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

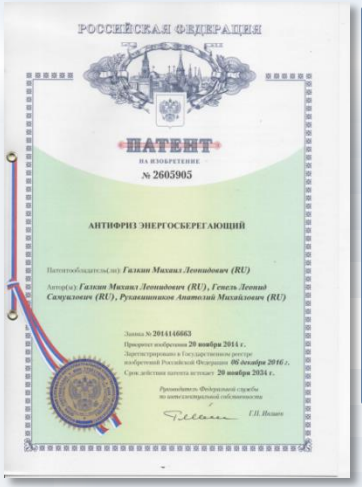
Снизить энергопотребление и повысить безопасность действующих и проектируемых промышленных систем холодоснабжения с вторичным контуром.

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 оборотного водоснабжения при напоре 20 метров. Температура хладоносителя на входе в испаритель составляет минус 10 °С, на выходе – минус 15 °С.


РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2605905

АНТИФРИЗ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЙ

Патентообладатель(ли): *Галкин Михаил Леонидович (RU)*

Автор(ы): *Галкин Михаил Леонидович (RU), Генель Леонид Самуилович (RU), Рукавишников Анатолий Михайлович (RU)*

Заявка № 2014146663

Приоритет изобретения **20 ноября 2014 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации **08 декабря 2016 г.**

Срок действия патента истекает **20 ноября 2034 г.**

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

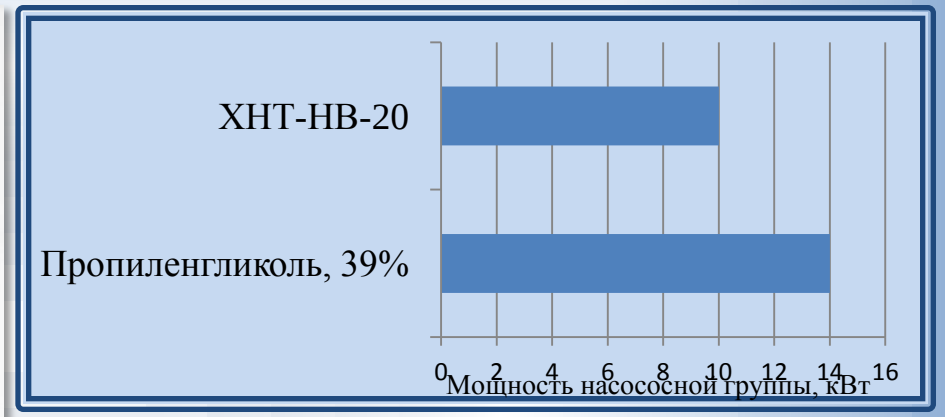


Рис. 1. *Мощность насосной группы, затраченной на перекачивание низковязкого хладоносителя ХНТ-НВ и водного раствора пропиленгликоля, необходимой для выработки 1000 кВт холода*

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		Органо-лептика	Пожаро-, взрыво-опасность	Тепло-физические свойства	Эконо-мичность	Токсич-ность
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 ºС предпочтение выгоднее отдать воде с ингибиторами коррозии.

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

Ниже минус 20ºС выгодны хладоносители на формиатной (до минус 50 ºС) и ацетатной (до минус 60 ºС) 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	$T_{пл}$, ºС	$T_{кип}$, ºС	$T_{всп}$, ºС	$T_{свпл}$, ºС
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:

$\mathbf{X_0 = C_A V_m + C_B V_m + C_Z V_m + C_D V_m}$,

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:

$\mathbf{X_t = X_0 \cdot K_{риска}(t) \cdot \Delta P : t}$, 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 $K_{риска}$ для определения зависимости изменения состава хладоносителя от времени эксплуатации: $\mathbf{K_{риска}(t) = f(K_{эфф}(t), K_{стаб}(t), K_{оп}(t))}$,

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

$\mathbf{K_{стаб}}$ 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 ($K_{оп}$) определяется с учетом взрывоопасности, микробиологической опасности и пожароопасности (Ÿ), являющейся функцией независимых переменных:

$\mathbf{Ÿ = f(T_q, T_{ō}, T_{Ȧ}, T_{ȳ})}$, где $\mathbf{T_q}$ - температура воспламенения; $\mathbf{T_{ō}}$ - температура горения; $\mathbf{T_{Ȧ}}$ - количество выделяемого тепла; $\mathbf{T_{ȳ}}$ - участие кислорода.

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

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

$\mathbf{K_{риска} > 0{,}8}$ – 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:

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

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*:

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

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:

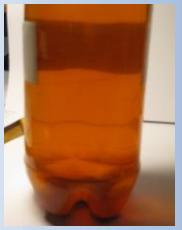
$$\int_{t=0}^{\infty} S(t) \cdot dt = \lim_{t_i \to \infty} \sum_{i=1}^{n} S_t(P, M) \cdot \Delta t_k \qquad (3),$$

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
$t_{нач.крист.}$, °С	-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
n_D^{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

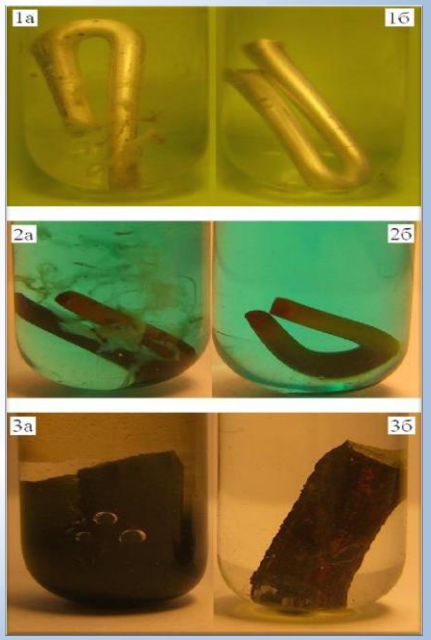
В развитие темы диссертации на кафедре «Холодильная и криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения» внедряется новая учебная дисциплина «Рабочие вещества в холодильной технике».
Изучаются свойства теплопередающих жидкостей, смазочных материалов и хладагентов.
Рассматриваются их основные 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°С до + 400°С с использованием в том числе веществ, приведенных в табл. 2. слайд 5.