При решении задач параметрической оптимизации неплохо зарекомендовал себя метод скользящего допуска, который и использовался в данном случае.

Методология структурно-параметрической термоэкономической оптимизации базируется на совмещении принципов декомпозиции и композиции (рис. 3).



**Рис. 3.** Координирование отдельных этапов оптимизации холодильной установки

Параметры оптимизации основного энергетического комплекса описываются вектором:

$$x_{11} = x_{11}(\Delta \bar{t}_{\text{ом}}^K, \Delta t_{\text{мин}}^K, t_{\text{нд } i}, W_T^K), x_{11} \in X. \quad (5)$$

Параметры вспомогательного комплекса описываются вектором (см. рис. 4):

$$x_{12} = x_{12}(t_{\text{нд } i}, \Delta t_{\text{мин } i}^*, \Delta t_{\text{мин } i}^u, \Delta t_{s \text{ } ij}, W_s^u, W_{s \text{ } ij}, W_{\text{пр } ij}), x_{12} \in X. \quad (6)$$

Структурно-параметрическая оптимизация систем холодоснабжения с промежуточным хладоносителем сводится к последовательному синтезу структуры и оптимизации параметров отдельных комплексов (подсистем) с привлечением ме-



тодов сопряжения с другими комплексами (подсистемами) на базе использования регрессионных и имитационных моделей.

В основу моделей отдельных комплексов входят результаты оптимизационных исследований подсистем и узлов в виде регрессионных соотношений между входными и выходными параметрами. Соотношений в общем случае может быть несколько, т. к. они могут отражать разнообразные взаимосвязи как физических, так и технико-экономических параметров.

В процессе структурно-параметрической оптимизации подсистема вспомогательного охлаждающего комплекса сводится к псевдовершине основного энергетического комплекса, имеющей регрессионное или имитационное математическое описание, сформулированное при проведении оптимизационного исследования, которое используется при оптимизационном исследовании всей системы.

Разработанный обобщенный алгоритм автоматизированного проектирования контуров систем охлаждения с промежуточным хладоносителем на базе скоординированных отдельных этапов с использованием методологии структурно-параметрической оптимизации разветвленных трубопроводов, теплообменного оборудования и холодильной установки в целом представлен в виде блок-схемы на рис. 5.

Оптимизационные исследования подсистемы "потребители холода – испаритель" сводятся к достижению условия:

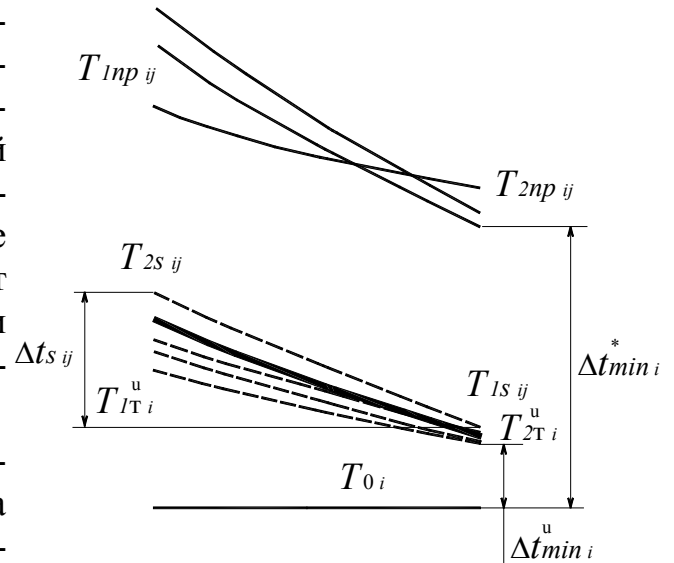
$$\min \left\{ \left[ \sum_j \left( \mathcal{D}_T \cdot \frac{1}{\eta_k} + \mathcal{D}_G \cdot \frac{1}{\eta_n} \right) + \mathcal{D}_{Tu} \cdot \frac{1}{\eta_k} + \mathcal{D}_{Gu} \cdot \frac{1}{\eta_n} \right] \cdot \tau_z \cdot c_{1\varphi} + \sum_j (K_j + K_u) \right\} \cdot \frac{1}{(1 + E_{nt})^t}, \quad (7)$$

где  $\mathcal{D}_T, \mathcal{D}_G$  – тепловые и гидравлические потери эксергии в теплообменниках, испарителях и др. элементах системы;

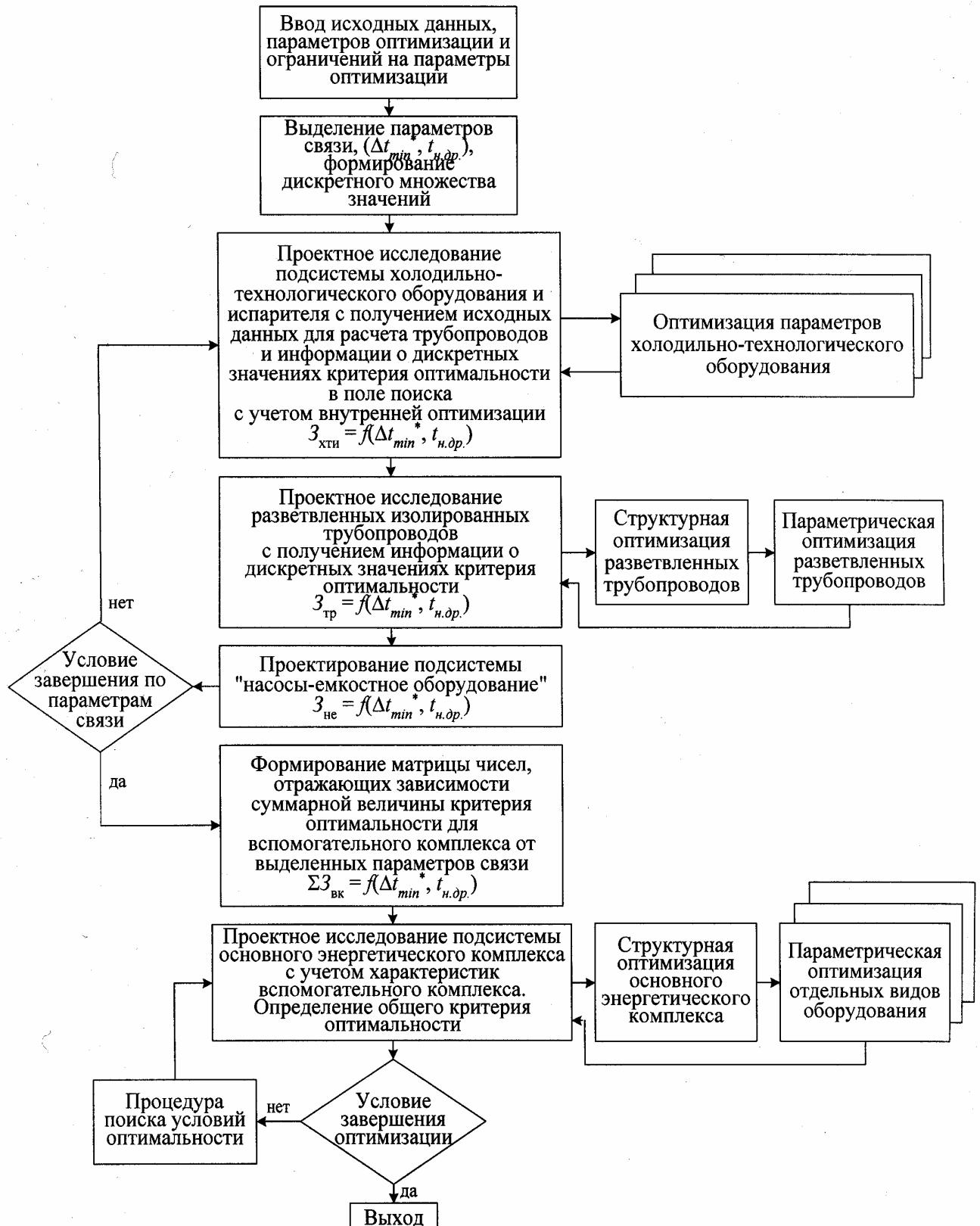
$K_j, K_u$  – капитальные затраты на теплообменники, испарители и др. элементы системы.

Данная подсистема может включать элементы локального управления, обеспечения гидравлического и теплового равновесия, которые позволяют в процессе регулирования минимизировать воздействие каждого потребителя холода на систему в целом:

- схемы с "подкачкой" хладоносителя насосами;
- инжектор с регулируемым соплом;



**Рис. 4.** Основные параметры оптимизации вспомогательного контура.



**Рис. 5.** Блок-схема алгоритма автоматизированного проектирования контуров систем охлаждения с промежуточным хладоносителем

- подмешивание теплых обратных потоков к холодным прямым потокам, подаваемым к отдельным потребителям холода, с помощью трехходовых клапанов;
- изменение расхода подаваемого хладоносителя.

Результатом оптимизационного исследования подсистемы "потребители холода – испаритель" является множество значений расходов хладоносителя через отдельные потребители холода, гидравлические потери и стоимость оборудования.

Структурно-параметрическая оптимизация разветвленных трубопроводов сводится к достижению условия

$$\min Z_{mp}(\Gamma, W, q), \quad (8)$$

где  $\Gamma$  – параметр, характеризующий схему трассировки трубопроводов;

$W, q$  – вектор скорости хладоносителя в трубах и плотности теплового потока через изоляцию трубопроводов.

Затраты на трубопроводы для транспортировки хладоносителя составляют основную долю от общих затрат на циркуляционные контуры, поэтому система разветвленных трубопроводов выделяется в отдельный скоординированный вычислительный комплекс.

Структурно-параметрическая оптимизация реализуется с применением методов динамического программирования в два этапа:

Этап 1. Формирование оптимальных схем трассировок разветвленных трубопроводов, что соответствует достижению минимального значения функции затрат:

$$\min [Z_{mp}(\Gamma) = \sum_j \sqrt{G_{sj}} \cdot \ell_j], \quad (9)$$

где  $\ell_j$  – длина  $j$ -го участка сети трубопровода;

$G_{sj}$  – массовый расход рабочего тела в  $i$ -ом участке.

Для решения задачи трассировки разработан и реализован новый алгоритм, основанный на теории графов и на идеях, развитых в работах, посвященных задаче Штейнера.

Замкнутые контуры трубопроводов приводятся к разветвленной сборнотупиковой схеме. Топология сети трубопроводов представляется в виде ориентированной сети с произвольным множеством потребителей холода (источков) и одним стоком (насосным отделением), состоящей из конкретных подсетей.

В построенном ортогональном связном графе осуществляется решение задачи трассировки.

Из ограничений, которые учитываются при построении трассы, следует отметить следующие:

- наличие запрещенных зон, внутреннюю область которых при проведении трассы пересекать нельзя;
- прямоугольный характер трассировки, учитывающий направления основных трасс технологических трубопроводов и расположение производственных помещений.

Результатом первого этапа является сеть оптимальной трассировки, на основе которой проводится следующий этап – оптимизация размеров трубопроводов и выбор изоляции.

Этап 2. Параметрическая оптимизация разветвленных трубопроводов на всех участках с учетом гидравлического согласования в узлах смешения потоков с обеспечением условия

$$\min Z_{\text{тр}}(W, q). \quad (10)$$

Расчеты замкнутых контуров сводятся к последовательному расчету отдельных условно разомкнутых сборно-тупиковых подсистем. Для упрощения методов оптимального проектирования параметры подающих и возвратных трубопроводов условно считаются равными.

Сеть разветвленных трубопроводов формируется в виде главной магистрали (главной цепи) и отдельных подсетей, в каждой из которых выделяются главные цепи соответствующих уровней и которые являются совокупностью последовательно соединенных неразветвленных участков трубопровода, соединяющих один из потребителей холода с насосным отделением или с узлом смешения потоков на главной цепи более высокого уровня, которой соподчинена данная главная цепь.

Задача определения оптимальных размеров изолированного трубопровода базируется на многоуровневой схеме поиска условия оптимальности с учетом ограничений:

1) плотность теплового потока через изоляцию должна обеспечивать условия невыпадения конденсата на поверхности изоляции

$$q < q_{\text{конд}}, \text{ т. е. } T_{\text{пов}} > T_{\text{росы}}; \quad (11)$$

2) отдельные части сети трубопроводов должны быть согласованы по давлению в узлах смешения.

Тепловой и гидравлический расчет разветвленного трубопровода ведется последовательно по участкам главных цепей каждого уровня, включая потоки из подсетей более низкого уровня в узлах смешения с соблюдением условия гидродинамического согласования.

При проведении оптимизационных исследований неразветвленных изолированных трубопроводов учитывается влияние на другие элементы холодильной установки, экономические параметры оцениваются по дисконтированным затратам:

$$\min Z_{\text{мп}} = \min \left( \sum_t \frac{S_{\text{мп}}}{(1 + E_{\text{нт}})^t} + K_{\text{мп}} \right), \quad (12)$$

где  $K_{\text{мп}} = \sum_j c_{\text{мп } j}(d_j) \cdot L_j + \sum_i K_i$  – капитальные затраты, включающие затраты на трубопровод и другое оборудование (насос, испаритель, конденсатор, компрессор);

$$S_{mp} = \left[ \frac{T - T_{np}}{T} \Delta Q_{mp} + G \cdot \frac{T_{np}}{T} \cdot \frac{v \cdot \Delta p_{mp}}{\eta_{mex}^H} \right] \cdot \frac{\tau_z \cdot c_{1э}}{\eta_{км} \cdot \eta_{дв} \cdot \eta_{мех}} + \sum_i S_i - \text{эксплуатационные}$$

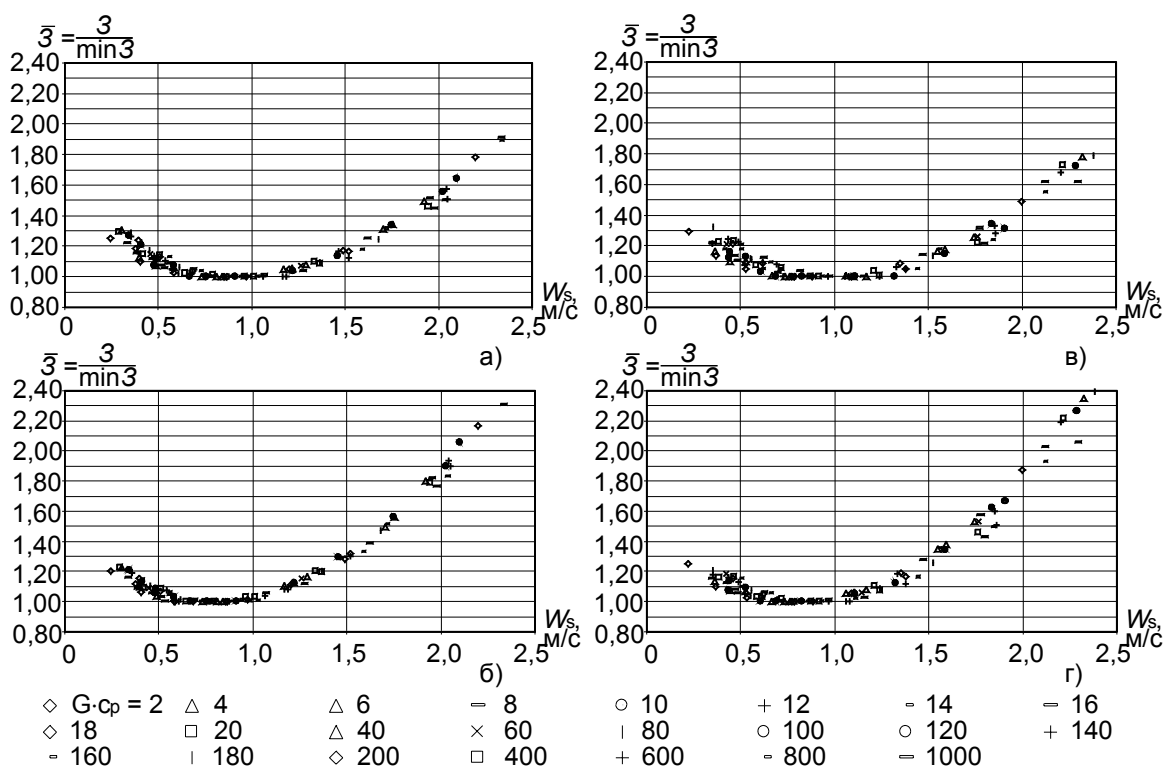
затраты, учитывающие затраты на увеличение мощности компрессора и стоимости другого оборудования.

Ограниченный объем исследований системы трубопроводов при различных значениях  $\Delta t_{min}^*$  позволяет получить зависимость  $Z_{тр} = f(\Delta t_{min}^*)$  при оптимальном  $t_{нд}$ , которая используется на верхнем уровне оптимизации.

Проектирование подсистемы "насосы – емкостное оборудование" ведется с учетом технологических и эксплуатационных особенностей конкретного предприятия.

Анализ результатов проведенных численных исследований неразветвленных изолированных трубопроводов показывает:

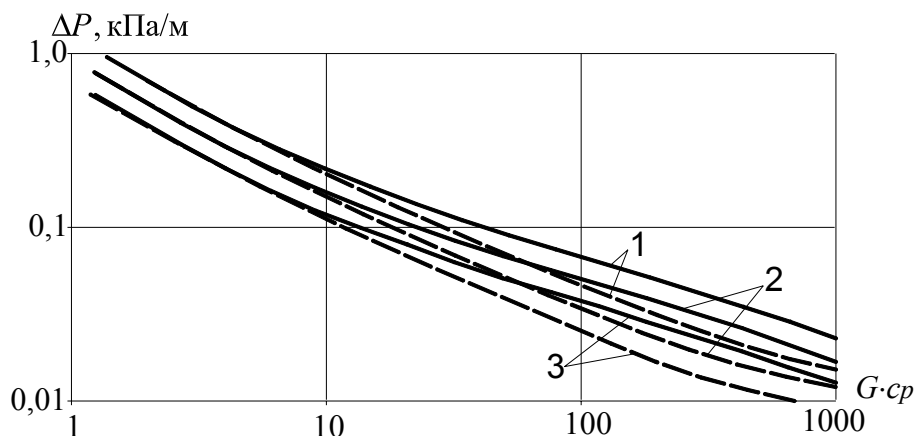
– увеличение срока окупаемости приводит к более выраженному экстремуму относительных затрат (в диапазоне скоростей от 0,7 до 1,3 м/с при  $\tau_{ок} = 2$  года и 0,5 ÷ 0,8 м/с – при  $\tau_{ок} = 8$  лет); целевая функция резко возрастает при незначительном отклонении скорости от оптимальных значений (см. рис. 6);



**Рис. 6.** Влияние параметров оптимизации участка трубопровода на относительные затраты: а)  $t_s = -25^\circ\text{C}$ ,  $\tau_{ок} = 2$  года; б)  $t_s = -25^\circ\text{C}$ ,  $\tau_{ок} = 8$  лет; в)  $t_s = +5^\circ\text{C}$ ,  $\tau_{ок} = 2$  года; г)  $t_s = +5^\circ\text{C}$ ,  $\tau_{ок} = 8$  лет.

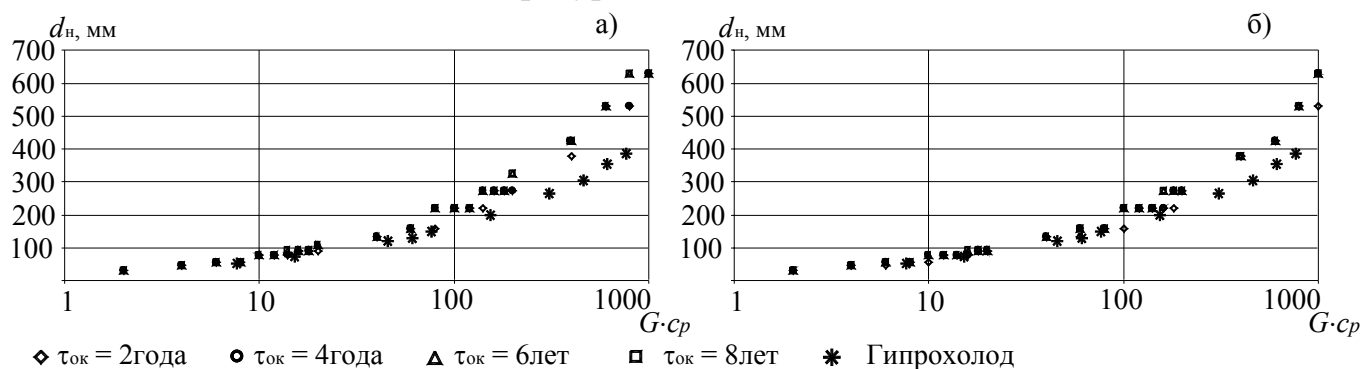
– оптимальное значение потерь давления на 1 м трубы (т.е. соответствующее минимуму затрат) при увеличении расхода хладоносителя сокращается (рис. 7);

– изменение температуры хладоносителя от минус  $25^\circ\text{C}$  до минус  $10^\circ\text{C}$  увеличивает значение оптимальной скорости движения хладоносителя до 10 %; изменение от минус  $10^\circ\text{C}$  до плюс  $5^\circ\text{C}$  – на 4 %;



**Рис. 7.** Потери давления по длине трубопровода при оптимальной скорости движения: 1 —  $t_s = +5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 2 —  $t_s = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 3 —  $t_s = -25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; —  $\tau_{\text{ок}} = 2$  года; - -  $\tau_{\text{ок}} = 8$  лет;

— в области высоких расходов ( $G \times c_p > 100$ ) понижение температуры хладоносителя приводит к увеличению оптимального значения диаметра трубопровода ( $d_n$ ) на один типоразмер; применение в качестве теплоизоляции более эффективных но и более дорогих материалов (например, на основе вспененного каучука) снижает значение оптимального диаметра трубопровода на 1÷2 типоразмера по сравнению с более дешевыми (минеральная вата) (рис. 8). Сравнение с данными рекомендаций по проектированию трубопроводов Гипрохолода показывает, что при существующем соотношении цен оптимальное значение диаметра трубопровода больше на 1÷3 типоразмера. Особенно заметно различие при высоких расходах и в области низких температур хладоносителя.



**Рис. 8.** Диаметр трубопровода, соответствующий минимуму затрат:

а) при  $t_s = -25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; б) при  $t_s = +5\text{ }^{\circ}\text{C}$

Проведенные оптимизационные исследования систем разветвленных трубопроводов доказали следующие положения:

а) оптимизация трассировки трубопроводов успешно решается путем приведения ее к модифицированной задаче Штейнера;

б) диаметры труб на отдельных участках трубопроводов определяются главным образом вектором скорости  $W$  и свойствами хладоносителя (при фиксированных значениях тарифа на электроэнергию и удельной приведенной стоимости теплоизоляционного слоя).

Эффективность систем с промежуточным хладоносителем определяется главным образом следующими параметрами:

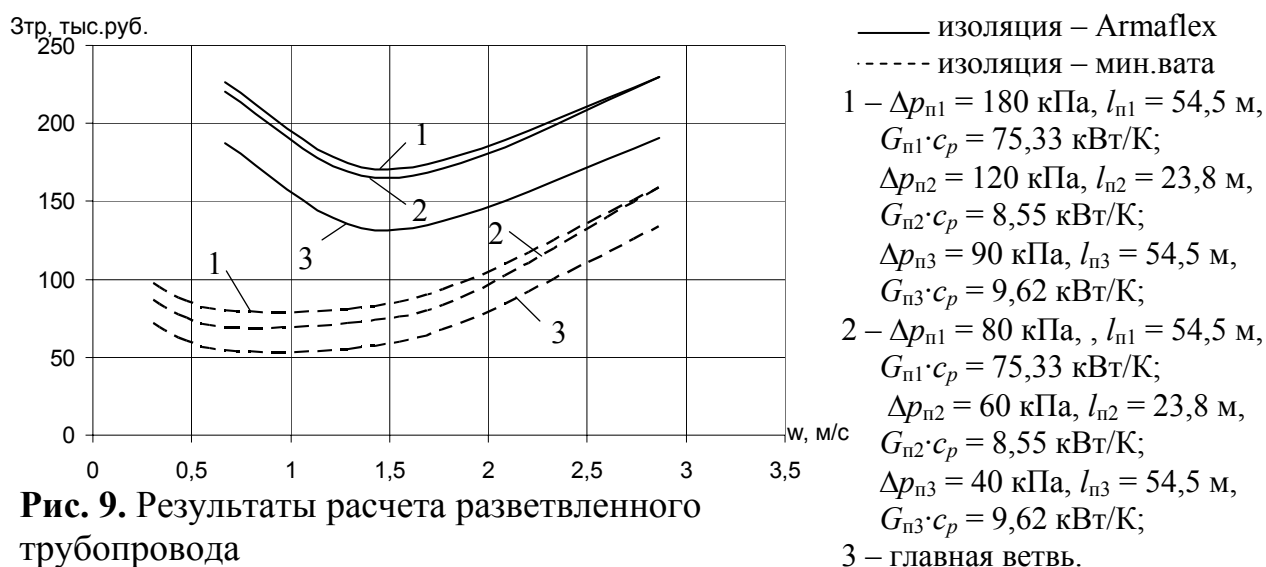
- а) свойствами хладоносителя и охлаждаемых потоков;
- б) действующими тарифами на энергоносители;

в) стоимостью оборудования.

Стоимость разветвленных трубопроводов при проектировании сложных систем холодоснабжения (например, молочных, пивоваренных заводов) может достигать  $20 \div 30 \%$  от стоимости холодильного оборудования.

Параметры оптимизации, в зависимости от конкретных условий эксплуатации и действующих тарифов, меняются в достаточно широких пределах:  $\Delta t_s = 2 \div 6$  °C;  $\Delta t_{\min}^u = 1,5 \div 5$  °C;  $\Delta t_{\min}^* = 4 \div 12$  °C;  $W_s = 0,6 \div 1,3$  м/с. Меньшие значения  $\Delta t_s$  соответствуют системам при использовании хладоносителей с малыми значениями  $\rho_s \cdot c_{ps}$ , меньшие значения  $\Delta t_{\min}^u$ ,  $\Delta t_{\min}^*$  – задачам проектирования при максимальных тарифах на энергоносители и минимальными ценами теплообменного оборудования (высокие значения ГК).

Пример результатов расчета разветвленного трубопровода приведен на рис. 9.



**Рис. 9.** Результаты расчета разветвленного трубопровода

Увеличение стоимости теплоизоляционного материала приводит к более выраженному минимуму оптимальной скорости хладоносителя, при этом значение оптимальной скорости повышается. Характер изменения стоимости при сопоставимых значениях потерь давления в потребителях холода определяется характером изменения стоимости главной ветви.

Результаты оптимизации, как правило, сводятся к выявлению дискретного множества значений указанных оптимизирующих параметров, что обусловлено выбором оборудования из существующих типоразмерных рядов. Наиболее целесообразно принимать следующие значения параметров оптимизации: минимальный перепад температур в испарителе  $\Delta t_{\min}^u = 1,8 \div 2,8$  К, минимальный перепад в конденсаторе воздушного охлаждения  $\Delta t_{\min}^k = 5,5 \div 8,5$  К,  $\Delta \bar{t}_{om}^k = 1,7 \div 2,5$  К.

Выполненная серия численных исследований подтверждает рациональность выбранного алгоритма структурно-параметрической оптимизации холодильной установки, расширяет возможности диалога проектировщик – ЭВМ, реального анализа промежуточных результатов и оптимизации отдельных подсистем.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ.

1. Разработана математическая модель неразветвленного участка изолированного трубопровода, позволяющая проводить оптимизационные численные исследования. Результаты исследований подтверждают необходимость предпроектных технико-экономических расчетов с учетом принятых типов изоляции, текущей стоимости энергоносителей и материалов.

2. Проведен анализ влияния теплофизических свойств хладоносителей без изменения агрегатного состояния на гидравлические и тепловые характеристики систем трубопроводов. Выявлена целесообразность расширения области применения хладоносителей природного происхождения ("Бишол<sup>®</sup>" и др.).

3. Разработанная методика многоуровневой структурно-параметрической оптимизации разветвленных циркуляционных контуров холодильных установок с промежуточным хладоносителем позволила получить единый скоординированный алгоритм автоматизированного проектирования указанных систем.

4. Проведены численные исследования неразветвленных и разветвленных трубопроводов. В зависимости от протяженности трубопровода и мощности потребителя холода удельная стоимость циркуляционных контуров находится в диапазоне  $10 \div 30$  % стоимости всей системы холодоснабжения, что для крупных предприятий составляет значительную долю общих затрат на строительство предприятия. Применение оптимизационных расчетов позволяет снизить эксплуатационные затраты на производство холода на  $15 \div 20$  % и избежать необоснованного завышения капитальных затрат.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

1. Петров Е. Т., Круглов А. А., Наместников С. Н., Конев А. А. Анализ эффективности хладоэнергетических систем при использовании различных хладоносителей. // Тезисы докладов Международной научно-технической конференции "Ресурсосберегающие технологии пищевых производств" – СПб. – 1998 г. – с. 216.
2. Петров Е. Т., Круглов А. А. Оптимизация параметров разветвленных трубопроводных систем с промежуточным теплоносителем. // Тезисы докладов Международной научно-технической конференции "Холодильная техника России. Состояние и перспективы накануне XXI века" – СПб. – 1998 г. – 64 с.
3. Петров Е. Т., Круглов А. А. Особенности проектирования холодильных установок с промежуточным хладоносителем. // Тезисы докладов Международной научно-технической конференции "Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке" – СПб. – 2001 г. – с. 83 - 84.
4. Круглов А. А. Особенности оптимизации параметров отдельных участков неразветвленных трубопроводов с промежуточным хладоносителем. // "Петербургские традиции хлебопечения, пивоварения, холодильного хранения и консервирования". Сборник трудов. – МАХ, СПбГУНиПТ – 2003 г. – с. 21-22.
5. Круглов А. А. Алгоритм автоматизированного проектирования контуров систем с промежуточным хладоносителем. // "Петербургские традиции хлебопечения, пивоварения, холодильного хранения и консервирования". Сборник трудов. – МАХ, СПбГУНиПТ. – 2003 г. – с. 19-20.