ОТЧЕТ

по Программе ОНЗ РАН № 12

Тема № 4 “Лабораторное моделирование работы охлаждающих систем и прогноз инженерно –геокриологических условий геофизическими методами для обеспечения рационального природопользования в криолоитозоне”, 2012 - 2014 г.г.

1. Формулировка результатов исследований.

1.1. Целью исследований по данной теме (в части охлаждающих устройств) является повышение эффективности работы двухфазных естественно-конвективных охлаждающих устройств различной конструкции для термостабилизации мерзлых грунтов оснований сооружений в районах распространения многолетнемерзлых грунтов.

1.2. Задачи исследований:

- установление причин неустойчивой работы прямоточного двухфазного естественно – конвективного устройства с горизонтальным испарителем (система ГЕТ) при малых тепловых нагрузках на испарителе (2012 г.);
- оценка эффективности работы модифицированной конструкции системы ВЕТ, включающей дополнительный патрубок в нижней части устройства, превращающий трубы испарителя в систему сообщающихся сосудов (2013 г.);
- испытание модифицированной конструкции охлаждающего устройства с горизонтальным испарителем, обеспечивающей устойчивость ее работы (2014 г.).

1.3 Краткая аннотация.

1. Создана лабораторная модель охлаждающей системы с горизонтальным испарителем, которая является конструктивным аналогом применяемой в настоящее время в строительстве на мерзлых грунтах охлаждающей системы ГЕТ. Все основные элементы испарителя модели выполнены прозрачными для визуализации гидродинамики потоков

хладагента внутри устройства. Система измерений и наблюдений за процессами тепломассообмена в системе включает: электронный вакуумметр для измерения давления насыщающих паров хладагента внутри устройства; комплекс электроизмерительных датчиков температуры, установленных как на конденсаторе, так и вдоль всей длины испарителя устройства; систему автоматического сбора, передачи и хранения текущих показаний датчиков на компьютере лабораторного стенда. В процессе проведения экспериментов производилась видеозапись и фотографирование наиболее важных и интересных моментов циркуляции хладагента и данных автоматической регистрации. Лабораторное исследование работы модели (при тепловых нагрузках, близких к натурным условиям применения устройства) показало, что вопреки имеющимся умозрительным представлениям о строгой однонаправленности движения обеих фаз хладагента в рассматриваемой конструкции устройства на участке входа трубки испарителя в конденсатор всегда имеет место противоток жидкой и паровой фаз (пар движется в сторону конденсатора, а жидкость скатывается обратно в испаритель). Этот факт многократно зафиксирован фото и видео съемкой процесса. Он может иметь принципиальное значение для работоспособности устройства поскольку известно, что для противоточных систем при определенных внешних условиях возникает так называемый “кризис захлебывания”, приводящий к резкому повышению сопротивления движению хладагента, прекращению его циркуляции и запиранию системы (см., например, *Г. Уоллис, Одномерные двухфазные течения, М., Мир, 1972)*.

2. Создана модифицированная лабораторная модель охлаждающей системы ВЕТ, включающая дополнительный патрубок в нижней части устройства и превращающий отдельные трубки испарителя в систему сообщающихся сосудов. Все основные охлаждающие элементы модели выполнены прозрачными для визуализации гидродинамики потоков хладагента внутри устройства. Система измерений и наблюдений за процессами тепломассообмена в системе включает: электронный вакуумметр

для измерения давления насыщающих паров хладагента внутри устройства; комплекс электроизмерительных датчиков температуры, установленных как на конденсаторе, так и вдоль всей длины испарительных элементов устройства; систему автоматического сбора, передачи и хранения текущих показаний датчиков на компьютере лабораторного стенда. В процессе проведения экспериментов производилась видеозапись и фотографирование наиболее важных и интересных моментов циркуляции хладагента и данных автоматической регистрации. Лабораторное исследование работы модели показало высокую степень устойчивости циркуляции хладагента и достаточную эффективность охлаждения. Система сообщающихся сосудов исключает неконтролируемое переполнение или недостаточное заполнение отдельных трубок (охлаждающих элементов) устройства конденсатом в процессе его работы, что является причиной неустойчивой работы применяемого в настоящее время в промышленности не модифицированного аналога устройства. Совместно с институтом ТюмеНИИГипрогаз разработан способ погружения модифицированной конструкции устройства в грунт с охватом устья добывающей скважины для термостабилизации мерзлых грунтов приустьевой зоны.

3. Лабораторными исследованиями показано, что причиной неустойчивой работы охлаждающего устройства с горизонтальным испарителем является пробка конденсата, образующаяся на участке противотока фаз хладагента (см. Этап 2012 г.) Положение этой пробки имеет четкую пространственную локализацию: на участке выхода потока хладагента из испарителя и входа его в конденсатор. Существование этой пробки является как причиной невозможности самопроизвольного запуска устройства в ряде случаев, так и причиной его неустойчивой работы. При этом при достаточно низкой температуре конденсатора запуск системы может быть осуществлен искусственно (с обеспечением процесса устойчивой циркуляции хладагента) путем применения специальных мероприятий,

разработанных в процессе исследования модели устройства в лабораторных условиях.

Для обеспечения надежного запуска циркуляции хладагента в конструкцию прямоточного естественно-конвективного устройства с горизонтальным испарителем включена система автоматического управления запуском. Система управления включает в себя совокупность электромагнитных датчиков для измерения внутренних параметров устройства и параметров окружающей его внешней среды, анализатор сигналов датчиков и двухпозиционный (закрыто – открыто) электромагнитный клапан, срабатывающий от внешнего (управляющего) электрического сигнала, который вырабатывается анализатором на основе заложенного в его память критерия, сформулированного на основе результатов лабораторных исследований работы устройства. Клапан врезают в трубку испарителя несколько ниже того отрезка, на котором происходит образование запирающей пробки. В качестве датчиков, характеризующих состояние внешней среды, достаточно иметь датчик температуры, размещаемый на некотором удалении от конденсатора. Датчики внутреннего состояния могут измерять температуру и давление внутри отдельных частей устройства, а также уровень конденсата в конденсаторе.

Элементы системы запуска размещены в различных частях устройства.

При включении в конструкцию охлаждающего устройства системы автоматического запуска работа устройства является устойчивой в высокой степени.

1.4 Развернутый отчет.

1. Исследование охлаждающей системы с горизонтальным испарителем (2012, 2014 г.г.).

Применяемые сегодня при строительстве на мерзлых грунтах горизонтальные системы охлаждения имеют длину испарителя свыше 200 м при отношении его длины к диаметру превышающем значение 10000. Вместе

с тем, исследования эффективности работы таких систем практически отсутствуют в литературе. Подтвердить эффективность работы систем могли бы мониторинговые исследования их натурных образцов, которые использованы при строительстве ряда сооружений. Однако в настоящее время данные таких наблюдений, удовлетворяющие необходимым критериям (по разделению влияния различных факторов, наличию контрольных температурных скважин и т.д.) отсутствуют.

В силу весьма значительных размеров подобных систем и связанной с этим высокой стоимостью проведения исследований на натурных образцах изучение работы таких систем проводится на их моделях в лабораторных условиях.

Ранее было проведено исследование работы лабораторной модели двухфазного естестественно-конвективного охлаждающего устройства с горизонтальным испарителем (схема – Рис.1), натурный аналог которого (система ГЕТ) применяется для охлаждения насыпных оснований некоторых типов инженерных сооружений в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов. Была отмечена высокая степень неустойчивости работы устройства, вплоть до полного прекращения его работы (*Горелик Я.Б., Горелик Р.Я. Лабораторное исследование работы двухфазного естественно-конвективного устройства с горизонтальной испарительной частью// Криосфера Земли, 2011, т. XV, № 2, с. 34 – 43*). Причину этого явления на этой стадии работы выяснить не удалось, что стимулировало дальнейшее исследование в этом направлении. При выполнении работ по этапу 2013 года принципиальная схема лабораторной модели осталась неизменной, но для более полной визуализации процессов течения фаз хладагента испаритель по всей длине выполнен из прозрачных стеклянных трубок внутренним диаметром 10 мм и общей длиной от 7 до 14 м (для различных вариантов исследования). Конденсатор размещен внутри крупногабаритной холодильной камеры (без изменения его конструкции). Лабораторная модель снабжена температурными датчиками для измерения температуры на

конденсаторе и вдоль всей длины испарителя, вакуумметром для определения давления насыщающих паров хладагента, форвакуумным насосом для предварительного вакуумирования системы. Электронный блок автоматической регистрации показаний датчиков позволяет производить непрерывную запись температуры и давлений в элементах устройства.

Эксперименты производились при температуре внутри холодильной камеры минус 12 – 13^0 С и при температуре в лабораторном помещении – плюс 25 – 30^0 С. Было проведено свыше 60 экспериментов средней продолжительностью около 3-4 часов каждый. В процессе проведения экспериментов производилось фотографирование и видеозапись наиболее важных и интересных моментов циркуляции хладагента и данных автоматической регистрации. Общая продолжительность видеозаписи составляет около 10 часов.

В описываемом цикле исследований подтвердились полученные ранее основные результаты: а) неустойчивость работы устройства как на этапе его запуска, так и при увеличении длины испарителя; б) при устойчивой работе устройства (которое достигается эмпирическим подбором изменения пространственного положения его отдельных частей) наблюдается снижение охлаждающего эффекта при увеличении длины испарителя (Рис. 2 и 3); в) при гидродинамическом запирании системы охлаждающий эффект исчезает (несмотря на низкую температуру конденсатора – Рис.4). При этом практически весь конденсат собирается (и зависает) в конденсаторе, что можно установить по мерной трубке (Фото - Рис. 5), а испаритель оказывается свободным от конденсата. В итоге под влиянием высокого давления в испарителе системы, где температура и, соответственно, давление насыщающих паров выше, чем в конденсаторе, весь конденсат собирается в конденсаторе и “зависает” в нем без возможности стока в испаритель - система запирается.

Визуальные наблюдения за процессом течения фаз хладагента показало, что вопреки имеющимся умозрительным представлениям о строгой однонаправленности движения обеих фаз хладагента в рассматриваемой конструкции устройства в диапазоне тепловых нагрузок менее 30 Вт/м на участке входа трубки испарителя в конденсатор всегда имеет место противоток жидкой и паровой фаз (пар движется в сторону конденсатора, а жидкость скатывается обратно в испаритель, схема – Рис. 6).

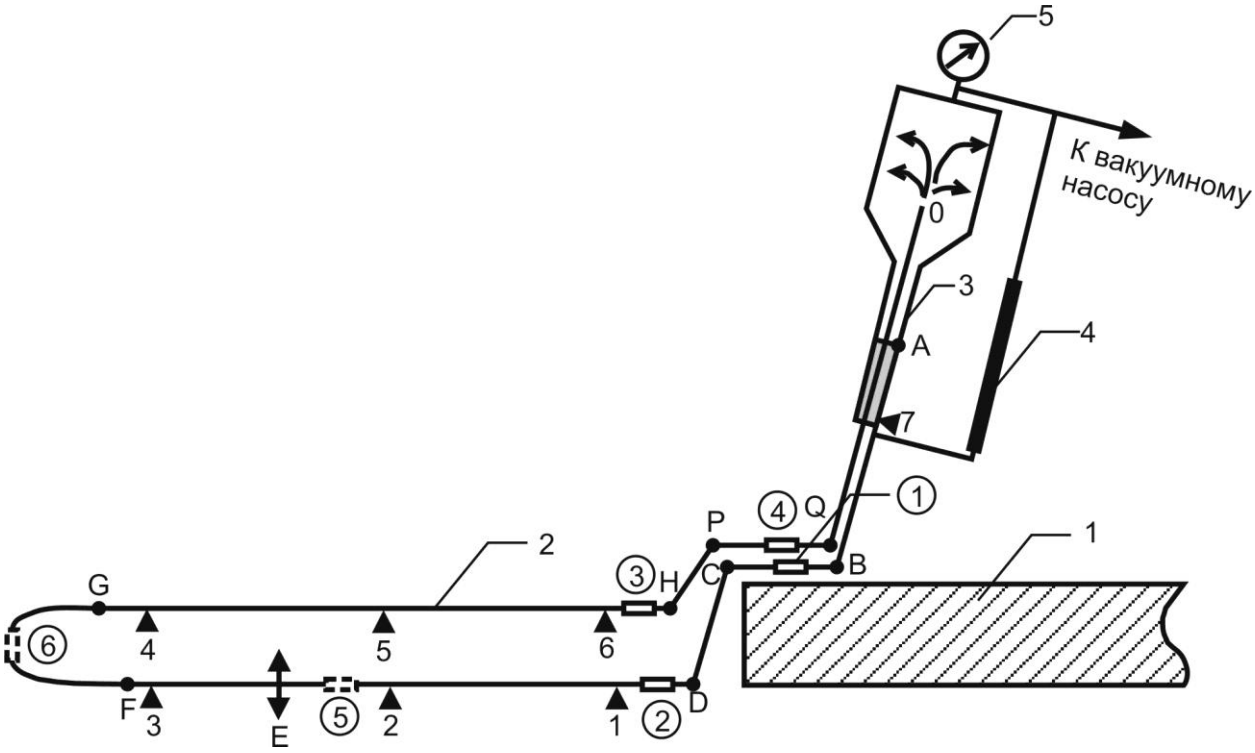


Рис. 1 Схема лабораторной модели охлаждающего устройства с горизонтальной испарительной частью. Выносными линиями показаны: 1 – пол холодильной камеры; 2 – трубка испарителя; 3 – конденсатор; 4 – трубка для измерения уровня конденсата; 5 – вакуумметр. Темные треугольники с размещенными рядом цифрами показывают места расположения и номера температурных датчиков.

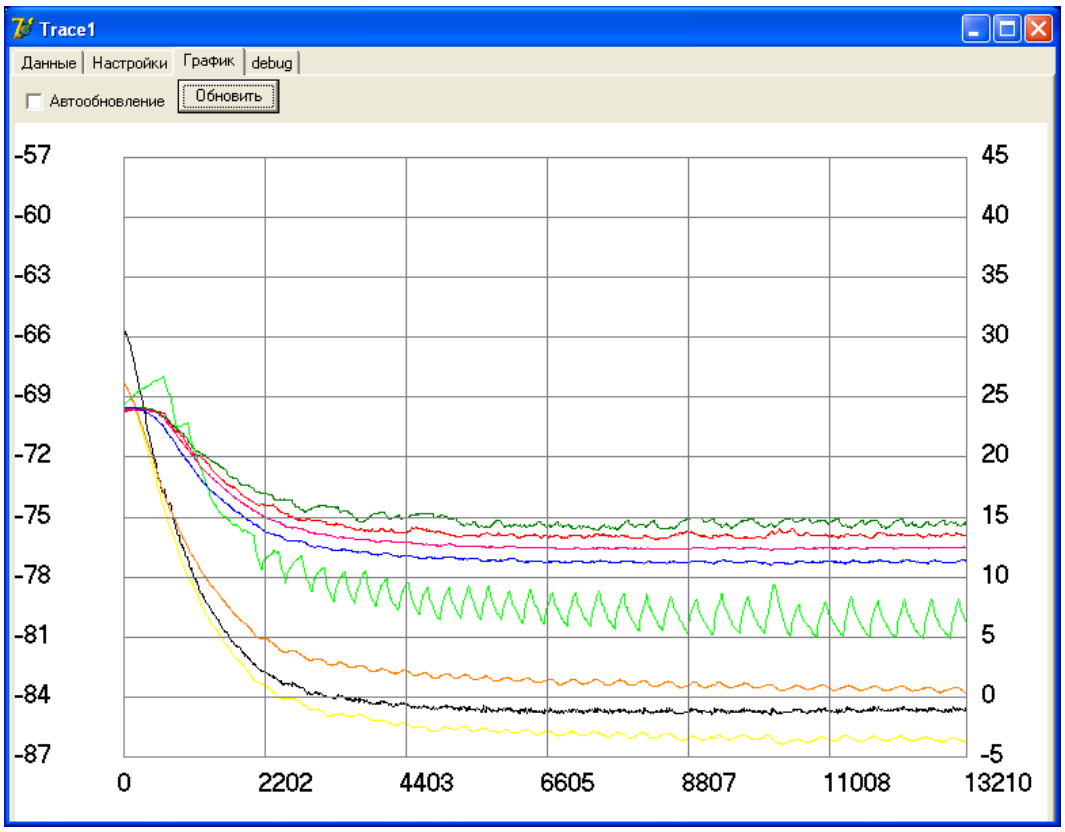


Рис. 2 Динамика температуры на испарителе и конденсаторе (правая ось) и давления насыщающих паров (левая ось, черная кривая) для испарителя длиной 14 м. при нормальной работе устройства.

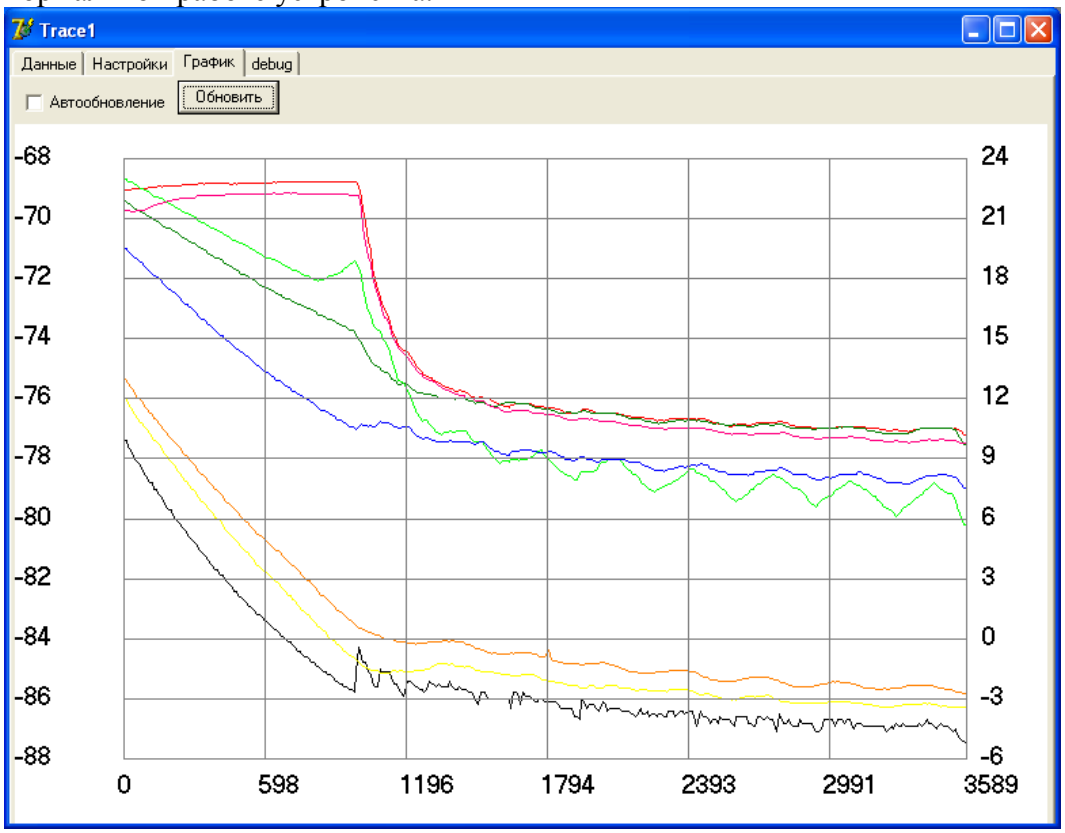


Рис. 3 Динамика температуры на испарителе и конденсаторе (правая ось) и давления насыщающих паров (левая ось, черная кривая) для испарителя длиной 7 м при нормальной работе устройства.

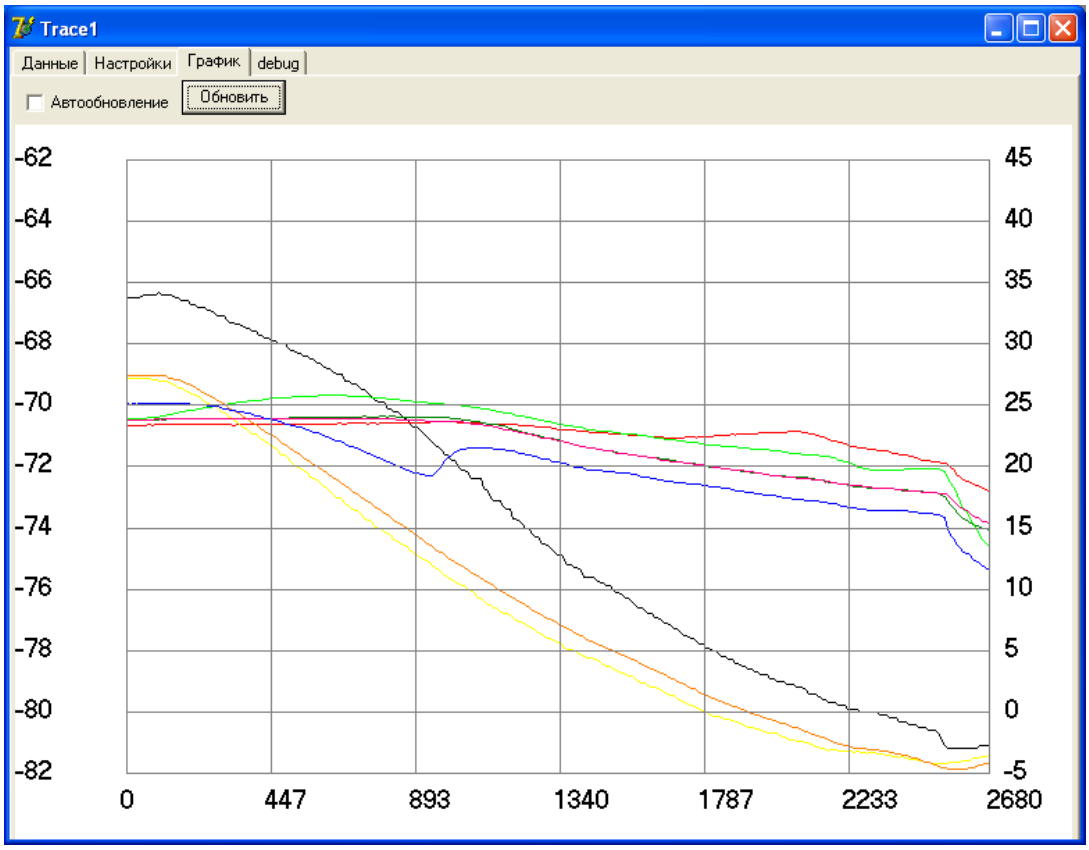


Рис. 4 Динамика температуры на испарителе и конденсаторе (правая ось) и давления насыщающих паров (левая ось, черная кривая) при неработающем устройстве.

Рис. 5 Уровень конденсата в конденсаторе при неработающем устройстве.

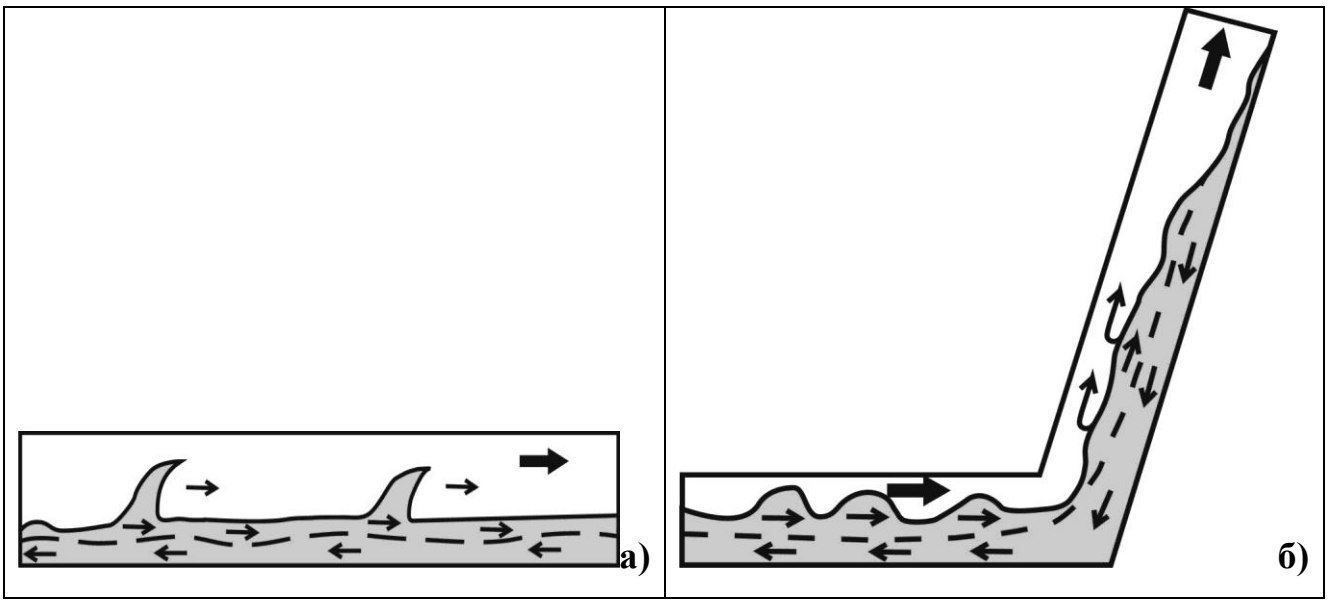


Рис. 6 Схема циркуляции хладагента на двухфазном участке (см. Рис. 1). Темная область – конденсат; жирные стрелки показывают направление потока пара, тонкие – потоки конденсата; штриховая линия - условная граница раздела потоков: а) на отрезке HP; б) на отрезке PQ.

На участке *HP* схемы Рис.1 этот противоток наблюдается как при работающем устройстве (фотографии Рис. 7 и 8), так и при прекращении его работы (фотографии Рис. 9 и 10). На участке PQ схемы Рис. 1 этот противоток наблюдается при работающем устройстве (фотографии Рис. 11 и 12). В настоящее время известно, что для противоточных систем при определенных внешних условиях возникает так называемый “кризис захлебывания”, приводящий к резкому повышению сопротивления движению хладагента, прекращению его циркуляции и запиранию системы (см., например, *Г. Уоллис, Одномерные двухфазные течения, М., Мир, 1972)*. При запирании устройства на этом участке наблюдается образование конденсатной пробки, полностью перекрывающей проходное сечение трубки, что и приводит к резкому повышению гидравлического сопротивления потоку и к прекращению работы устройства (фотографии Рис. 13 и 14). Сквозь пробку наблюдается периодическое (и довольно медленное) течение паровых пузырей в сторону конденсатора. Непрерывный обратный сток конденсата ниже этой пробки также предполагает ее обратное движение. Стабильное положение пробки (и весьма устойчивое, которое не

ликвидируется встряхиванием деталей системы) обусловлено компенсацией обратного стока периодически движущимися со стороны испарителя снарядными уплотнениями конденсата. То есть, устойчивое существование пробки, являющейся причиной прекращения работы устройства, носит динамический характер. Ее образование начинается сразу после начала понижения температуры воздуха в зоне расположения конденсатора и к моменту набора им достаточно низкой температуры пробка формируется полностью, препятствуя самопроизвольному запуску устройства. Положение этой пробки имеет четкую пространственную локализацию: на участке выхода потока хладагента из испарителя и входа его в конденсатор (участок PQ на Рис. 1). При этом запуск системы может быть осуществлен искусственно (с обеспечением процесса устойчивой циркуляции хладагента) путем применения специальных мероприятий, разработанных в процессе исследования модели устройства в лабораторных условиях.

Для обеспечения надежного запуска циркуляции хладагента в конструкцию прямоточного естественно-конвективного устройства с горизонтальным испарителем включена система автоматического управления запуском. Эта система включает в себя совокупность электромагнитных датчиков для измерения внутренних параметров устройства и параметров окружающей его внешней среды, анализатор сигналов датчиков и двухпозиционный (закрыто – открыто) электромагнитный клапан, срабатывающий от внешнего (управляющего) электрического сигнала, который вырабатывается анализатором на основе заложенного в его память критерия. Клапан врезают в трубку испарителя несколько ниже того отрезка, на котором происходит образование запирающей пробки - ниже точки *H* (Рис. 1). В качестве датчиков, характеризующих состояние внешней среды, достаточно иметь датчик температуры, размещаемый на некотором удалении от конденсатора. Датчики внутреннего состояния могут измерять температуру и давление внутри отдельных частей устройства, а также уровень конденсата в конденсаторе.

Модифицированная конструкция устройства (Рис. 15) содержит герметично соединенные между собой горизонтальный испаритель 1 и конденсатор 2. Устройство заполнено дозированным количеством легкокипящей жидкости 3, уровень которой в конденсаторе зависит от его рабочего состояния (предпусковое состояние, нормальная работа, запертое состояние). Элементы системы запуска размещены в различных частях устройства. На конденсаторе размещены датчик температуры конденсатора 4 или датчик давления 5. На мерной трубке уровня конденсата 6 размещен датчик уровня 7 (в иллюстрируемом варианте – емкостного типа). Клапан 8 размещен на конечном горизонтальном участке испарителя перед ее переходом в вертикальный отвод к конденсатору. Анализатор системы запуска 9 размещен внутри пылевлагозащищенного металлического шкафа 10, имеющего ввод электропитания 11. Датчик температуры атмосферного воздуха 12 установлен на внешней стенке шкафа 10. Коммутационные провода 13 от клапана и всех датчиков заведены в шкаф 10 и смонтированы совместно с анализатором 9 (и иными необходимыми дополнительными элементами) в электрическую схему системы запуска.

Рассмотрим критерий срабатывания клапана на примере датчика уровня конденсата. При нормальной работе устройства уровень конденсата в конденсаторе близок к минимальному значению h_{min} (которое несколько превышает положение испарителя, принимаемое за точку отсчета уровня) и определяется расчетом или опытным путем. При образовании пробки и запирании системы весь конденсат скапливается в конденсаторе и его уровень достигает максимального значения h_{max}, которое легко вычисляется на основе известных параметров конструкции конденсатора и известного количества заправляемого хладагента. До момента начала понижения температуры атмосферного воздуха (когда его температура выше температуры грунта, подлежащего охлаждению) устройство находится в предпусковом состоянии, которое характеризуется тем, что весь конденсат занимает низшее положение из возможных, то есть находится в трубке

испарителя. В предпусковом состоянии датчик уровня фиксирует положение уровня конденсата ниже значения h_{min}. Условие $h < h_{min}$ закладывается в память анализатора в качестве критерия для выработки управляющего сигнала на закрытие клапана. При наступлении зимнего периода температура наружного воздуха начинает понижаться, что вызывает понижение температуры внутри конденсатора. Это в свою очередь влечет понижение давления насыщающих паров хладагента внутри него. При постоянной температуре на испарителе (и соответствующего давления насыщающих паров в нем) и по достижении достаточно низкой температуры атмосферного воздуха образуется достаточно большой перепад давлений между испарителем и конденсатором, который вызывает движение жидкой фазы хладагента из испарителя в конденсатор по стоковой линии FDCBA (при закрытом положении клапана). Через определенное время практически весь конденсат собирается в конденсаторе. Конструкция конденсатора в прямоточном устройстве (для описываемого здесь процесса) не допускает попадания конденсата в зону, располагающуюся выше клапана (выше точки *H*, Рис. 1), то есть в этом процессе образование запирающей пробки исключено. Опыт показывает, что устойчивая циркуляция и эффективная работа устройства может быть обеспечена при срабатывании клапана на открытие при выполнении условия $h > 0{,}9\ h_{max}$. Надежность и устойчивость такого запуска обусловлена тем, что гидравлическое сопротивление восходящей линии испарителя GHPQO (Рис. 1) в момент открытия клапана является минимальным, а кинетическая энергия восходящего потока – максимальна, что не позволяет запустить процесс формирования пробки (характерный для низких энергий двухфазного потока). Это условие принимается в качестве критерия для выработки управляющего сигнала на открытие клапана. При временных повышениях температуры воздуха в течение зимы до значений, превышающих температуру текущего состояния грунта, весь конденсат скатывается в испаритель, что вызывает закрытие клапана по первому критерию. При последующем похолодании срабатывает

второй критерий и так далее. Таким образом обеспечивается устойчивость работы устройства с применением системы автоматического запуска по показаниям датчика уровня.

Аналогичным образом может быть осуществлен запуск устройства по показаниям датчиков температуры конденсатора или испарителя. Для этого необходимо учесть, что при нормальной работе устройства температура конденсатора имеет максимальное значение, которое устанавливается расчетом или опытным путем (для заданной температуры наружного воздуха). При запирании системы эта температура принимает минимальное значение, близкое к значению окружающего воздуха. Температура испарителя при нормальной работе устройства минимальна (и должна быть установлена расчетом или эмпирически для заданной температуры наружного воздуха), а при запирании системы эта температура принимает максимальное значение (близкое к температуре окружающего грунта). На основе этих фактических данных выбираются критерии для выработки управляющего сигнала на закрытие или открытие клапана. Поскольку давление в конденсаторе и испарителе однозначно связаны с соответствующими температурами согласно кривой насыщения, то аналогичная процедура может быть организована по показаниям датчиков давления в конденсаторе или испарителе. Для повышения надежности запуска управляющий сигнал на закрытие / открытие клапана может быть сформирован на основе дублирования показаний датчиков разных типов, анализа их синхронных сигналов и формулировки соответствующих критериев.

Лабораторные испытания показывают высокую степень устойчивости работы устройства при включении в ее конструкцию систему автоматического управления запуском. На модифицированную конструкцию устройства подана заявка на выдачу патента на изобретение.

Рис. 7 Фотография стока конденсата на участке НР при работающем устройстве.

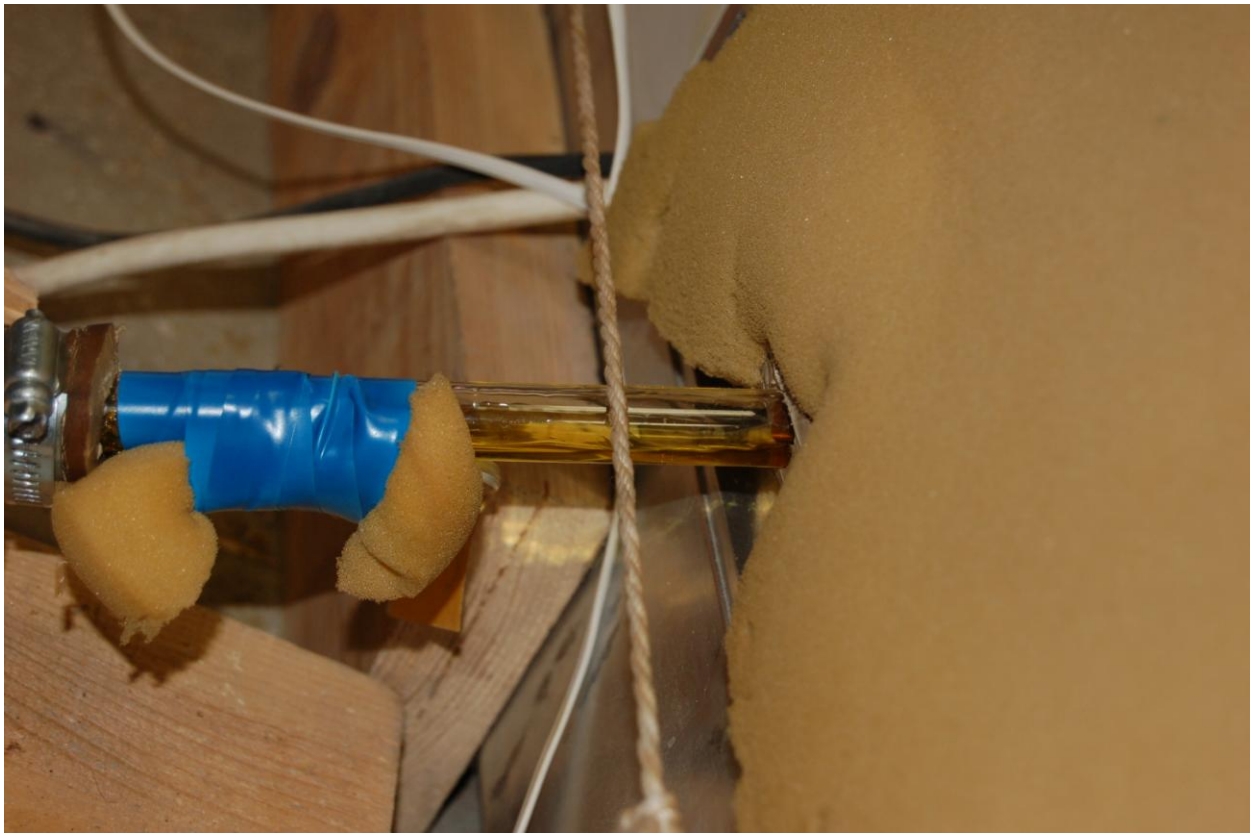


Рис. 8 Фотография стока конденсата на участке НР при работающем устройстве.

Рис. 9. Фотография стока конденсата на участке НР при не работающем устройстве.

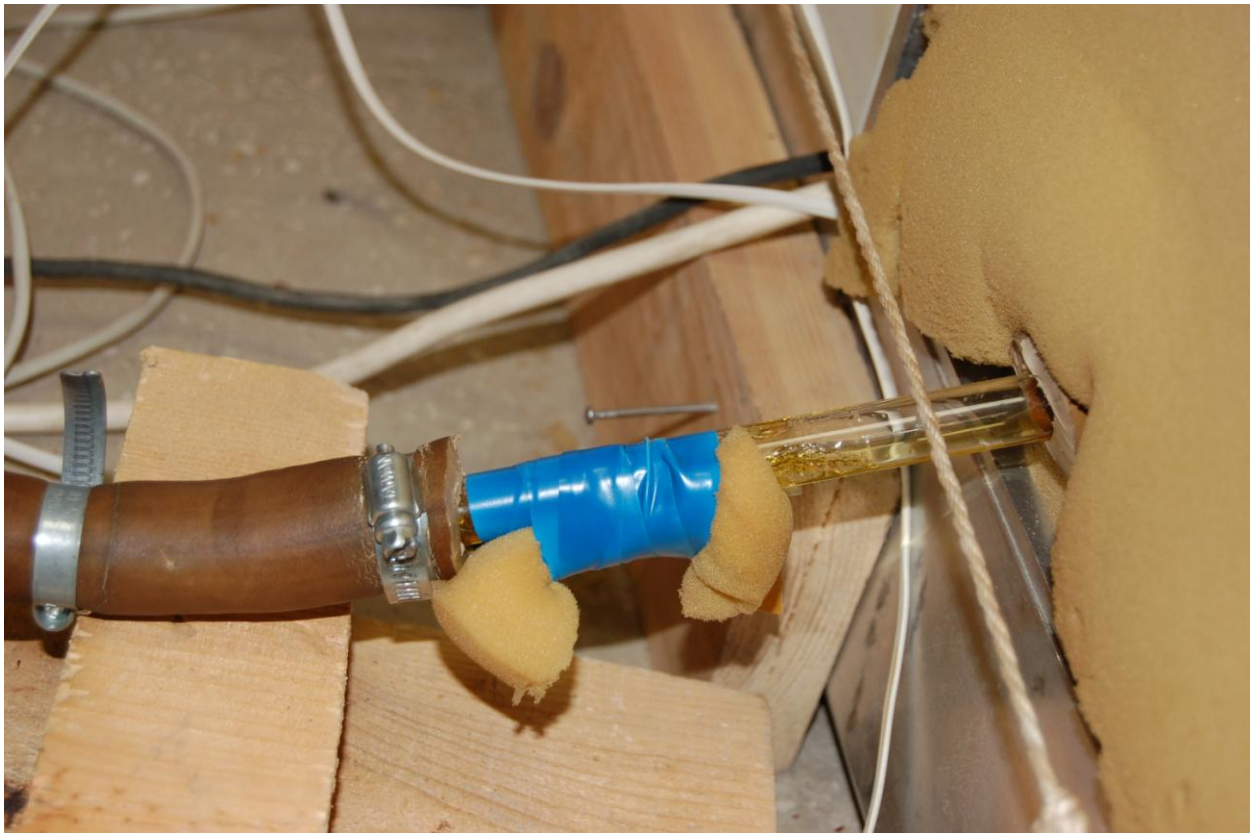


Рис. 10. Фотография стока конденсата на участке НР при не работающем устройстве.

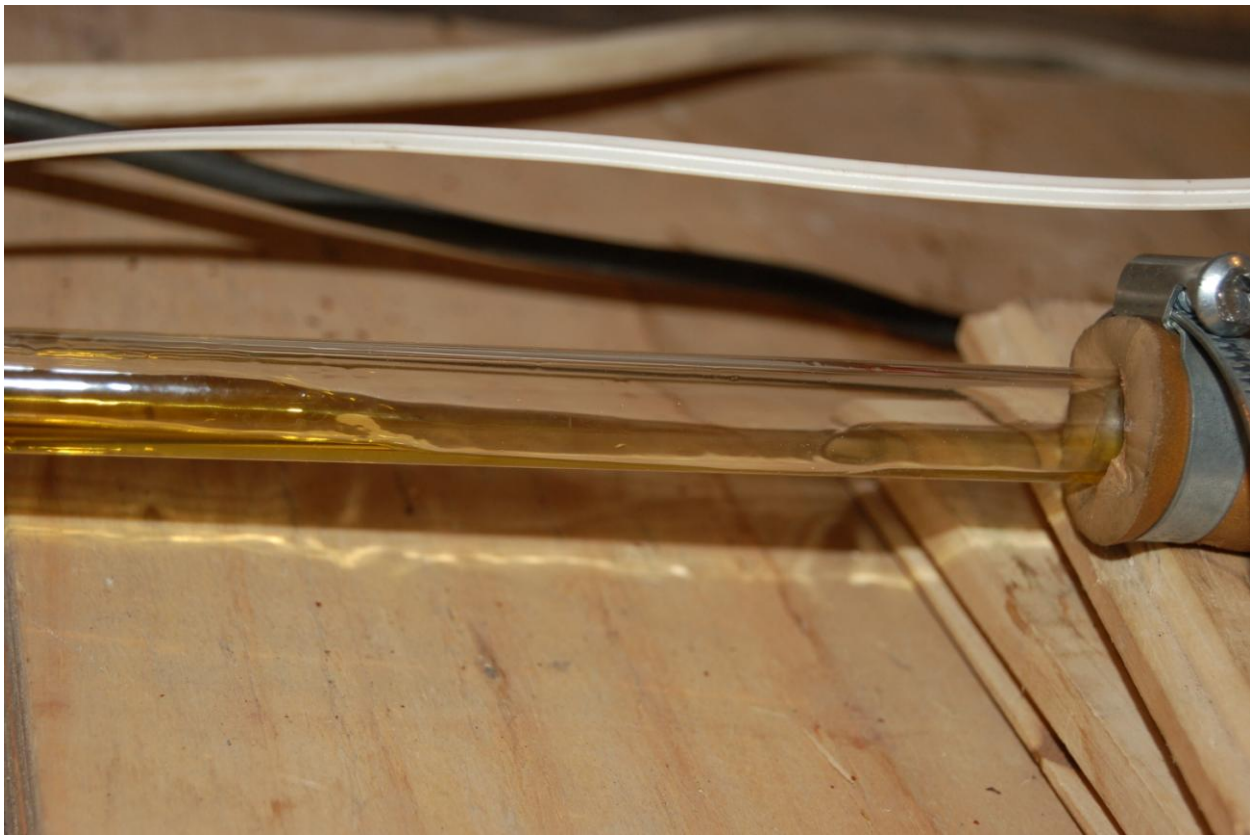


Рис.11. Фотография стока конденсата на участке PQ при работающем устройстве.

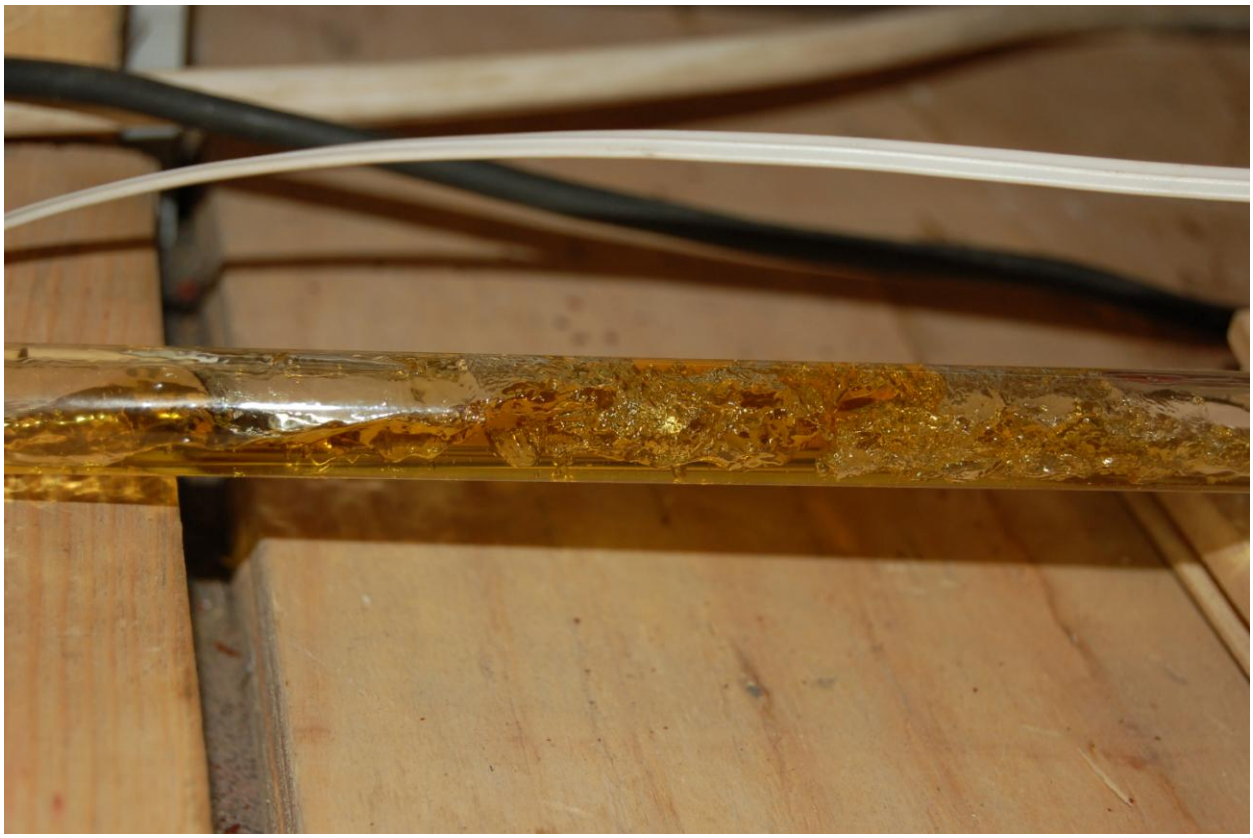


Рис. 12. Фотография стока конденсата на участке PQ при работающем устройстве.

Рис. 13. Фотография конденсатной пробки на участке PQ при не работающем устройстве.

Рис. 14. Фотография конденсатной пробки на участке PQ при не работающем устройстве.

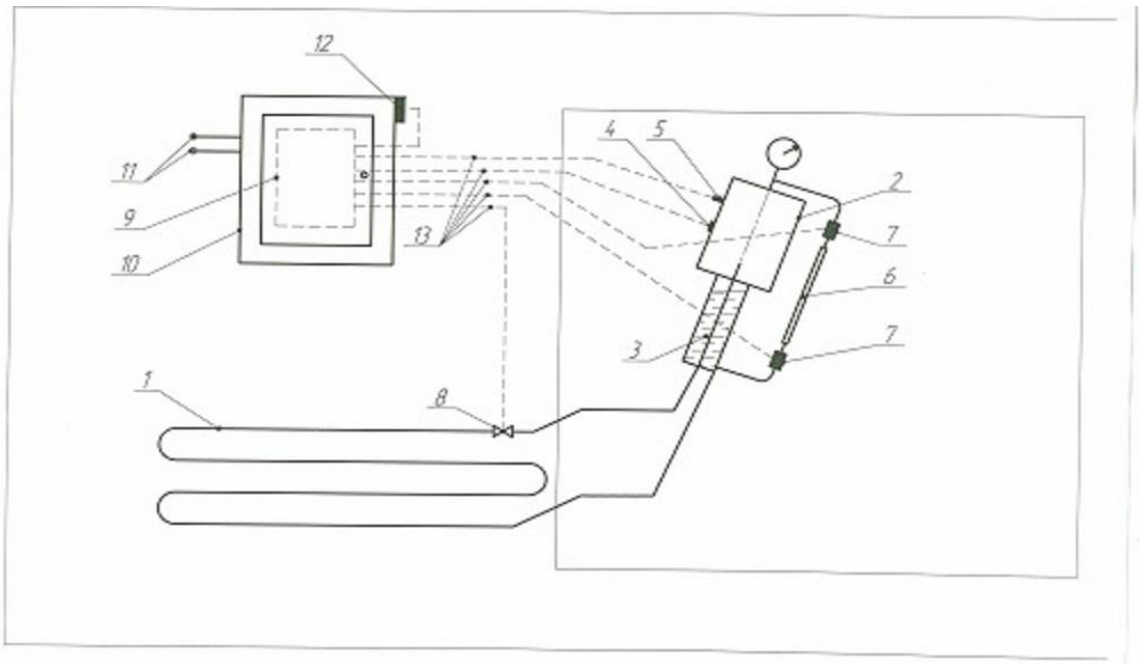


Рис.15. Схема модифицированной конструкции устройства с горизонтальным испарителем, включающая систему автоматического управления запуском (обозначения в тексте).

2. Исследование охлаждающего устройства с вертикальным многотрубным испарителем (2013 г.).

На первом этапе проведено исследование работы лабораторной модели двухфазного естестественно-конвективного охлаждающего устройства, натурный аналог которого применяется в настоящее время для термостабилизации приустьевой зоны добывающих скважин в районах распространения многолетнемерзлых грунтов (фотографии - Рис. 16 и 17). Конденсатор модели выполнен из металла и размещен внутри крупногабаритной холодильной камеры (фото – Рис. 18). Все внешние соединительные патрубки, соединительный коллектор и испарительная часть модели (в виде четырех вертикальных охлаждающих элементов) выполнены из (прозрачного) стекла для визуализации потоков хладагента. Лабораторная модель снабжена температурными датчиками для измерения температуры на конденсаторе и вдоль его охлаждающих элементов, вакуумметром для определения давления насыщающих паров в конденсаторе, форвакуумным насосом для предварительного вакуумирования системы. Электронный блок

автоматической регистрации показаний датчиков позволяет производить непрерывную запись температуры и давлений в системе.

Моделирование работы устройства производилось при температуре внутри холодильной камеры минус 12 – 13^0 С и при температуре в лабораторном помещении – плюс 25 – 30^0 С. Перед каждым экспериментом все охлаждающие элементы заполнялись хладагентом до одинакового уровня (который изменялся для различных экспериментов – влияние степени заполнения). После этого производилось вакуумирование системы и затем включалась холодильная камера. Было проведено около 50 экспериментов средней продолжительностью около 1,5 суток каждый с различной начальной степенью заполнения хладагентом и различным количеством подключенных охлаждающих элементов (от 1 до 4). В процессе проведения экспериментов производилась видеозапись наиболее важных и интересных моментов циркуляции хладагента и данных автоматической регистрации. Общая продолжительность видеозаписи составляет около 15 часов.

Анализ полученных в результате проведения экспериментальных исследований данных позволяет сделать следующие выводы:

- Работа устройства рассматриваемой конструкции характеризуется высокой степенью неустойчивости. Из четырех охлаждающих элементов как правило работает (кипит) только один; редко наблюдается одновременная работа двух элементов; очень редко одновременно работают три элемента; одновременная работа всех четырех элементов нами не наблюдалась. При этом иногда фиксировалось довольно длительное (до 10 минут) полное и одновременное отсутствие циркуляции во всех четырех элементах (хладагент в трубках находится в перегретом состоянии).

- В тех элементах, где имеет место кипение хладагента, наблюдается существенное понижение температуры (до 25^0 С) по отношению к температуре воздуха в лабораторном помещении. При отсутствии кипения температура элементов повышается и приближается к комнатной (Рис. 19).

- Неустойчивость работы устройства связана с неконтролируемым перераспределением хладагента между охлаждающими элементами, которая осуществляется в их верхней части через общий коллектор. В процессе работы часть трубок оказывается почти пустой, в то время как другая их часть – переполняется. Удовлетворительная устойчивость работы достигается только при отключении трех трубок (устройство с одним охлаждающим элементом - *Gorelik J.B.* Laboratory study of the devices for termostabilization of frozen ground // 10-th International Conference on Permafrost // Salechard, 2012 // Oral Presentation, Program, p. 10.).

На основании полученных результатов предложена система термостабилизации устьев добывающих скважин, которая (взамен существующих конструкций охлаждающих систем) предполагает применение отдельных охлаждающих трубок, снабженных индивидуальным конденсаторным устройством (Рис. 20; Патент РФ № 115820, 2011).

Рис. 16. Фотография нижней части лабораторной модели системы ВЕТ (Фундаментстройаркос)с четырьмя охлаждающими трубками.

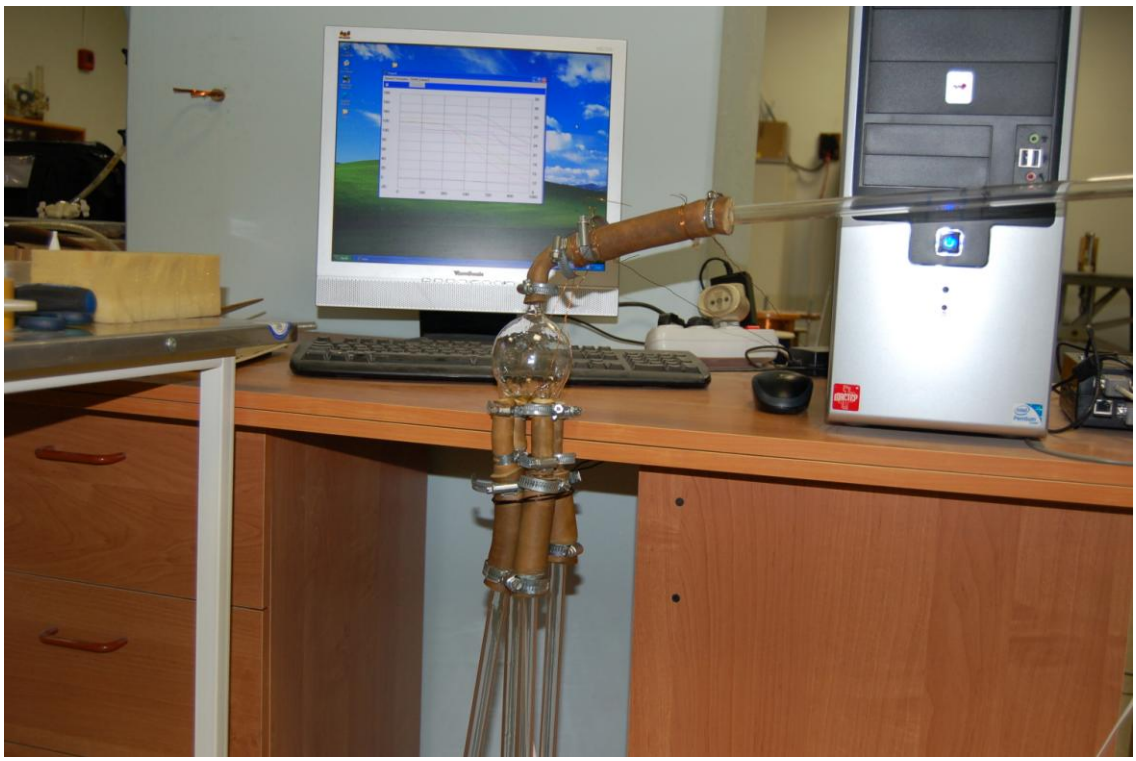


Рис. 17. Фотография верхней части лабораторной модели системы BET (Фундаментстройаркос) с четырьмя охлаждающими трубками.

Рис. 18. Фотография конденсатора лабораторной модели, размещенного внутри холодильной камеры (в работающем состоянии дверной проем камеры закрывается цельным листом поролона толщиной 100 мм).

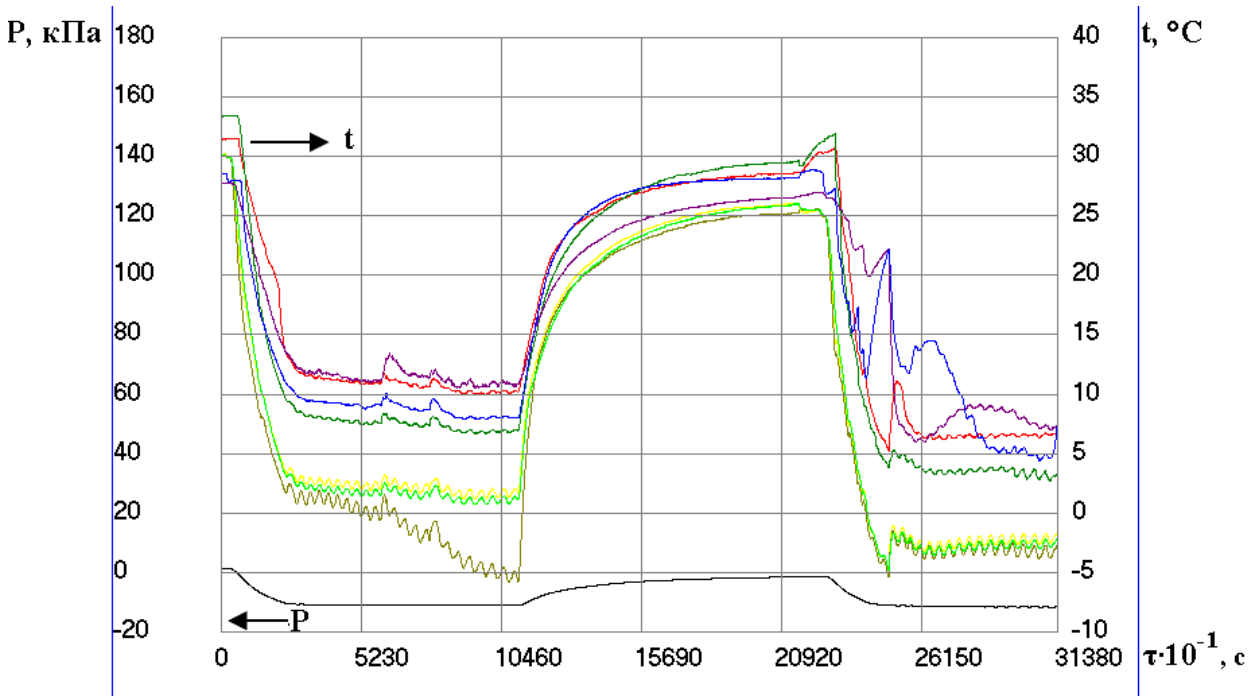
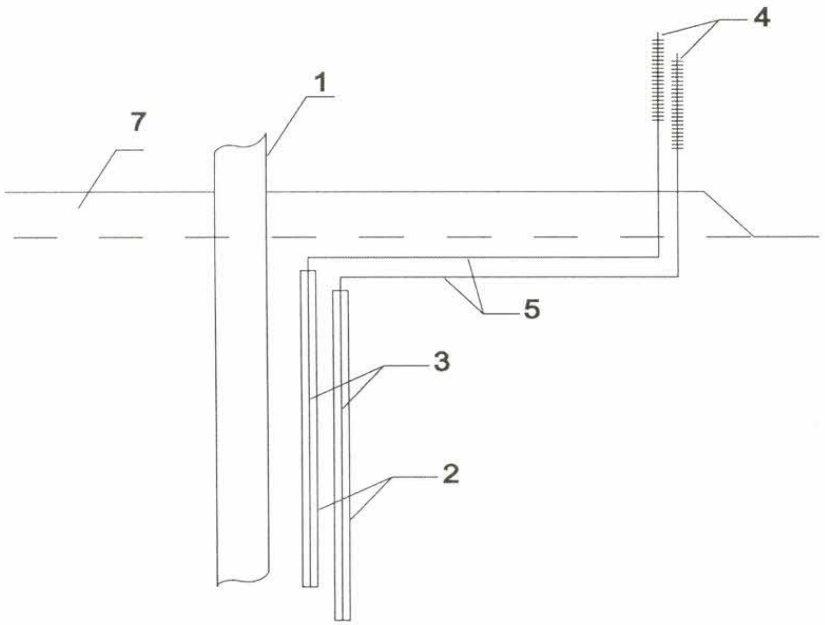
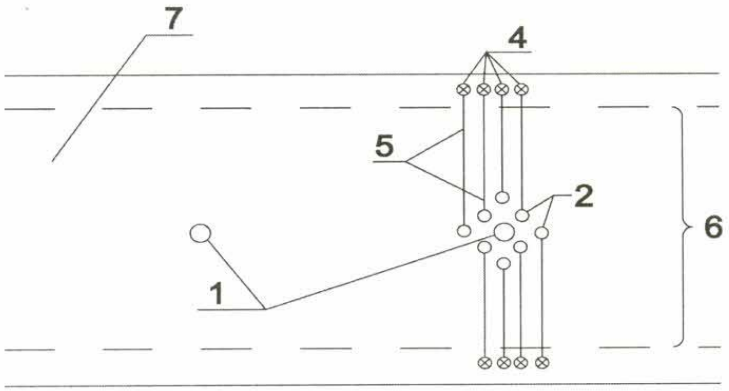


Рис. 19. Динамика давления насыщающих паров хладагента и температуры вдоль отдельного охлаждающего элемента лабораторной модели системы ВЕТ. Резкий подъем температуры в интервале 10500 - 25000 связан с неконтролируемым перетоком конденсата в соседние трубки и опустошением наблюдаемого элемента.



Фиг. 1



Фиг. 2

Рис. 20. Схема системы термостабилизации приустьевой зоны добывающих скважин (Фиг. 1 – разрез, Фиг. 2 – план): 1 – эксплуатационная скважина; 2 – контейнеры для размещения охлаждающих элементов; 3- охлаждающие элементы; 4 – конденсатор; 5 – горизонтальный отвод; 6 – проезжая часть кустовой площадки; 7 – насыпь.

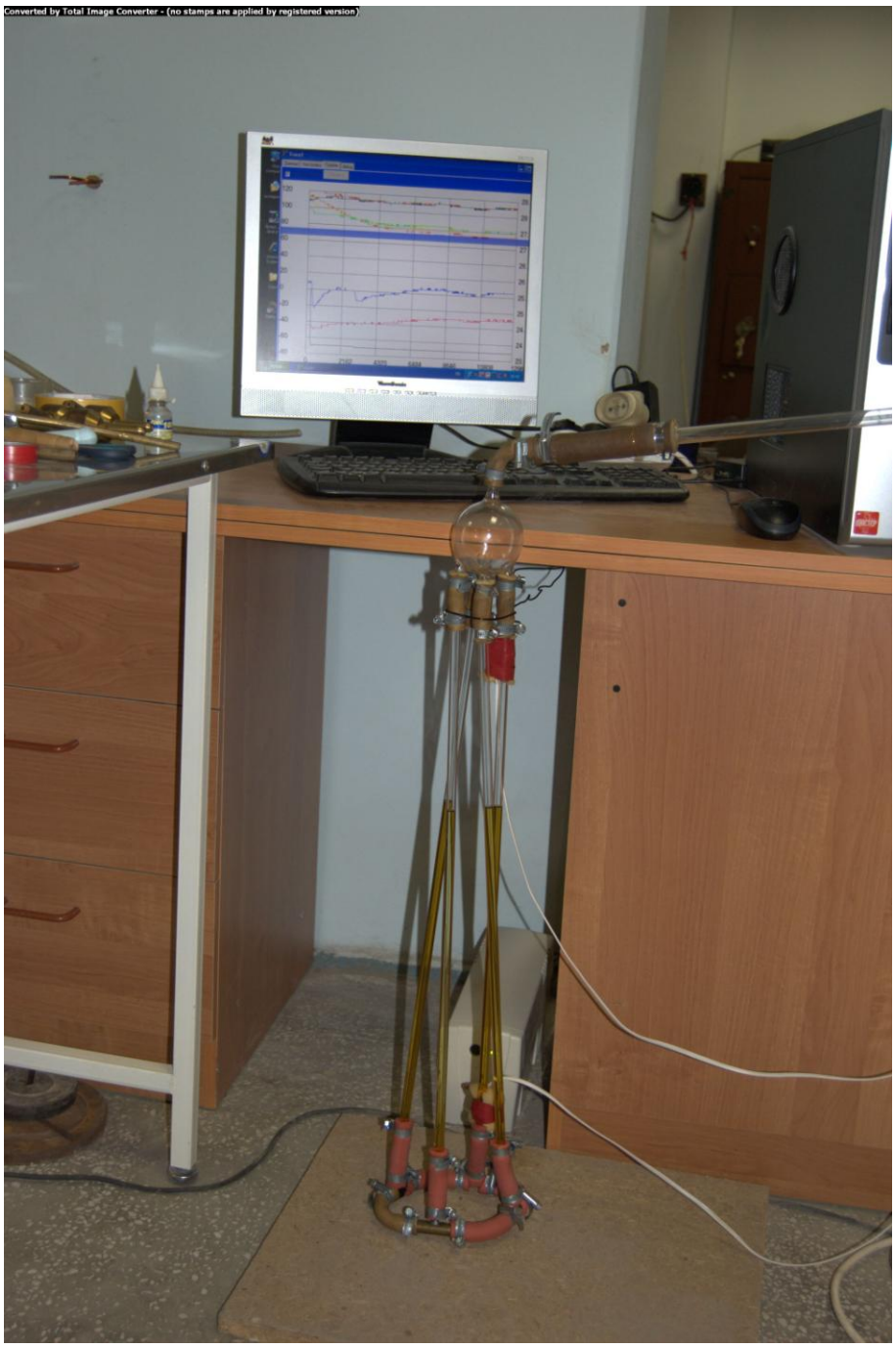


Рис. 21. Фотография модели охлаждающего устройства с вертикальными охлаждающими элементами, объединенных общим коллектором в нижней части.

Однако, предложенная конструкция системы термостабилизации приустьевой зоны скважин в виде совокупности раздельных трубок (Рис. 20) имеет недостаток, заключающийся в увеличении объема строительно-монтажных работ (в силу увеличения количества отдельных гидравлических магистралей). По этой причине следующий этап исследований был направлен на устранение этого недостатка. С этой целью была изготовлена

модифицированная лабораторная модель охлаждающей системы ВЕТ, включающая дополнительный патрубок в нижней части устройства и превращающий отдельные трубки испарителя в систему сообщающихся сосудов (Рис. 21), что исключает неконтролируемое переполнение или недостаточное заполнение отдельных трубок конденсатом в процессе работы устройства. Измерительная система, а также система наблюдений и визуализации данных эксперимента была идентична той, что использовалась на первом этапе исследований.

Лабораторное моделирование работы такого устройства показывает высокую степень устойчивости циркуляции хладагента и достаточную эффективность охлаждения элементов испарителя системы (Рис. 22).

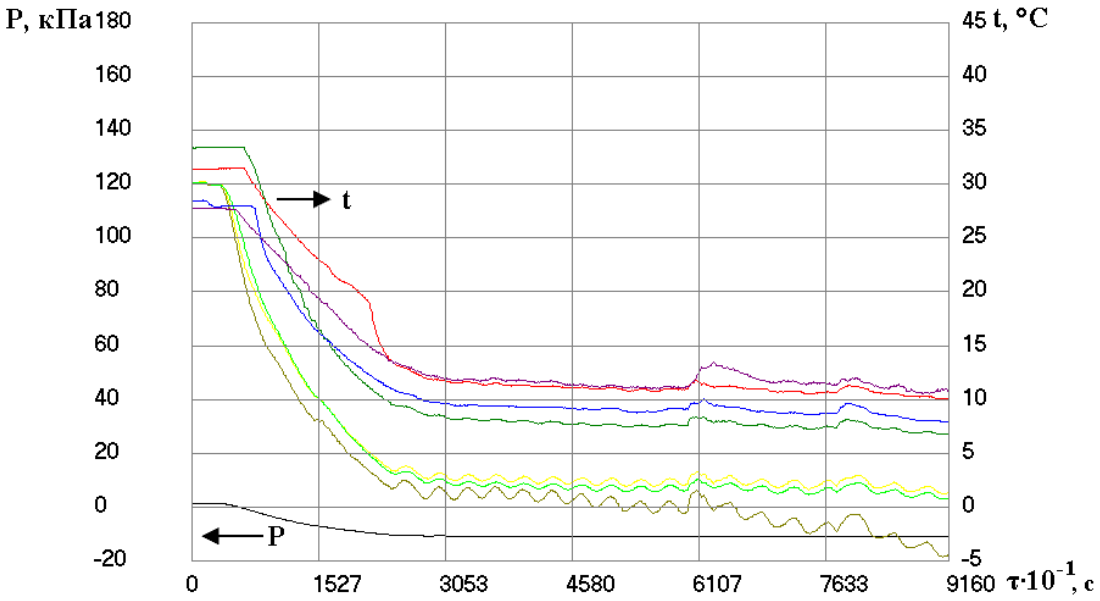


Рис. 22. Графики понижения температуры на охлаждающих элементах модифицированной конструкции модели.

При наличии нижнего коллектора основной проблемой для предлагаемой конструкции устройства является способ его монтажа и погружения в приустьевой зоне. Эта проблема решена (совместно с институтом ТюмеНИИГипрогаз) разработкой способа погружения модифицированной конструкции устройства с охватом устья добывающей скважины путем монтажа устройства на внешней стенке трубы - направления и их одновременным спуском до заданной отметки при строительстве

скважины (положительное решение на получение Патента на изобретение № 2013107897, приоритет от 25.02.13).

Размещение трубок испарителя (термостабилизаторов) на внешней образующей направления создает один охлаждающий контур на устье скважины. С увеличением количества термостабилизаторов в контуре повышается равномерность теплосъема с устья. При этом требование полного теплоотвода с устья при обеспечении температуры на охлаждающих элементах не превышающей температуры оттаивания грунтов t_0 приводит к необходимости выполнения условия на конденсаторе устройства:

$$K \cdot S_n \cdot (t_f - t_0) = \alpha \cdot k \cdot S_0 \cdot (t_0 - t_a) \qquad (1)$$

где K- эффективный коэффициент теплопередачи от добываемого флюида к контуру охлаждения, учитывающий теплопроводность всех конструктивных элементов (слоев) устья скважины; S_n – площадь боковой поверхности направления; t_f - температура добываемого флюида на устье; α- коэффициент теплообмена от наружного воздуха к стенке конденсатора; k – коэффициент эффективности оребрения конденсатора; S_0 – площадь поверхности неоребренного конденсатора; t_a – среднегодовая температура воздуха в районе размещения устройства. Соотношение (1) накладывает требования на конструктивные параметры конденсатора (площадь поверхности теплообмена, обеспечение необходимого значения коэффициента теплообмена и т.д.). Невыполнение указанного условия приведет к оттаиванию мерзлых пород в местах расположения термостабилизаторов.

ВЫВОДЫ:

1. Лабораторное исследование работы модели охлаждающего устройства с горизонтальным испарителем показало, что вопреки имеющимся умозрительным представлениям о строгой однонаправленности движения обеих фаз хладагента в рассматриваемой

конструкции устройства на участке входа трубки испарителя в конденсатор всегда имеет место противоток жидкой и паровой фаз (пар движется в сторону конденсатора, а жидкость скатывается обратно в испаритель- фотографии Рис. 7-12). Этот факт имеет принципиальное значение для работоспособности устройства поскольку для противоточных систем при определенных внешних условиях возникает так называемый “кризис захлебывания”, приводящий к резкому повышению сопротивления движению хладагента, прекращению его циркуляции и запиранию системы. В изучаемой конструкции запирание обусловлено возникновением пробок конденсата на входе в конденсатор (фотографии- Рис. 13, 14), причем эти пробки оказываются весьма устойчивыми по отношению к внешним механическим возмущениям.

2. Для устройства с горизонтальным испарителем запуск может быть осуществлен искусственно (с обеспечением процесса устойчивой циркуляции хладагента) путем включения в конструкцию устройства система автоматического управления запуском. Эта система включает в себя совокупность электромагнитных датчиков для измерения внутренних параметров устройства и параметров окружающей его внешней среды, анализатор сигналов датчиков и двухпозиционный (закрыто – открыто) электромагнитный клапан, срабатывающий от внешнего (управляющего) электрического сигнала, который вырабатывается анализатором на основе заложенного в его память критерия, определенного и сформулированного на основе выполненных лабораторных исследований работы устройства. Лабораторные испытания показывают высокую степень устойчивости работы устройства при включении в ее конструкцию систему автоматического управления запуском. На модифицированную конструкцию устройства подана заявка на выдачу патента на изобретение.

3. Работа охлаждающего устройства с вертикальным многотрубным испарителем известной конструкции (ВЕТ) характеризуется высокой степенью неустойчивости. Неустойчивость работы устройства связана с

неконтролируемым перераспределением хладагента между охлаждающими элементами, которая осуществляется в их верхней части через общий коллектор. В процессе работы часть трубок оказывается почти пустой, в то время как другая их часть – переполняется. При фиксированных внешних условиях эффект охлаждения от отдельных трубок испарителя является нестабильным и не поддается прогнозу (Рис.19).

4. Новым вариантом решения проблемы термостабилизации мерзлых грунтов приустьевой зоны скважин является модифицированная конструкция устройства, которая объединяет отдельные трубки испарителя в систему сообщающихся сосудов (Рис. 21), что гарантирует постоянство уровня конденсата во всех трубках испарителя устройства в процессе его работы и обеспечивает стабильный (и прогнозируемый) эффект охлаждения (Рис. 22). На модифицированную конструкцию получено положительное решение по заявке на выдачу патента на изобретение (решение № 2013107897, приоритет от 25.02.13).

Публикации

- *Я.Б. Горелик, Р.Я. Горелик* Лабораторное моделирование работы двухфазного естественно-конвективного устройства с горизонтальной испарительной частью // Криосфера Земли, Т.XV, № 2, 2011, с.34 – 43.

Конференции

- *Gorelik J.B.* Laboratory study of the devices for termostabilization of frozen ground // 10-th International Conference on Permafrost // Salechard, 2012 // Oral Presentation, Program, p. 10.

- *Горелик Я.Б., Накладнов В.В., Горелик Р.Я.* Компенсационные возможности двухфазных естественно-конвективных охлаждающих систем с горизонтальной испарительной частью для обеспечения устойчивости сооружений в криолитозоне при потеплении климата // Материалы

Всероссийской конференции “Современные и прогнозируемые изменения природных условий в высоких широтах”, 2013, г. Сочи.

- *Горелик Я.Б., Накладнов В.В.* Прямоточное естественно- конвективное охлаждающее устройство для термостабилизации мерзлого грунта // Десятая полярная конференция“Современные тенденции природных процессов в полярных областях Земли и перспективы российских полярных исследований”, 2014, 6 – 8 октября, г. Сочи.

- *Горелик Я.Б., Накладнов В.В.* Прямоточное естественно- конвективное охлаждающее устройство с горизонтальным испарителем для термостабилизации мерзлого грунта // Евразийский Союз Ученых (ЕСУ), 2014, № 4, ч. 5, Технические науки, с. 122 – 124.

Патенты

- *Мельников В.П., Горелик Я.Б., Штоль В.Ф., Горелик Р.Я.* Устройство для термостабилизации приустьевой зоны скважин // Патент на изобретение (положительное решение на изобретение № 2013107897/03(011703) от 21.02.13);

- *Горелик Я. Б., Мельников В.П., Штоль В.Ф.* Система термостабилизации приустьевой зоны скважин // Патент РФ № 115820, 2011;

- *Горелик Я.Б., Горелик Р.Я., Мельников В.П.* Прямоточное естественно-конвективное устройство для термостабилизации мерзлого грунта // Патент РФ № 132878, 2013.

Гранты – нет.