Конкурсная работа

Авторы: Р.А. Сайфутдинов, Д.Р. Девлеканов.

Название работы: Мобильная система захолаживания авиационного топлива.

Цель работы: Конструкторские и экспериментальные работы по созданию мобильной системы захолаживания авиационного топлива в обеспечение проведения испытаний перспективных авиационных двигателей и изделий в особых климатических условиях на испытательных стендах ЦИАМ.

Описание работы: Мобильная система захолаживания топлива (МСЗТ) является уникальной установкой по захолаживанию авиационного топлива и предназначена для проведения климатических испытаний авиационных двигателей и их узлов на холодном топливе.

Технологические возможности мобильной системы захолаживания топлива позволяют охладить авиационное топливо (различных марок) и другие жидкости до низких температур, перед поступлением в топливную систему существующих ГТД и перспективных авиационных двигателей (АД). Данная система обеспечивает комплексное проведение климатических испытаний в условиях применения летательных аппаратов в Арктике и низких температур (Высокогорный и полярный аэродромы, высотные запуск и работа изделия).

Конструктивно агрегат (представлен на рисунке 1) по захолаживанию топлива содержит две емкости объемом по 0,75м^3 (расходный-1 и охлаждающий-2), теплоизолированный кожух, теплоизолированные трубопроводы обвязки и запорную арматуру, датчики температуры, давления и расхода, а также циркуляционный топливный насос. Все узлы смонтированы на общей раме, оснащенной колесами для буксировки по территории испытательной площадки с целью обеспечения выполнения испытаний топливных систем АД на различных стендах.

Процесс захолаживания топлива – принудительный, с помощью циркуляционного насоса может осуществляться по малому циклу в начальной стадии и по большому циклу (включая элементы стендовой топливной системы) на завершающей стадии захолаживания (непосредственно перед началом испытаний). В процессе захолаживания давление в обеих емкостях атмосферное. В качестве хладагента был выбран экономичный способ охлаждения – твердая углекислота CO_2, а в качестве теплоносителя этиловый спирт C_2H_5OH. Основные расчетные характеристики системы захолаживания топлива приведены в таблице 1.

Таблица 1- Расчетно-конструкторские характеристики системы захолаживания топлива.

п./п.	Параметр	Значение
1.	Температура топлива на выходе из агрегата (Тт.)	-55 °С
2.	Запас топлива	500 л
3.	Вместимость хладагента (твердый CO_2)	105 кг

4.	Объем теплоносителя (C_2H_5OH)	405 л
5.	Производительность циркуляционного насоса	0,5 л/с
6.	Масса агрегата (сухая)	1800 кг
7.	Время захолаживания до температуры топлива -55°С	≤12ч. (При Тт.нач.≤20°С)

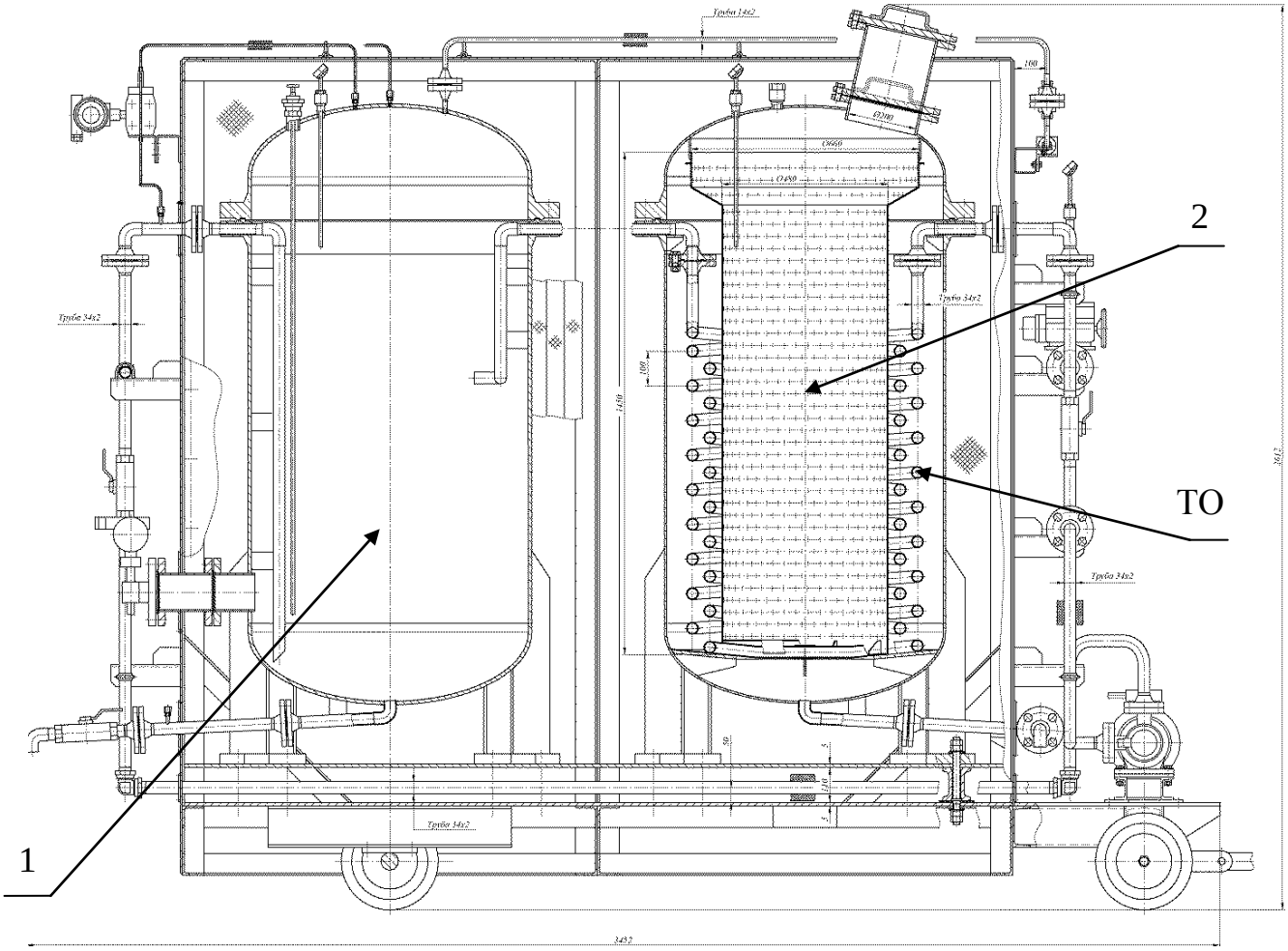

Рисунок 1 – Агрегат захолаживания топлива.

Описание принципа работы:

Топливо закачивается от заправщика в необходимом объеме и хранится в расходном резервуаре – 1. Охлаждающий резервуар – 2 содержит емкость с перфорированными стенками и теплообменником – ТО и соединён с расходным резервуаром через теплоизолированный трубопровод. Охлаждающий резервуар заполняется на ¾ теплоносителем (C_2H_5OH). После чего в резервуар добавляется хладагент – твердая углекислота (CO_2) для снижения температуры теплоносителя. Углекислота испаряется, отбирая тепло на испарение от теплоносителя, обеспечивая низкую температуру в охлаждающем резервуаре. С помощью циркуляционного насоса топливо забирается из расходного резервуара, прокачивается через ТО и охлажденное топливо сливается обратно. Передача тепла от теплоносителя к твердой углекислоте

осуществляется конвективным перемешиванием. В результате чего образующийся углекислый газ сбрасывается из охлаждающего резервуара в систему вентиляции агрегата. Температура плавления твердой углекислоты (минус 78°С) не превосходит температуру застывания теплоносителя (минус 114°С) и превосходит температуру застывания топлива (≈ минус 60°С). Поэтому, изменяя массовое содержание хладагента в теплоносителе, можно охладить топливо вплоть до застывания. В процессе захолаживания топлива температуры в расходном резервуаре и в охлаждающем начинают выравниваться.

Управление процессом захолаживания топлива осуществляется со стационарного пульта управления, закрепленного на раме установки. На пульте располагаются как элементы электросхем управления работой агрегата, так и измерительные приборы, контролирующие параметры топлива в процессе его захолаживания.

При достижении необходимой температуры топлива в расходном резервуаре и выравнивании температур в обеих емкостях, равномерным добавлением малого количества твердой углекислоты необходимо поддерживать постоянную температуру топлива до подачи его к изделию при проведении испытаний на охлаждённом топливе (по малому циклу).

После достижения необходимой температуры топлива в расходном резервуаре и захолаживания подающих трубопроводов и топливной системы стенда (по большому циклу), расходный резервуар надувается газообразным азотом до давления не выше 10 кгс/см^2, и система готова к использованию. Охлажденное топливо вытесняется давлением азота из расходного резервуара на вход топливной системы АД. От разрушения избыточным давлением расходный бак защищен предохранительным клапаном.

При отработке технологии захолаживания топлива мобильной установкой был выявлен ряд особенностей, которые необходимо учитывать при проведении испытаний АД на охлаждённом топливе. При загрузке твердой углекислоты в емкость захолаживания со спиртом происходит бурная реакция по выделению газообразной углекислоты с образованием большого количества пены и повышение уровня теплоносителя (спирта). Для предотвращения выплескивания и безвозвратной потери теплоносителя, твердую углекислоту необходимо загружать в охлаждающую емкость равномерно малыми порциями по 25 кг три раза в час, но крупными кусками для уменьшения поверхности соприкосновения сухого льда со спиртом.

Перед подачей холодного топлива к объекту испытания необходимо остановить перекачивающий насос, что может привести к замерзанию топлива в змеевике охладителя, что в свою очередь сделает невозможным возобновление процесса захолаживания топлива с повысившейся температурой из-за задержки запуска. Чтобы этого не произошло, необходимо перед остановкой перекачивающего насоса удалить все остатки твердой углекислоты из емкости захолаживания.

На рисунке 2 показана расчетная кривая (Тр) снижения температуры топлива в расходной емкости. При изначально выбранном циркуляционном насосе (с производительностью 0,5 л/с) время охлаждения до температуры -55°С составляет не более 12 часов.[1]

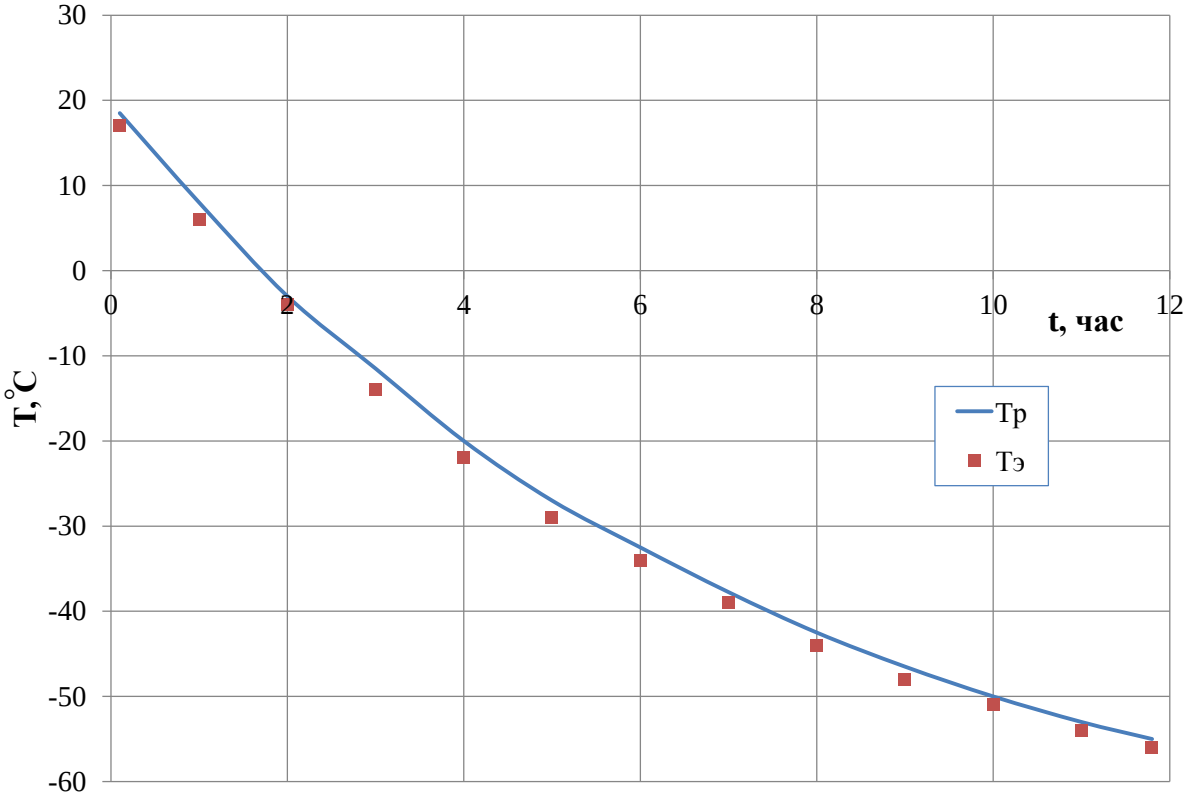

Рисунок 2 – Расчетная кривая охлаждения полного запаса топлива (500л).

Для подтверждения конструкторских проработок были проведены эксперименты с целью оптимизации процесса эксплуатации МСЗТ на различных режимах захолаживания топлива и разработки методики.

Экспериментальная технология работы на установке по захолаживанию топлива согласно принципиальной гидравлической схеме (см. рисунок 3):

1. Открыть шаровые краны поз.1, 2, 12 и произвести заправку от топливозаправщика в расходную емкость для хранения топлива в количестве 500л (давление 2÷3 ата), количество топлива в емкости контролировать по датчику уровня поз. 22. Краны 3, 4, 8, 9, 10, 11 закрыты.

2. После заправки топливом шаровые краны поз. 2, 12 закрыть, снять давление топлива на топливозаправщике и отсоединить заправочный шланг.

3. Залить во вторую емкость – охлаждающий резервуар 400 литров теплоносителя.

4. Открыть шаровые краны поз. 3, 4 и запустить циркуляционный насос поз. 14; циркуляцию топлива контролировать по расходомеру (ТПР-13) поз. 23. Краны 1, 2, 8, 9, 10, 11, 12 закрыты.

5. Загрузить небольшое количество твердой углекислоты ≈ 25кг через люк загрузки хладагента в охлаждающую емкость кусками ≈100х100мм. Производить загрузку хладагента равными порциями по 25кг, не допускать выбросов пены и спирта из емкости.

6. Засечь время начала процесса захолаживания топлива, включить регистрирующую аппаратуру.

7. Контролировать процесс захолаживания топлива по температурам: t15р – теплоноситель; t21 – выход топлива из насоса; t15т – топливо в емкости для хранения. Разница между температурами сред в обеих емкостях должна составлять не более 5…7 °С.

8. При увеличении разницы температур в емкостях произвести добавку хладагента согласно пункту 5.

9. При достижении температуры топлива минус 55°С прекратить подачу хладагента крупными кусками и сделать отсечку времени окончания процесса захолаживания.

10. Добавлением малого количества твердой углекислоты (кусками ≈30х30мм.) в охлаждающую емкость, поддерживать постоянную температуру Тт=const (при переохлаждении топлива добавку твердой углекислоты прекратить, при нагреве добавлять твердую углекислоту мелкими порциями) в течении 30 минут.

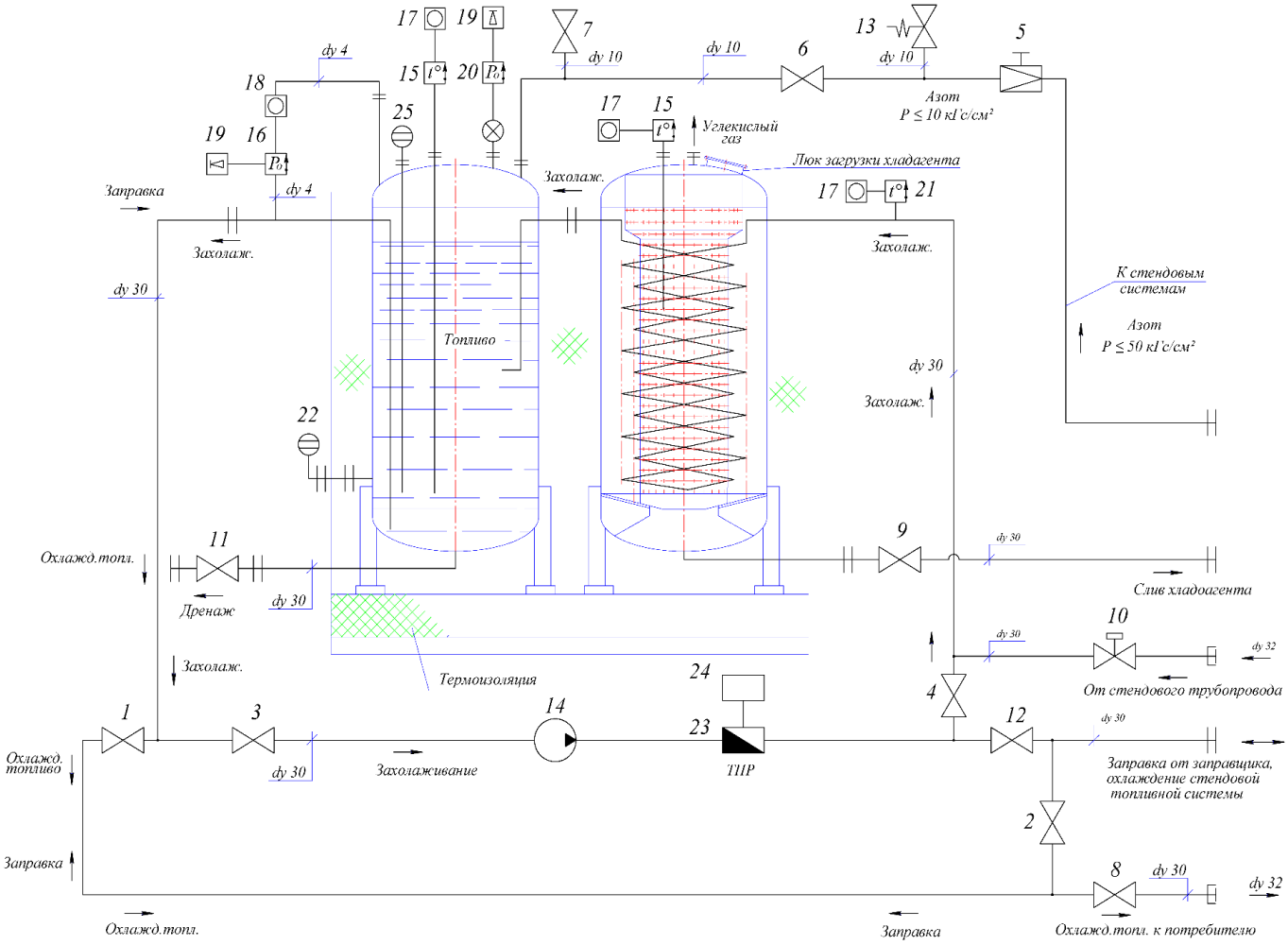

Рисунок 3 – Принципиальная гидравлическая схема.

Рисунок 4 – Созданная мобильная установка для захолаживания топлива.

При проведении эксперимента по захолаживанию топлива удалось охладить 500 литров керосина с температурой плюс 17^0С до температуры минус 55^0С в 4 раза быстрее вместо планируемых 12 часов, диаграмма приведена на рисунке 5. Такой результат был получен благодаря правильному выбору количества загружаемого хладагента и времени его добавления в охлаждающий резервуар и замене изначально выбранного циркуляционного насоса на более производительный. В процессе эксперимента из агрегата захолаживания происходил переодический сброс углекислого газа и паров спирта в пределах нормативов ПДК.

Таблица 2- Экспериментальные технические характеристики системы захолаживания топлива.

п./п.	Параметр	Значение
1.	Применяемое авиационное топливо	керосин ТС-1
2.	Температура топлива (достигнутая) на выходе из агрегата (Тт.)	-58 °С
3.	Запас топлива	500 л
4.	Масса израсходованного хладагента (твердая CO_2)	350 кг
5.	Объем теплоносителя (C_2H_5OH)	400 л

6.	Производительность циркуляционного насоса	1,0 л/с
7.	Время захолаживания до температуры топлива -55°С	≤4 ч. (При Тт.нач.≤17°С)

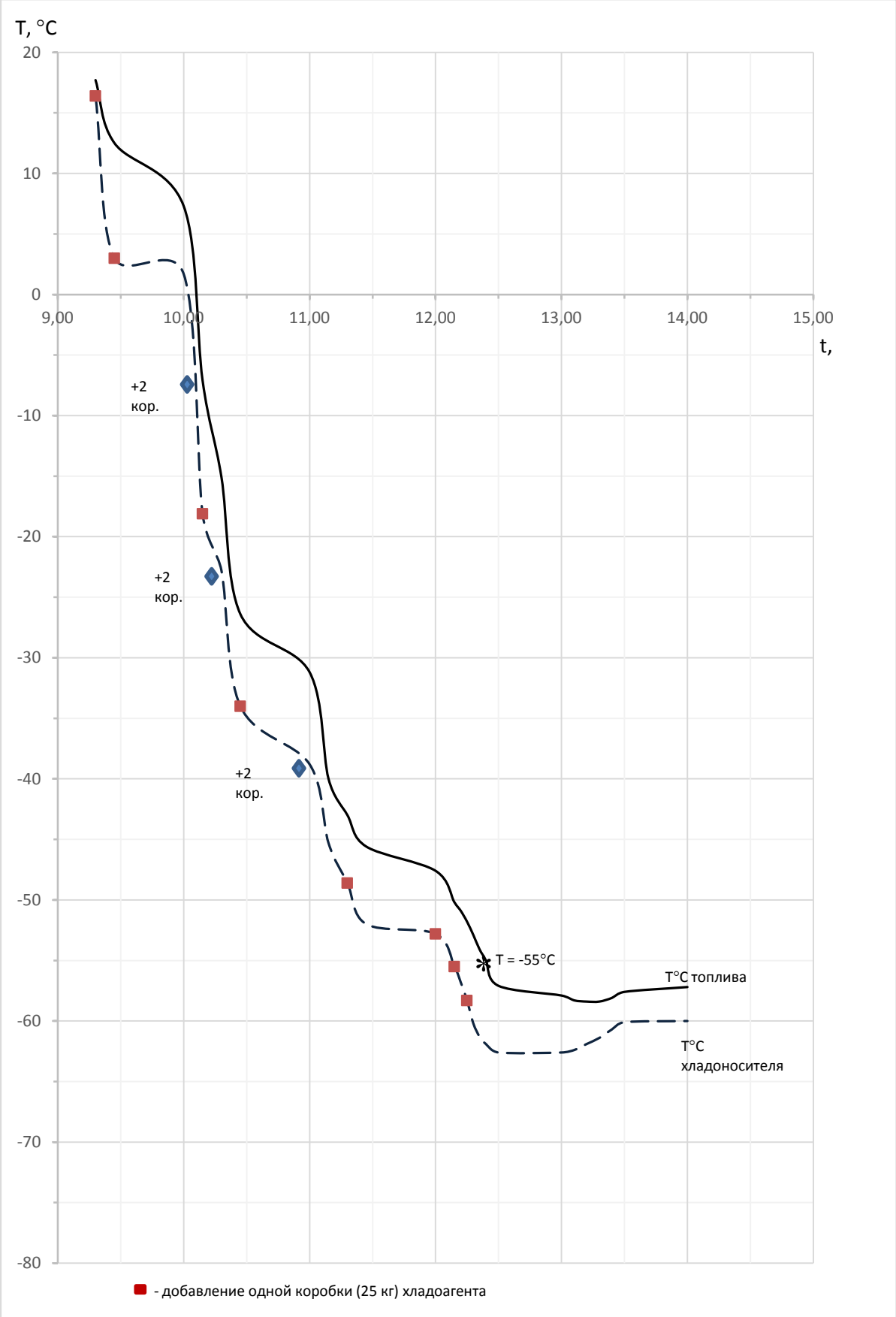

Рисунок 5 - Диаграмма эксперимента по захолаживанию топлива.

Преимущества и инновационность мобильной системы захолаживания топлива перед похожими устройствами и системами:

1. Криостат, см. Н.В. Филин и др. Жидкостные криогенные системы, Ленинград, Машиностроение, 1985 г., с.198, рис. 6. Устройство может выполнять только часть функций, необходимых для проведения климатических испытаний авиадвигателя и его узлов. Не может подавать захоложенное топливо с заданными параметрами к объекту испытаний.

2. Криостат, АС СССР № 554454, рис. 7. Стационарное устройство может выполнять только часть функций, необходимых для проведения климатических испытаний авиадвигателя и его узлов. Не может подавать захоложенное топливо с заданными параметрами к объекту испытаний.

3. Емкость для криогенных жидкостей АС СССР № 425027, рис. 8. Стационарное устройство может выполнять только часть функций, необходимых для проведения климатических испытаний. Не может подавать захоложенное топливо с заданными параметрами к объекту испытаний. В процессе работы происходит перемешивание топлива и хладагента, что недопустимо при испытании авиадвигателя и его узлов.

4. «Инновационная модель применения жидкого азота для охлаждения ракетного топлива в емкостях заправочных систем наземных комплексов» УДК 629.7.085:629.764.7 DOI: 10.18698/0236-3941-2017-3-4-17, МГТУ им. Н.Э. Баумана, рис. 9. Стационарное устройство имеет большие габариты, рассчитано на очень большие объемы топлива вследствие чего не подходит для проведения климатических испытаний авиадвигателя и его узлов и экономически нецелесообразно. Использует жидкий азот в качестве одного из компонентов хладагента, что приводит к усложнению конструкции установки.

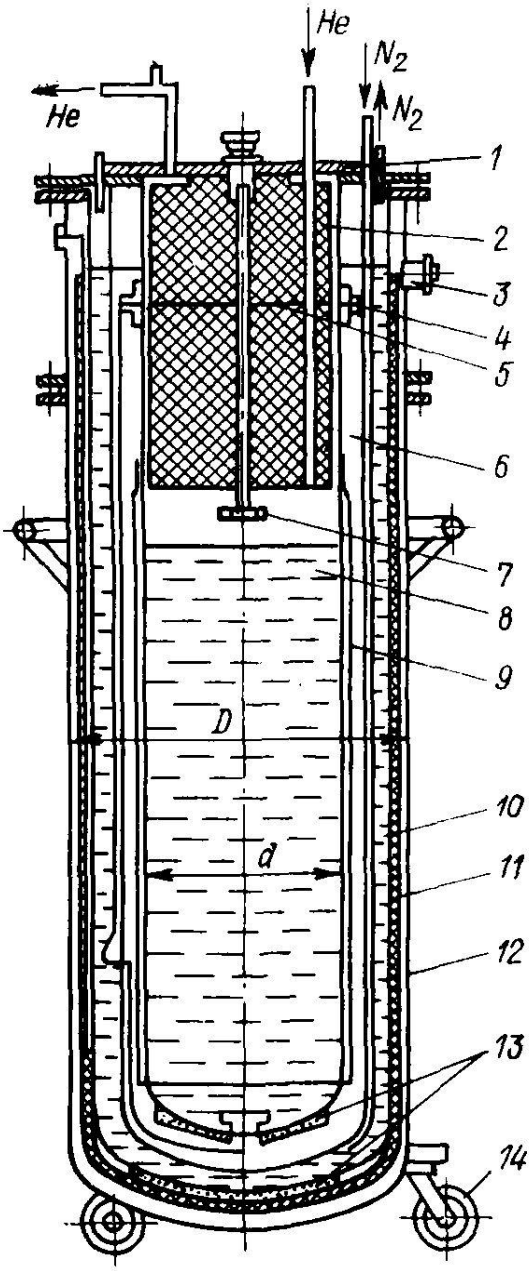

Рис. 6 Конструктивная схема гелиевого криостата КГ-15/150-1:

1 — крышка; *2* — пенопластовая пробка; *3* — клапан вакуумирования; *4* — разрезное кольцо; *5* — медный экран; *6* — вакуумный кожух гелиевого сосуда; *7* — фланец; *8* — гелиевый сосуд; *9* — экран; *10* — азотный сосуд; *11* — вакуумно-многослойная изоляция; *12* — кожух; *13* — камера адсорбента; *14* — колесо

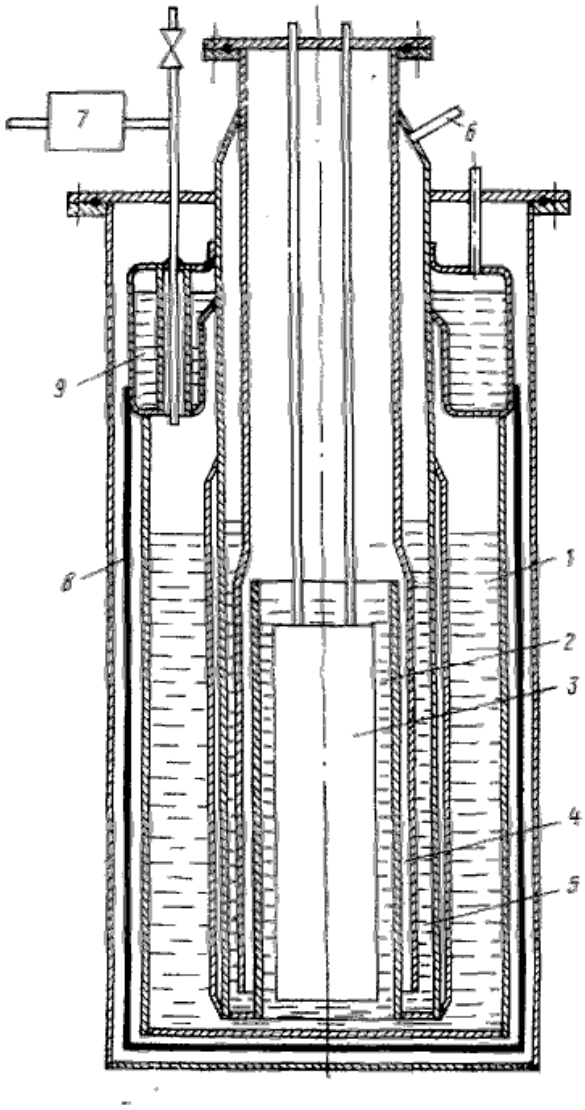

Рис. 7 Криостат:

1 — внутренняя емкость для хладагента; 2 —камера для охлаждаемого объекта; 3 — охлаждаемый объект; 4 — оболочка; 5 — оболочка с теплоизоляцией; 6 — патрубок сообщения с атмосферой; 7 — регулятор давления; 8 — радиационный экран; 9 — полость для хладагента с промежуточной температурой.

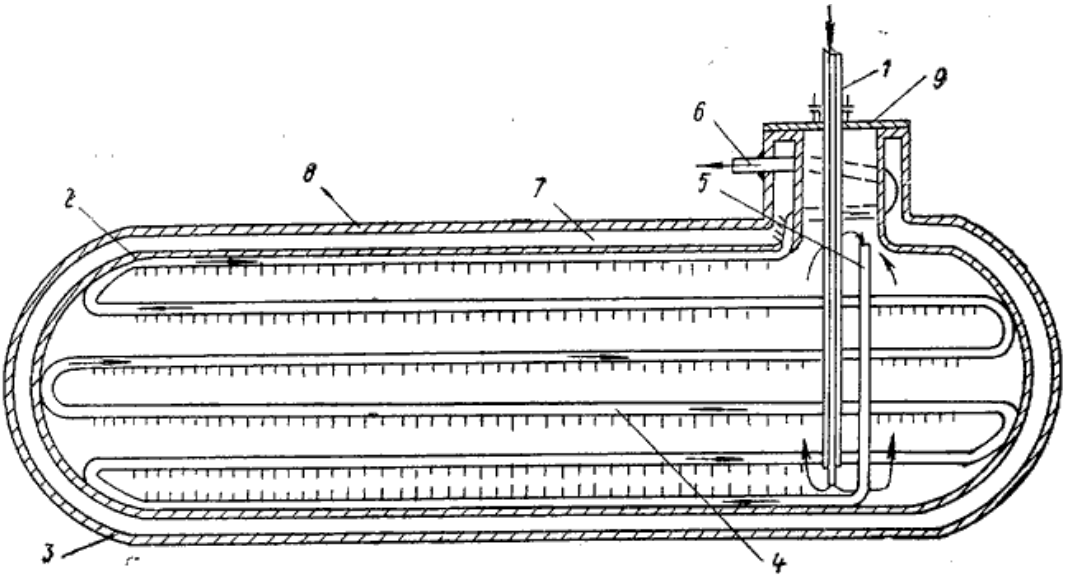

Рис. 8 Емкость для криогенных жидкостей:
1 — заправочная труба; 2 — внутренний сосуд; 3 — емкость; 4 — змеевик; 5 — входной конец змеевика; 6 — выходной конец змеевика; 7 — вакуумная изоляция; 8 — наружный сосуд; 9 — крышка.

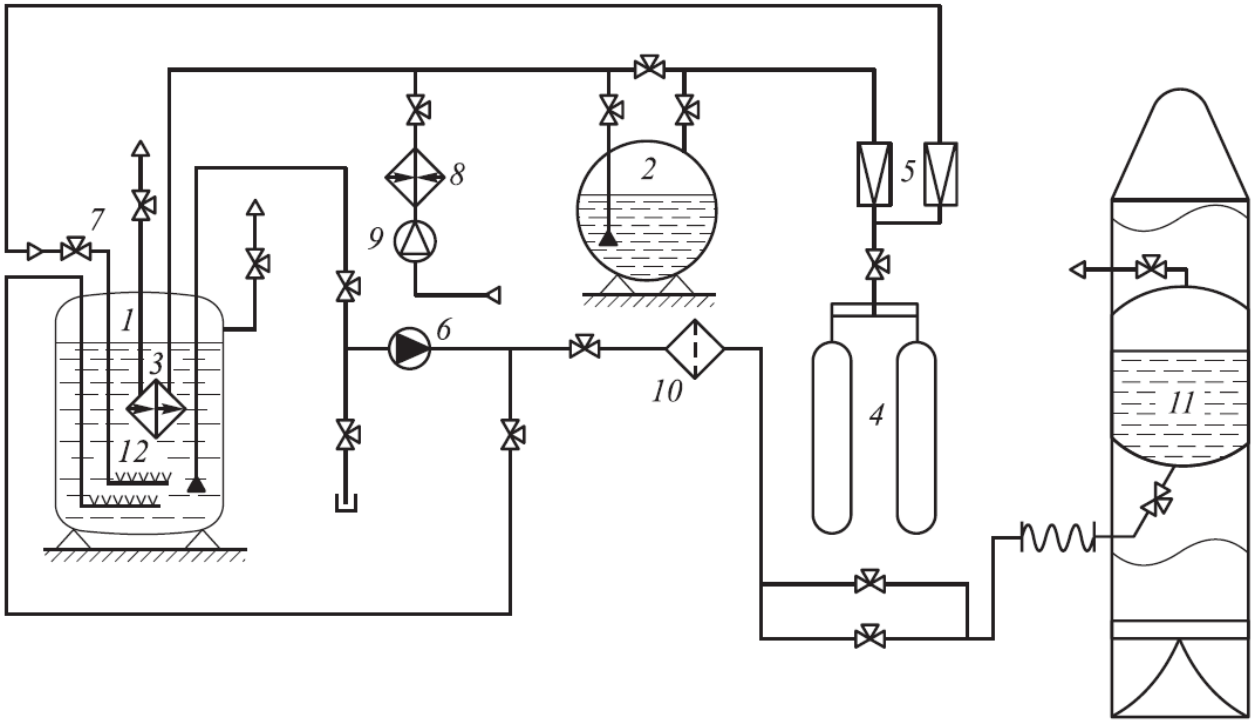

Рис. 9 Технологическая схема охлаждения (нагрева) ракетного топлива во внутреннем пространстве емкости системы заправки наземного комплекса:
1 — ёмкость-хранилище ракетного топлива, 2 — емкость-хранилище жидкого азота; 3 — теплообменник охлаждения (нагрева) ракетного топлива; 4 — хранилище газообразного азота высокого давления; 5 — газовый редуктор; 6 — насосная станция; 7 — запорная арматура; 8 — воздухонагреватель; 9 — компрессор; 10 — фильтр; 11 — топливный бак; 12 — барботер газообразного азота.

Выводы:

1. Разработана, создана и опробована уникальная мобильная система захолаживания авиационного топлива (ТС-1), которая позволяет проведение сертификационных и инженерных испытаний (ранее не возможных) в особых климатических условиях Арктики (при Тт. ≥ минус 55°С) существующих ГТД и перспективных авиационных двигателей, а также обеспечивает научно-технический задел для исследований работы авиационных узлов и агрегатов на холодном топливе.

2. Создана оригинальная конструкция установки захолаживания топлива, позволяющая с минимальными затратами обеспечить проведение комплексных испытаний АД, что позволяет провести испытания согласно современным требованиям заказчика. При этом химический и фракционный состав топлива в процессе захолаживания остаются неизменными (т.к. топливо не имеет непосредственного контакта с хладагентом), что повышает достоверность результатов испытаний. Разработана конструкторская и технологическая документация для производства мобильной установки.

3. Экспериментально доказаны надежность и эффективность работы системы захолаживания. Уточнена методика проведения процесса захолаживания авиационного керосина. Удалось охладить 500 литров керосина с температурой плюс 17^0С до температуры минус 55^0С в 4 раза быстрее запланированного времени и поддерживать данную температуру в течении 60 минут, необходимого для подготовки и запуска изделия.

4. Уникальность установки заключается в её мобильности, возможности доставки к любому испытательному стенду, что позволяет снизить затраты времени на подготовку к испытаниям, отказаться от прокладки систем управления и контроля технологических параметров на каждом стенде, длинных теплоизолированных топливных магистралей, которые необходимо охлаждать перед проведением испытания.

5. Обеспечена низкая стоимость изготовления мобильной системы захолаживания топлива (включая агрегат и подводящие трубопроводы) за счет применения в конструкции серийно выпускаемых приборов, арматуры, материалов и расходных компонентов. При этом требуются минимальные затраты по эксплуатации и обслуживании установки захолаживания.

6. Установка соответствует требованиям экологичности при соблюдении технологии проведения испытаний и правил безопасности эксплуатации.

Список литературы

1. Михеев М.А., Михеева И.М.. «Основы теплопередачи». М. «Энергия», 1973. 320 с. с ил.;
2. Бажан П.И., Каневец Г.Е., Селиверстов В.М. «Справочник по теплообменным аппаратам». — М.: Машиностроение, 1989. — 200 с: ил.