



Презентация диссертационной работы
Галкина Михаила Леонидовича
на соискание ученой степени доктора технических наук по теме



**Повышение энергоэффективности
и промышленной безопасности
систем холодоснабжения
с промежуточным хладоносителем**

по специальности 05.04.03.
«Машины и аппараты, процессы холодильной и криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения»

Москва 2017

Цель работы

Снизить энергопотребление и повысить безопасность действующих и проектируемых промышленных систем холодоснабжения с вторичным контуром.

Достигнута поставленная цель путем решения следующих задач:

- **Разработаны низковязкие энергосберегающие хладоносители с пакетом присадок, обеспечивающим срок эксплуатации 15 лет.**
- **Разработана система матриц классификации хладоносителей.**
- **Получено представление о влиянии ионного состава хладоносителей и ряда микроорганизмов на коррозионную активность, теплофизические и токсикологические свойства хладоносителей, а также на гидродинамические характеристики холодильной системы.**
- **Разработаны технологии поддержания оптимального состава хладоносителя в процессе эксплуатации и присадки для регенерации хладоносителей, в том числе без прерывания холодильной цепи предприятия.**
- **Разработаны методики мониторинга и биомониторинга хладоносителей.**

Разработаны низковязкие энергосберегающие хладоносители с пакетом присадок, обеспечивающим срок эксплуатации 15 лет

Получен патент и запущено промышленное производство низковязких энергосберегающих хладоносителей ХНТ-НВ (ТУ 2422-011-11490846-07), снижающих энергопотребление холодильных систем и позволяющих снизить материалоемкость системы на этапе проектирования. На рис. 1 показана расчетная мощность насосной группы вторичного контура (ВК) системы холодоснабжения (СХ) при напоре 20 м, рассчитанная для системы холодопроизводительностью 1000 кВт с аммиачной холодильной машиной, состоящей из винтового агрегата мощностью 320 кВт с испарительным конденсатором мощностью 48 кВт при температуре окружающей среды плюс 32 °С, теплообменник (испаритель) аммиак/хладоноситель, насосного агрегата обратного водоснабжения при напоре 20 метров. Температура хладоносителя на входе в испаритель составляет минус 10 °С, на выходе – минус 15 °С.

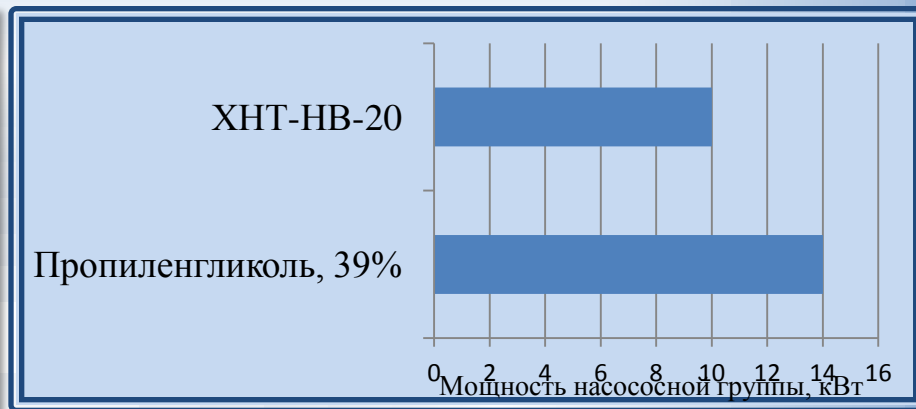


Рис. 1. Мощность насосной группы, затраченной на перекачивание низковязкого хладоносителя ХНТ-НВ и водного раствора пропиленгликоля, необходимой для выработки 1000 кВт холода

Из рис. 1 видно, что разработанный низковязкий хладоноситель ХНТ-НВ (ТУ 2422-011-11490846-07) обеспечивает снижение энергозатрат на перекачивание до 30 %. Разработанный пакет присадок обеспечивает срок непрерывной эксплуатации хладоносителей серии ХНТ не менее 15 лет.

Таблица 1. Классификация хладоносителей по эксплуатационным свойствам и температурным интервалам

| Температурный интервал эксплуатации хладоносителя, °С | Основа хладоносителя | | Торговое название хладоносителя | Органолептика | Пожаро-, взрывоопасность | Теплофизические свойства | Экономичность | Токсичность | |
|---|----------------------|---|--|-----------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------|-------------|---|
| выше +2 | Вода | | СП-В | 5* | 5 | 5 | 5 | 5 | |
| +2 ... -20 | Спирты | Этиленгликоль | Тосол; Spektrogen; Hot Blood; Dowtherm SR-1 | 2 | 5 | 4 | 4 | 2 | |
| | | Пропиленгликоль | ХНТ-40; Нордвей-ПРО; Pekasol L; Dowcal N; Ambitrol NTF | 5 | 5 | 3 | 3 | 5 | |
| | | Этиловый спирт | Экофрост | 2 | 1 | 4 | 3 | 3 | |
| | | Глицерин | | 4 | 5 | 3 | 3 | 5 | |
| -20 ... -40 | Спирты | Этиленгликоль | Spektrogen GR-LV | 2 | 5 | 4 | 3 | 2 | |
| | | Пропиленгликоль | ХНТ-НВ | срок эксплуатации 15 лет | 5 | 5 | 4 | 3 | 5 |
| | | | ХНТ-СНВ | | 5 | 5 | 4 | 4 | 4 |
| | Эфиры | Этилкарбитол | Экосол | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | |
| | Неорганические соли | CaCl ₂ , NaCl, MgCl ₂ , Бишофит | Хлориды, рассолы | 2 | 5 | 4 | 5 | 2 | |
| | | Карбонат калия | Асол-К | 4 | 5 | 4 | 5 | 4 | |
| | | Нитраты, сульфаты | | 3 | 5 | 4 | 5 | 3 | |
| | Органические соли | Ацетат калия | Арктика; Pekasol 2000; Нордвей-ХН | 3 | 5 | 4 | 3 | 4 | |
| Ацетат калия + формиат калия | | Freezium; Нордвей-Форм | 3 | 5 | 4 | 3 | 4 | | |
| ниже -40 | Безводные | Дифенил | Dowtherm A, Dowtherm HT | 4 | 4 | 2 | 3 | 5 | |
| | | Кремнийорганические | Syltherm 800, Syltherm XLT, Syltherm HF | 5 | 4 | 2 | 1 | 5 | |

*- экспертные оценки, выставляются группой экспертов: 1 – неудовлетворительно; 5 – отлично.

Разработана система матриц классификации хладоносителей

В табл. 1 приведены примеры систематизации хладоносителей по рекомендуемым температурным интервалам эксплуатации и видам опасности. Проведенная систематизация позволяет оптимизировать состав хладоносителя селективно по требованиям заказчика с учетом капитальных и эксплуатационных затрат, необходимых для эксплуатации системы холодоснабжения.

Как следует из табл. 1 для температурного интервала эксплуатации хладоносителя выше плюс 2 °С предпочтение выгоднее отдать воде с ингибиторами коррозии.

В температурном интервале эксплуатации хладоносителя от плюс 2 °С до минус 20 °С оптимальными по совокупности свойств являются пропиленгликолевые и этиленгликолевые хладоносители.

Ниже минус 20°С выгодны хладоносители на формиатной (до минус 50 °С) и ацетатной (до минус 60 °С) основах.

Ниже минус 50 °С используются преимущественно вещества, приведенные в табл. 2.

В табл. 2 не вошли кремний органические соединения ($C_2H_6OSi_{(n)}$ полидиметилсилоксана, $C_{10}H_{30}O_3Si_4$ декаметилтетрасилоксан, $C_{12}H_{50}O_5Si_4$ додекаметилпентасилоксан), также имеющие низкую температуру начала кристаллизации, но сильно изменяющие свои свойства от молекулярного веса.

Таблица 2. Теплопередающие жидкости с низкими температурами начала кристаллообразования

| Формула | Название | $T_{пл}, ^\circ C$ | $T_{кип}, ^\circ C$ | $T_{всп}, ^\circ C$ | $T_{свпл}, ^\circ C$ |
|-------------------------------|------------------------|--------------------|---------------------|---------------------|----------------------|
| C_2H_5OH | этанол | -114,5 | 78,3 | 13 | 363 |
| C_3H_7OH | н-пропанол | -126,2 | 97 | 15 | 371 |
| $CH_3CH(OH)CH_2OH$ | 1,2-пропилен-гликоль | -60,0 | 188 | 107 | 421 |
| $CH_3CH_2CH_2CH_2OH$ | бутанол | -89,3 | 117 | 41 | 340 |
| $(CH_3)_2CHCH_2OH$ | изобутанол | -108,0 | 108 | 28 | 415 |
| $CH_3CH_2CH(CH_3)OH$ | втор-бутанол | -114,7 | 99,5 | 24 | 406 |
| $HOCH_2CH_2CH(OH)CH_3$ | 1,3-бутандиол | -77,0 | 204 | 121 | 324 |
| $CH_3CH(CH_2OH)_2$ | 2-метил-1,3-пропандиол | -54 | 212 | 127 | 380 |
| $(C_2H_5)_2CHCH_2OCH_2CH_2OH$ | 2-этилбутил-целлозольв | -90 | 196 | 87 | 280 |
| $C_4H_9OCH_2CH_2OH$ | бутилцеллозольв | -70 | 170 | 61-67 | 245 |
| $CH_3OCH_2CH_2OH$ | метилцеллозольв | -85 | 124 | 46 | 285 |
| $C_2H_5OCH_2CH_2OH$ | этилцеллозольв | -70 | 135 | 74 | 228 |
| $(CH_3)_2CHCH_2CH_2OH$ | изоамиловый спирт | -117 | 131 | 43 | 340 |

Методика оценки влияния хладоносителя на энергоэффективность, безопасность и срок эксплуатации системы холодоснабжения

Состав хладоносителя в начальный момент времени X_0 определяется формулой:

$$X_0 = C_A V_m + C_B V_m + C_Z V_m + C_D V_m,$$

где V_m – масса хладоносителя; C – концентрация веществ: A – молекула основного вещества; B – ингибитор коррозии; Z – примеси; D – присадки (пеногасящие, снижающие вязкость, комплексоны, стабилизаторы).

Экспериментальными исследованиями установлено, что изменение состава хладоносителя во времени носит сложный характер и вероятный состав хладоносителя в любой момент времени t определяется по формуле:

$X_t = X_0 \cdot K_{\text{риска}}(t) \cdot \Delta P : t$, где ΔP – вероятность изменения химического состава хладоносителя, является реализациями случайной величины, полученной методом Монте-Карло, t – время эксплуатации СХ с учетом регламентного обслуживания:

$t = k_t (1 - t_w/t_r)$, где k_t – эмпирический коэффициент, t_w – время эксплуатации СХ с ВК, t_r – время эксплуатации СХ с момента последнего ремонта.

Используя классическую теорию рисков и законы термодинамики рассчитаем $K_{\text{риска}}$ для определения зависимости изменения состава хладоносителя от времени эксплуатации: $K_{\text{риска}}(t) = f(K_{\text{эфф}}(t), K_{\text{стаб}}(t), K_{\text{оп}}(t))$,

где $K_{\text{эфф}}(t) = f(c, \mu, \lambda, \rho)$, где c – теплоемкость, μ – вязкость хладоносителя, λ – теплопроводность, ρ – плотность хладоносителя.

$K_{\text{стаб}}$ оценивается с учетом коррозионной активности (определяется контактной разностью потенциалов и энергией активации химических связей), химической активности и склонностью к деструкции (химическим потенциалом и определяется термостабильностью компонентов).

Физико-химическая опасность СХ с ВК ($K_{\text{оп}}$) определяется с учетом взрывоопасности, микробиологической опасности и пожароопасности (\dot{Y}), являющейся функцией независимых переменных:

$\dot{Y} = f(T_{\text{qr}}, T_{\text{б}}, T_{\text{А}}, T_{\text{Г}})$, где T_{qr} – температура воспламенения; $T_{\text{б}}$ – температура горения; $T_{\text{А}}$ – количество выделяемого тепла; $T_{\text{Г}}$ – участие кислорода.

Эмпирическим путем установлено, что: $K_{\text{риска}} < 0,3$ – эксплуатация СХ с ВК безопасна;

$0,3 \leq K_{\text{риска}} \leq 0,8$ – свидетельствует о необходимости проведения ремонтных работ на ВК и регенерации хладоносителя;

$K_{\text{риска}} > 0,8$ – эксплуатация СХ не рекомендуется в связи с высокой вероятностью аварийных ситуаций.

Влияние коррозионных процессов учтено при оценке энергоэффективности СХ с ВК через среднюю стоимость удельных затрат на отведение СХ с ВК теплоты (S):

Для количественной оценки энергоэффективности СХ с ВК предложено контролировать изменение расчетной и фактической средней стоимости энергозатрат отведенной СХ с ВК удельной теплоты (S), отнесенной ко времени эксплуатации СХ, с учетом изменения стабильности тепломассопереноса в ВК СХ и эксплуатационных затрат:

$$S(t) = \frac{\sum_{t=1}^i S(P_k, P_n, M_r, M_c, M_p)}{\sum_{t=1}^i P_{\text{КВГ}}} \quad (1),$$

где t – период времени эксплуатации СХ с ВК, разделяется на краткосрочный (3 года), среднесрочный (4 – 10 лет) и долгосрочный (10 – 30 лет) периоды эксплуатации; P_k – затраты на потребленную компрессорами СХ электроэнергию; P_n – затраты на потребленную циркуляционными насосами ВК электроэнергию (рассчитываются по известным формулам); M_r – затраты на ремонт (обслуживание) хладоносителя; M_c – непредвиденные затраты, связанные с работой СХ с ВК; M_p – расходы на обслуживающий персонал: стоимость содержания рабочего места, заработная плата, дополнительный штат на обслуживание рабочего места (определяется по фактическим затратам) и др.

Уравнение (1) представим как отношение суммы показателей удельных капитальных и эксплуатационных затрат к количеству теплоты, отобранного СХ с ВК от хладоносителя за время t:

$$S(t) = \frac{\frac{S_{\text{кап}}}{T_{\text{н.о.}}} + S_{\text{эксп}}(t)}{Q(t)} \quad (2),$$

где S_{кап} – капитальные затраты; T_{н.о.} – срок амортизации оборудования; S_{эксп} – эксплуатационные затраты; Q – количество теплоты, отобранного СХ с ВК от хладоносителя.

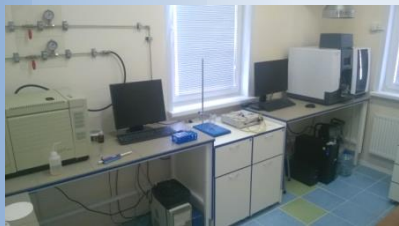
Уравнение (2) позволяет определить энергоэффективность хладоносителя для реальных СХ как функцию изменения фактических затрат на перенос теплоты относительно проектных затрат. Следовательно, уравнение хладоносителя, имеющего близкие к идеальным свойства, имеет вид:

$$\int_{t=0}^{\infty} S(t) \cdot dt = \lim_{t_i \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n S_t(P, M) \cdot \Delta t_k \quad (3),$$

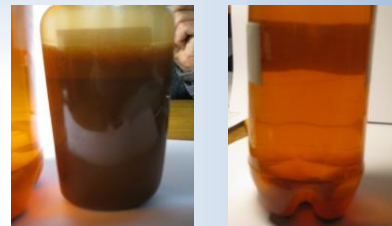
где: $\Delta t_k = \Delta t_i - \Delta t_{i-1}$.

На практике вследствие деградации свойств хладоносителей в процессе длительной эксплуатации энергопотребление СХ растет, а фактические значения S(t) реального потребления электроэнергии СХ превышают расчетные (проектные).

Разработаны технологии и составы для регенерации хладоносителей, в том числе без прерывания холодильной цепи предприятия



Для восстановления состава хладоносителя разработан алгоритм действий по восстановлению эффективности и безопасности системы холодоснабжения и определены способы корректировки и восстановления свойств действующих хладоносителей в процессе эксплуатации. На фотографии показан хладоноситель до и после регенерации на одном из заводов Хейнекен.



Разработаны методики мониторинга и биомониторинга

Обеспечивается стабильность, эффективность и безопасность разработанного хладоносителя мониторингом, отслеживающим изменение состава хладоносителя в процессе эксплуатации. Биомониторинг позволяет определять обсемененность хладоносителя и идентифицировать микроорганизмы.

Мониторинг проводится в созданной химмотологической лаборатории. На фотографии показаны рабочие места ААС и ГХ. Результаты мониторинга состава и свойств хладоносителя предоставляются потребителю в табличном или в графическом виде и включают раздел с рекомендациями мероприятий по обеспечению энергоэффективной работы холодильной системы.

| Показатель | Норма по ТУ 2422-015-11490846-08 | Фактические измерения показателей | | | | |
|---|----------------------------------|-----------------------------------|--------------|----------|----------|----------|
| | | 08.10.12 | 24.12.13 | 14.07.14 | 13.10.15 | 22.11.16 |
| Пропиленгликоль, % | | 24,1 | 24,9 | 25,6 | 26,3 | 31,7 |
| Этанол, % | | 0 | 1,7 | 1,7 | 1,6 | 1,45 |
| КПГ-ПК, % | 3-6 | 2,4 | 3,2 | 2,9 | 2,7 | 4,1 |
| $t_{\text{нач. крист.}}$, °C | -12 | -9 | -10,5 | -8 | -9,5 | -12 |
| pH | 8-10 | 7,8 | 8,0 | 8,2 | 7,7 | 8,0 |
| Плотность ₂₀ , г/см ³ | 1,025 | 1,029 | 1,030 | 1,030 | 1,031 | 1,035 |
| ρ_{20}^{20} | | 1,3655 | 1,3655 | 1,3665 | 1,3677 | 1,3700 |
| Устойчивость пены, с | 2 | >60 | 9 | 10 | 14 | 15 |
| Железо (Fe ²⁺ + Fe ³⁺), мг/л | 5,6 | 5,35 | 20,60 | 14,8 | 17,3 | 24,3 |
| Никель (Ni ²⁺), мг/л | 2,8 | 0,14 | <0,01 | 0,17 | 0,11 | 0,06 |
| Медь (Cu ²⁺), мг/л | 0,8 | 6,51 | 20,72 | 13,5 | 12,1 | 10,8 |

Текущие проекты и НИР

В развитие темы диссертации на кафедре «Холодильная и криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения» внедряется новая учебная дисциплина «Рабочие вещества в холодильной технике».

Изучаются свойства теплопередающих жидкостей, смазочных материалов и хладагентов. Рассматриваются их основные эксплуатационные свойства в зависимости от вида (марки). Изучаются физические химические, электро-химические и др. методы контроля свойств. В отдельный модуль выделены процессы, протекающие в теплообменных системах при эксплуатации. Под призмой молекулярно-кинетической теории выявляются и исследуются параметры, определяющие долговечность холодильных систем с учетом химической стойкости конструкционных металлов и неметаллических материалов в среде хладагента и хладоносителя.



На реальных примерах изучаются способы контроля и управления свойствами рабочих веществ и восстановления теплообменных характеристик систем холодоснабжения.

Для практического освоения дисциплины на кафедре «Холодильная и криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения» в 2017 году создана химмотологическая лаборатория, изданы лабораторные практикумы.

В лабораторный практикум «**Определение видов и свойств хладоносителей**» вошли четыре лабораторные работы по определению видов хладоносителей (по температуре кипения, начала кристаллизации, плотности и индексу преломления) и их основных эксплуатационных свойств, позволяющих спрогнозировать энергоэффективность, надежность и безопасность СХ с ВК.

Текущие проекты и НИР

Ожидаемый результат на уровне «уметь применять» достигается студентом на этапе комплексной обработки результатов, полученных разными методами, и позволяющих прояснить полную картину состояния и свойств исследуемого материала.

Цель практикума: научить студента основным критериальным оценкам энергоэффективности СХ с ВК, познакомить с типовым лабораторным оборудованием контроля эксплуатационных свойств хладоносителей, дать практические навыки работы с хладоносителем, показать взаимосвязь вида хладоносителя и концентрации основного компонента с энергоэффективностью и надежностью работы СХ с ВК.

Разрабатывается второй лабораторный практикум «**Оценка химической стойкости конструкционных материалов в среде хладоносителя**».

Цель практикума – научить студента основным приемам определения коррозионной стойкости и стабильности эксплуатационных свойств пар конструкционных металлических и неметаллических материалов СХ в среде ТПЖ, научить методам подбора ингибиторов коррозии и определения их эффективной концентрации, показать влияние состава рабочих жидкостей (масел и хладоносителей) на работу холодильной системы и последствия протечки хладагента в хладоноситель.

В рамках перспективных научных изысканий проводятся следующие работы:

- применение биотехнологий (направленного обсеменения) для модификации коррозионных и теплофизических свойств хладоносителей;
- исследование влияния направленного биозаражения хладоносителей на их реологические свойства;
- поиск новых ингибирующих композиций для обеспечения низкой скорости коррозии конструкционных материалов в среде хладоносителя с целью снижения материалоемкости холодильной системы;
- создание новых смесевых хладоносителей с допустимым интервалом температур эксплуатации от -110°C до $+400^{\circ}\text{C}$ с использованием в том числе веществ, приведенных в табл. 2. слайд 5.

