

## ИНЖЕНЕРНАЯ КРИОЛОГИЯ

УДК 624.139

DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2020-3(58-66)

**ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ТЕЧЕНИЯ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА  
В СИСТЕМАХ ТЕМПЕРАТУРНОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ ГРУНТОВ  
В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКИ****В.П. Мельников<sup>1-4</sup>, Г.В. Аникин<sup>1,2</sup>, А.А. Ишков<sup>2,5</sup>, И.Е. Андрианов<sup>1,2</sup>, В.А. Гуртовой<sup>1</sup>**<sup>1</sup> Автономная некоммерческая организация “Губернская академия”, 625026, Тюмень, ул. Малыгина, 86, Россия<sup>2</sup> Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, 625026, Тюмень, ул. Малыгина, 86, Россия; [anikin@ikz.ru](mailto:anikin@ikz.ru)<sup>3</sup> Тюменский государственный университет, 625003, Тюмень, ул. Володарского, 6, Россия<sup>4</sup> Тюменский индустриальный университет, 625000, Тюмень, ул. Володарского, 38, Россия<sup>5</sup> Филиал ООО “Лукойл-Инжиниринг” КогалымНИПИнефть в г. Тюмени, 625000, Тюмень, ул. Республики, 143А, Россия; [IshkovAA@tmn.lukoil.com](mailto:IshkovAA@tmn.lukoil.com)

В ходе проведения экспериментов по исследованию режимов двухфазных потоков диоксида углерода в системах температурной стабилизации мерзлых грунтов при тепловых нагрузках на испаритель ниже 2 кВт (6.58 Вт/м) были зафиксированы пульсации потока из конденсатора в испаритель. По результатам обработки данных пульсаций определена граничная тепловая нагрузка, при которой пульсации хладагента на выходе из конденсатора прекращаются.

*Двухфазный поток, диоксид углерода, горизонтальная испарительная система, моделирование***MODES OF TWO-PHASE CARBON DIOXIDE FLOW IN SOIL TEMPERATURE  
STABILIZATION SYSTEMS DEPENDING ON HEAT LOAD:  
AN EXPERIMENTAL STUDY****V.P. Melnikov<sup>1-4</sup>, G.V. Anikin<sup>1,2</sup>, A.A. Ishkov<sup>2,5</sup>, I.E. Andrianov<sup>1,2</sup>, V.A. Gurtovoy<sup>1</sup>**<sup>1</sup> Autonomous non-profit organization “Provincial Academy”, 86, Malygina str., Tyumen, 625026, Russia<sup>2</sup> Earth Cryosphere Institute, Tyumen Scientific Centre SB RAS, 86, Malygina str., Tyumen, 625026, Russia; [anikin@ikz.ru](mailto:anikin@ikz.ru)<sup>3</sup> Tyumen State University, 6, Volodarskogo str., Tyumen, 625003, Russia<sup>4</sup> Tyumen Industrial University, 38, Volodarskogo str., Tyumen, 625000, Russia<sup>5</sup> Lukoil Engineering LLC, KogalymNIPIneft, 143A, Respubliki str., Tyumen, 625000, Russia; [IshkovAA@tmn.lukoil.com](mailto:IshkovAA@tmn.lukoil.com)

During the experimental study of two-phase flow regimes of carbon dioxide in systems of temperature stabilization of frozen soils, the condenser to evaporator flow pulsations were recorded under thermal loads on the evaporator below 2 kW (6.58 W/m). Results of the pulsation data processing allowed to determine the boundary thermal load with which the refrigerant gas pulsation at the condenser outlet is terminated.

*Two-phase flow, carbon dioxide, horizontal evaporation system, simulation***АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ**

Освоение ресурсной базы арктических и субарктических регионов сопровождается широким развитием инфраструктуры. Возведение трубопроводов, дорог, хранилищ сырья и других сооружений в криолитозоне приводит к нарушению их естественного температурного режима и частичному таянию льда в грунте. Известно, что при растеплении мерзлый грунт теряет свои прочностные свойства, в результате чего фундаменты сооружений, на которых они построены, подвержены риску деформации и разрушения [Основы геокриологии..., 1999; Long, 1963; Farouki, 1986; Holubec, 2008, 2010]. Для решения этой проблемы были разработаны специальные устройства – сезоннодействующие

охлаждающие устройства (СОУ), которые охлаждают грунт в холодное время года и останавливаются в теплое [Феклистов и др., 2008]. По этой причине данные устройства также называют тепловыми диодами. Существует несколько принципиальных видов СОУ, однако в настоящей работе будет рассматриваться система температурной стабилизации грунтов с горизонтальным испарителем (рис. 1).

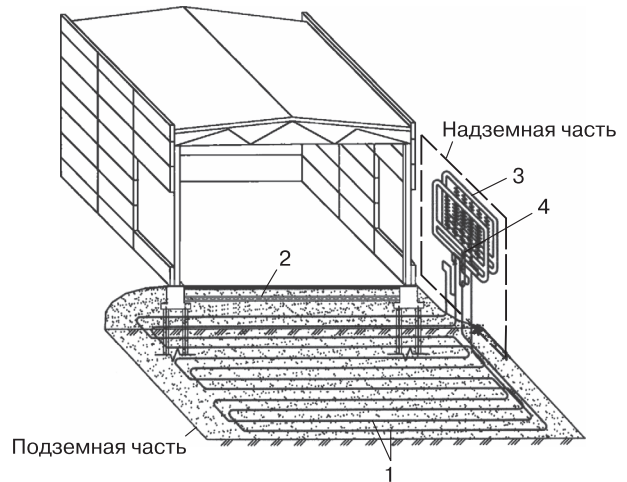
Системы данного вида, использующие в качестве хладагента аммиак, были разработаны фирмой НПО “ФундаментСтройАркас” в начале 1990-х гг. и нашли массовое применение при строительстве на мерзлых грунтах в России. В част-

ности, можно привести пример обустройства таких месторождений, как Ванкорское (560 шт.), Бованенковское (289 шт.), Харасавэйское (175 шт.), Самбургское (164 шт.), Новоуренгойское (127 шт.), Юрхаровское (104 шт.) и др. По состоянию на конец 2018 г. было установлено 2222 системы температурной стабилизации с горизонтальным окончанием испарителя.

Способ монтирования данных систем следующий. Испаритель находится в грунте под зданием, между испарителем и зданием размещается слой термоизоляции. Термоизоляция не позволяет оттаивать мерзлому грунту в летний период, когда система не работает. Конденсатор контактирует с атмосферой. Хладагент в трубах испарительной системы такого устройства при температуре атмосферы ниже, чем температура грунта, закипает. Образующийся пар поднимается из испарителя в конденсатор, находящийся на несколько метров выше испарителя, там превращается в жидкость и под действием силы тяжести снова стекает в испаритель. При переходе в испарительной системе хладагента из жидкого состояния в газообразное система поглощает тепло из грунта, при конденсации пара в конденсаторе тепло выделяется и отводится в атмосферу. Таким образом, тепло передается из грунта в атмосферу и грунт замораживается. Устройство работает только зимой. Для того чтобы за лето грунт не оттаял, используется слой термоизоляции между фундаментом сооружения и испарительной системой.

Ранее проводились экспериментальные исследования в системах подобного типа. В качестве хладагента в экспериментах были использованы разные газы: ацетон [Горелик, 2015], аммиак [Долгих, Окунев, 1989; Ишков и др., 2018] и пропан [Долгих, Окунев, 1989]. Авторами настоящей работы изучено функционирование систем данного типа на диоксиде углерода.

Предложена экспериментальная установка, подобная той, что приведена на рис. 1, с рядом конструктивных изменений и на новом хладагенте. Выбор диоксида углерода в качестве теплоносителя обусловлен тем, что в работе [Аникин, Спасенникова, 2014] было теоретически показано его преимущество для таких установок из-за наименьшего перепада температур между испарителем и конденсатором при запуске системы. Предлагаемые устройства начинают работать, когда грунт теплее атмосферы на десятые доли градуса (разница температур практически нулевая), в то время как устройства НПО «ФундаментСтройАркас» (см. рис. 1), работающие на аммиаке, начинают функционировать, когда грунт теплее атмосферы на несколько градусов. Следовательно, время работы сезонных охлаждающих устройств на диоксиде углерода в течение зимнего сезона больше времени работы СОУ с аммиаком в качестве хла-



**Рис. 1. Система температурной стабилизации грунтов с горизонтальным испарителем [Феклистов и др., 2008]:**

1 – трубы испарительной системы; 2 – слой термоизоляции; 3 – ускоритель циркуляции; 4 – конденсатор.

дагента [Аникин, Спасенникова, 2014]. Мощность установки, работающей на диоксиде углерода, может быть больше мощности установки на аммиаке.

Рассмотрим мощность системы, которая задается выражением:

$$W = (t_k - t_b) S \eta \alpha = \left( (t_k - t_{гр}) + (t_{гр} - t_b) \right) S \eta \alpha, \quad (1)$$

где  $W$  – мощность установки, Вт;  $t_k$  – температура конденсатора, °C;  $t_{гр}$  – температура грунта на границе с трубой испарителя, °C;  $t_b$  – температура воздуха, °C;  $S$  – суммарная площадь оребрения конденсатора, м<sup>2</sup>;  $\eta$  – коэффициент эффективности ребер;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи ребер, Вт/(м<sup>2</sup>·°C).

Для аммиака разность температур составляет  $(t_k - t_{гр}) = -0.53H$ , для диоксида углерода равна  $-0.13H$  (где  $H$  – высота подъема конденсаторной части относительно труб испарителя, м) [Аникин, Спасенникова, 2014].

Тогда из (1) получаем

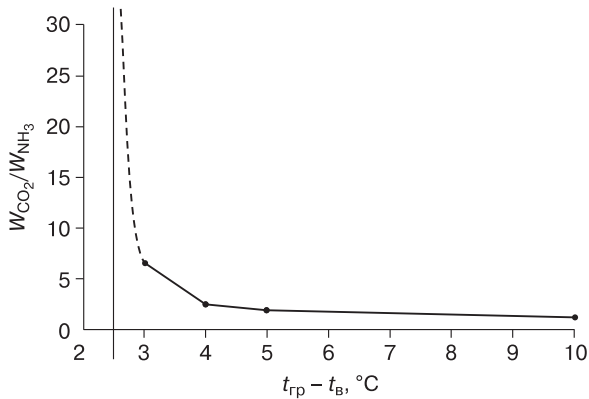
$$W_{NH_3} = \left( -0.53H + (t_{гр} - t_b) \right) S \eta \alpha; \quad (2)$$

$$W_{CO_2} = \left( -0.13H + (t_{гр} - t_b) \right) S \eta \alpha, \quad (3)$$

где  $W_{NH_3}$ ,  $W_{CO_2}$  – полные тепловые мощности системы, заправленной аммиаком и диоксидом углерода соответственно.

Разделив выражение (2) на (3) и сократив числитель и знаменатель на величину  $(t_{гр} - t_b)$ , получаем

$$\frac{W_{CO_2}}{W_{NH_3}} = 1 - \frac{0.13H}{t_{гр} - t_b} \left[ 1 - \frac{0.53H}{t_{гр} - t_b} \right]^{-1}. \quad (4)$$



**Рис. 2. Отношение мощностей установок, работающих на диоксиде углерода и аммиаке.**

Штриховая линия – экстраполяция рассматриваемых значений при приближении к асимптоте.

Рассмотрим, как будет меняться соотношение мощностей системы температурной стабилизации грунтов с горизонтальным испарителем, заправленной разными хладагентами:  $CO_2$  и  $NH_3$ .

$(t_{gp} - t_b), ^\circ C$	2.65	3.0	4.0	5.0	10.0
$W_{CO_2}/W_{NH_3}$	$\infty$	6.71	2.48	1.85	1.27

При  $(t_{gp} - t_b) = 2.65 ^\circ C$  система, заправленная аммиаком, не работает. Заметим, что в приведенных выше расчетах высота подъема конденсаторной части принята равной 5 м.

Видно, что мощность установки, работающей на диоксиде углерода, всегда больше мощности установки, работающей на аммиаке, а при разнице температур грунта и воздуха менее  $2.65 ^\circ C$  уста-

новка на аммиаке вообще не работает, что является недостатком данного хладагента (рис. 2).

Предлагаемая экспериментальная установка отличается от описанных выше тем, что трубы испарительной системы не закопаны в землю, а теплоизолированы и нагреваются электрическим током. Это позволяет получать заданные тепловые нагрузки, а также зависимости между тепловой нагрузкой и следующими параметрами: температура хладагента, поток жидкости, поток пара и др.

В результате исследований установлены закономерности работы таких устройств и определены пути их дальнейшего усовершенствования. Экспериментально показано, что установка с большой площадью поверхности конденсатора может работать при разнице температур грунта и атмосферы менее  $1 ^\circ C$ .

### ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Экспериментальная установка представляет собой герметичную конструкцию, где испаритель сообщается с конденсатором. Общий вид установки приведен на рис. 3. Испаритель представляет собой герметичную стальную трубу диаметром 32 мм, толщиной стенки 3 мм и длиной 304 м. Труба испарителя покрыта теплоизоляцией (скорлупой из пенополиуретана), диаметр которой 120 мм. Конденсатор состоит из 48 соединенных между собой труб диаметром 102 мм и толщиной стенки 4 мм. Трубы конденсатора имеют оребрение. Каждое ребро представляет собой квадрат, изготовленный из алюминия, со стороной 0.1 м. Суммарная площадь оребрения составляет  $76.36 м^2$ .



**Рис. 3. Общий вид установки.**

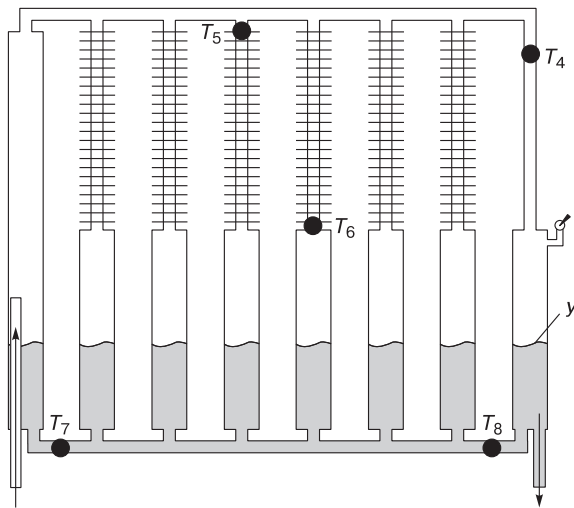


Рис. 4. Уровень жидкости в конденсаторе ( $y$ ).

$T_i$  – термометрические датчики.

Жидкость в конденсаторе имеет уровень  $y$ , который может меняться в ходе проведения эксперимента (рис. 4). На входе в конденсатор находится труба (стрелка вверх на рис. 4), конец которой всегда выше уровня жидкости в конденсаторе. Она выполняет функцию гидрозатвора, обеспечивающего движение жидкости в направлении от входа в конденсатор к выходу из него. Конденсатор находится выше труб испарителя на 3.1 м.

В экспериментальной установке тепловой поток на трубы испарителя обеспечивается путем подачи на него электрического тока, вследствие чего трубы нагреваются. Это позволяет получить тепловой поток, необходимый для моделирования работы в условиях теплового влияния сооружений, построенных на мерзлых грунтах. Электрическая схема нагрева труб приведена на рис. 5.

Переменный ток подается на трубы испарителя через понижающий трансформатор. Одна клемма трансформатора соединена с точкой А, вторая – с точками В. Так как труба входа в конденсатор и труба выхода из него имеют один и тот же электрический потенциал, ток через конденсатор не течет.

Температура труб испарителя измерялась термометрическими датчиками  $T_1$ ,  $T_2$  и  $T_3$ , расположенными в начале, середине и конце испарителя (см. рис. 5). Температура оребрения конденсатора измерялась температурными датчиками  $T_4$ ,  $T_5$  и  $T_6$  (см. рис. 4), а температура воздуха – датчиком  $T_9$ , вынесенным на некоторое расстояние от установки. Скорость течения жидкого хладагента на выходе из конденсатора определялась ультразвуковым расходомером StreamLux SLS-700F.

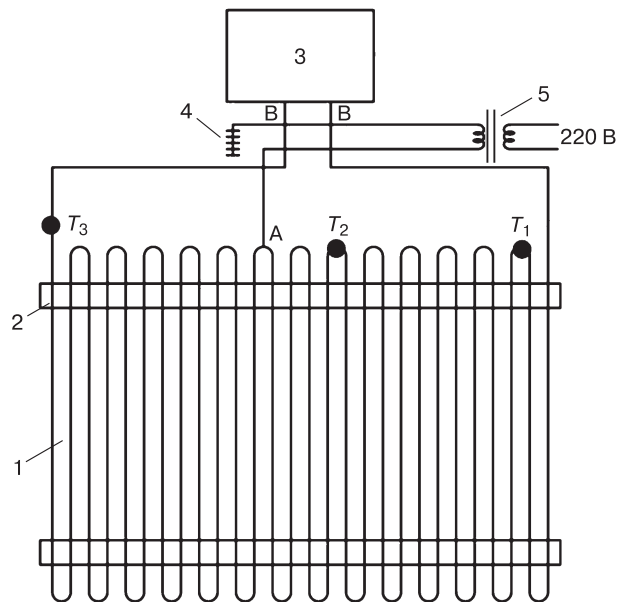


Рис. 5. Вид установки сверху и схема нагрева труб:

1 – трубы в скорлупе из пенополиуретана; 2 – подложка поверхности установки системы; 3 – конденсатор; 4 – заземление; 5 – понижающий трансформатор.

### Функционирование экспериментальной установки при различных тепловых нагрузках на испаритель

В ходе экспериментов при подаче тепловых нагрузок на испаритель ниже 2 кВт (6.58 Вт/м) были зафиксированы пульсации потока жидкости из конденсатора в испаритель. Всего проведено четыре эксперимента с низкими значениями тепловой нагрузки: 0.734, 1.05, 1.51 и 2.05 кВт. Проведено исследование данных пульсаций.

Как видно на рис. 6, зависимости скорости жидкости ( $v$ ) на выходе из конденсатора являются квазипериодическими, что позволяет представить их в виде рядов Фурье. Любую периодическую функцию  $f(\tau)$  можно записать в следующем виде:

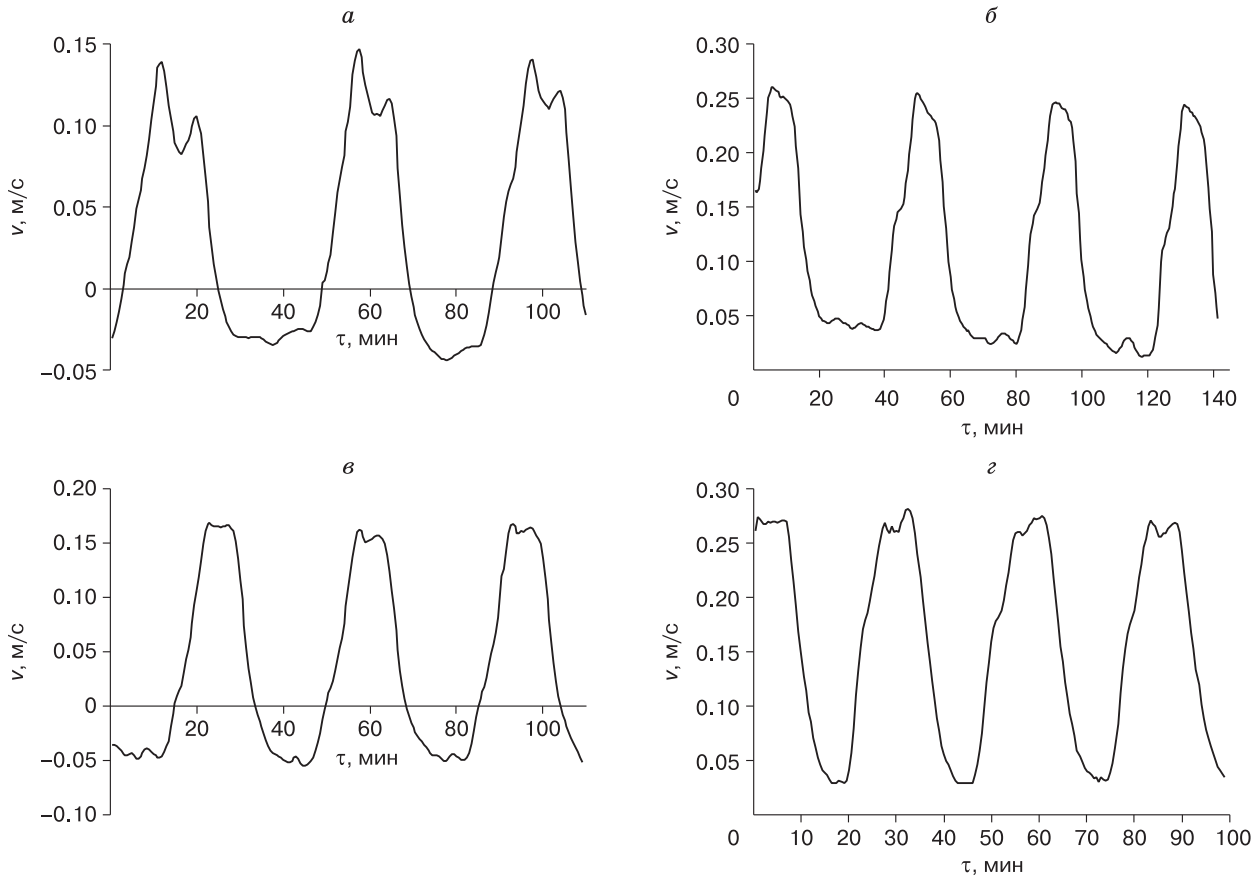
$$f(\tau) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left( a_n \cos\left(\frac{2\pi n\tau}{T}\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi n\tau}{T}\right) \right), \quad (5)$$

где  $T$  – период функции, а коэффициенты  $a_n$  и  $b_n$  задаются выражениями

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(\tau) \cos\left(\frac{2\pi n\tau}{T}\right) d\tau, \quad (6)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(\tau) \sin\left(\frac{2\pi n\tau}{T}\right) d\tau.$$

Разложим в ряд Фурье функцию, приведенную на рис. 6, а. Для этого рассмотрим три значения времени, при которых функция пересекает



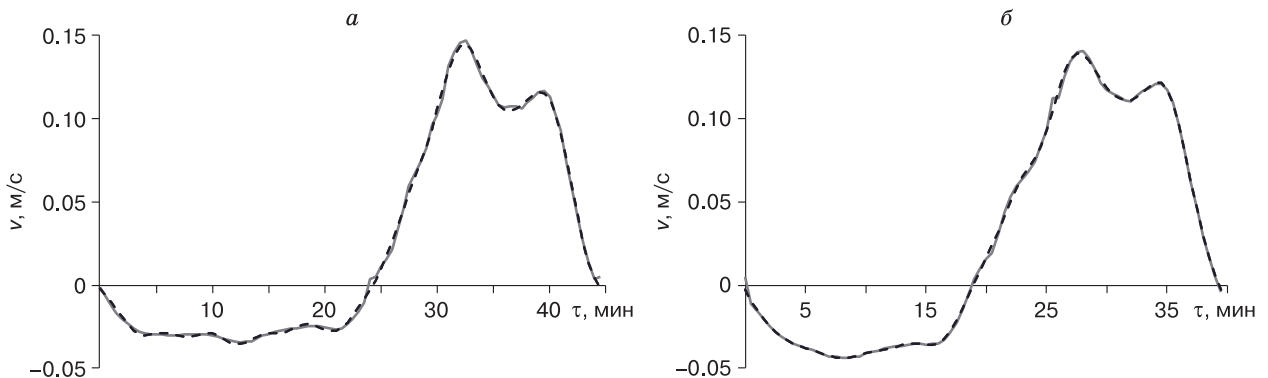
**Рис. 6. Зависимость скорости жидкости ( $v$ ) на выходе из конденсатора от времени ( $\tau$ ) при различных тепловых мощностях через сутки после включения установки:**

$a$  – 0.734 кВт;  $б$  – 1.05 кВт;  $в$  – 1.51 кВт;  $г$  – 2.05 кВт.

линию  $v = 0$  и одновременно убывает. Получаем три значения:  $\tau_0 = 24.5$  мин,  $\tau_1 = 69$  мин,  $\tau_2 = 108.5$  мин. Период, содержащий средний пик,  $T_1 = \tau_1 - \tau_0 = 44.5$  мин. Период, содержащий крайний правый пик,  $T_2 = \tau_2 - \tau_1 = 39.5$  мин. Разложение в ряд Фурье (5), (6) по периоду, содержаще-

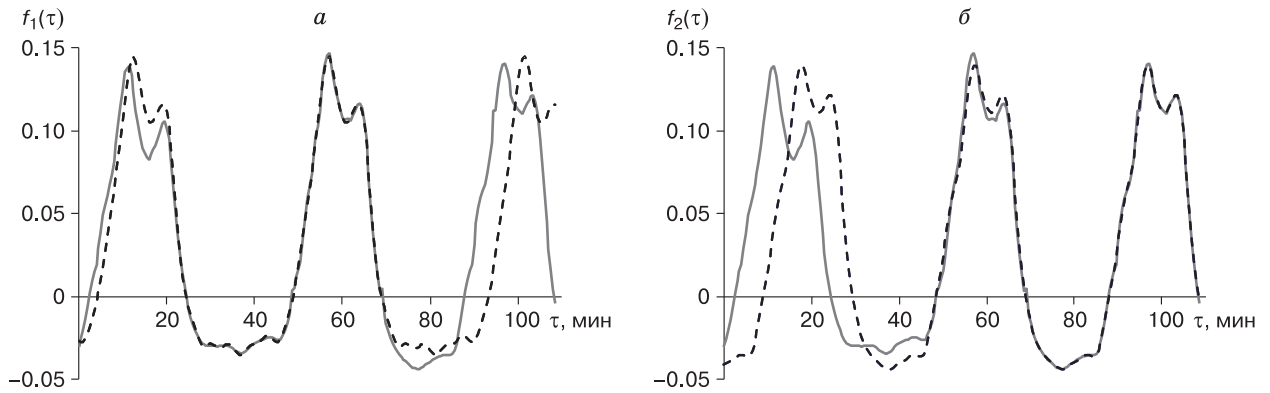
му средний и правый пики, дает следующую картину (рис. 7).

Здесь и далее выбрана такая система отсчета, в которой проекция вектора скорости жидкости положительна при течении жидкости из конденсатора в испаритель и отрицательна при течении



**Рис. 7. Сравнение экспериментальных значений скорости жидкости на выходе из конденсатора с теоретическими для среднего ( $a$ ) и правого ( $б$ ) пиков (см. рис. 6,  $a$ ).**

Сплошная линия – экспериментальные данные, штриховая – теоретические данные.



**Рис. 8.** Сравнение функций  $f_1(a)$  и  $f_2(b)$  с экспериментальными данными ( $P = 0.734$  кВт).

Сплошная линия – экспериментальные данные, штриховая – теоретические данные.

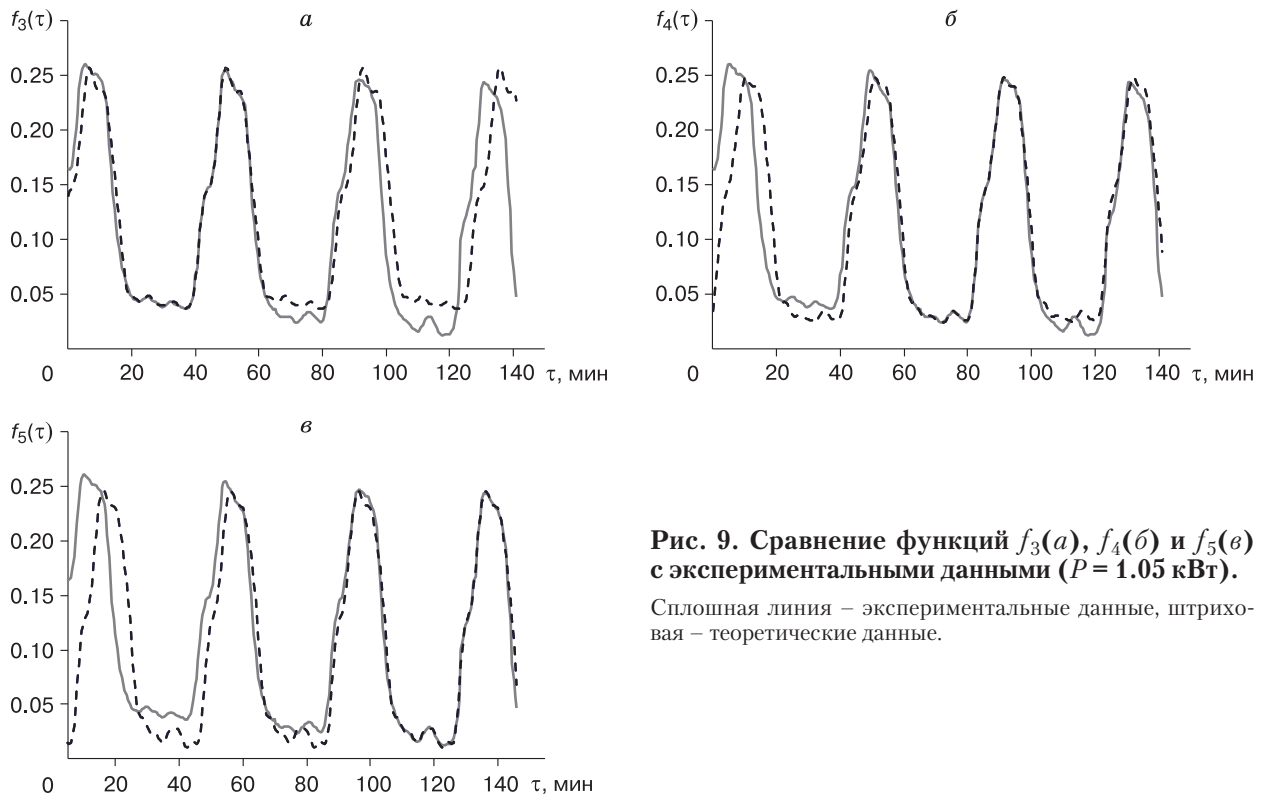
жидкости из испарителя в конденсатор. Как следует из рис. 7, полученные функции  $f_1(\tau)$  и  $f_2(\tau)$  хорошо описывают средний и правый пики.

На рис. 8 представлено сравнение аппроксимирующих функций с экспериментальными данными на протяжении эксперимента.

Как видно на рис. 8, функция  $f_2(\tau)$  хорошо описывает средний и крайний правый пики, в то время как  $f_1(\tau)$  удовлетворительно описывает средний и крайний левый пики. Невозможность описать все пики одной функцией при тепловой мощности 0.734 кВт говорит о том, что период и амплитуда пиков смещались под воздействием

внешних условий, которые менялись во время проведения эксперимента. Замечено также, что при данной низкой мощности нестабильно работал трансформатор, чем, вероятно, вызвано различие скоростей жидкости на выходе из конденсатора.

Разложим в ряд Фурье функцию, приведенную на рис. 6, б. Для этого рассмотрим три значения времени, при которых функция пересекает линию  $v = 0.1$  м/с и одновременно убывает. Получаем:  $\tau_0 = 16$  мин,  $\tau_1 = 59$  мин,  $\tau_2 = 99.5$  мин,  $\tau_3 = 139.5$  мин. Период, содержащий второй по времени пик,  $T_1 = \tau_1 - \tau_0 = 43$  мин; период, содержащий третий пик,  $T_2 = \tau_2 - \tau_1 = 40.5$  мин; период,



**Рис. 9.** Сравнение функций  $f_3(a)$ ,  $f_4(b)$  и  $f_5(e)$  с экспериментальными данными ( $P = 1.05$  кВт).

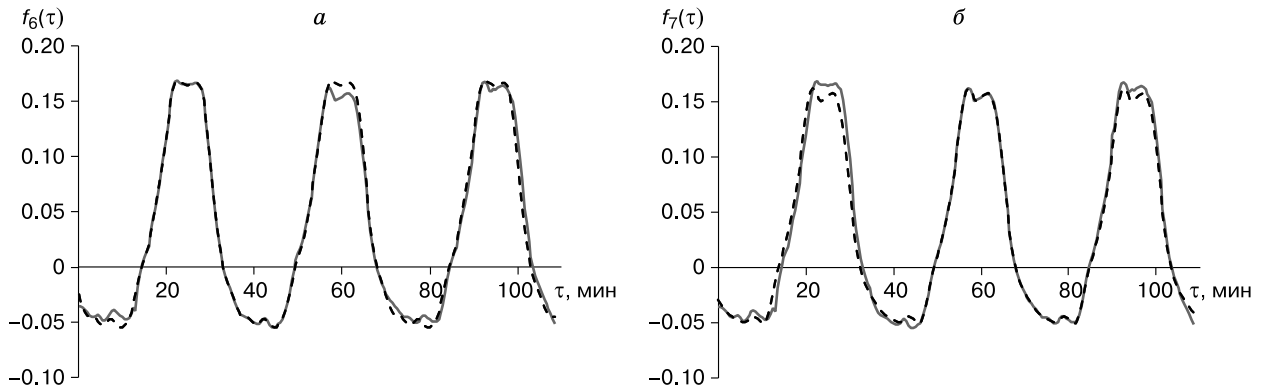
Сплошная линия – экспериментальные данные, штриховая – теоретические данные.

содержащий четвертый пик,  $T_3 = \tau_3 - \tau_2 = 40$  мин. Воспользовавшись методикой, описанной выше, разложим в ряд Фурье функцию, представленную на рис. 6, б, согласно формулам (5), (6), по периоду, содержащему второй, третий и четвертый по времени пики. Из полученных функций  $f_3, f_4, f_5$  функция  $f_4(\tau)$  имеет наилучшее соответствие и приведена на рис. 9.

Разложим в ряд Фурье функцию, приведенную на рис. 6, в. Для этого рассмотрим три значения времени, при которых функция пересекает линию  $v = 0$  и одновременно возрастает. Получаем:  $\tau_0 = 14$  мин,  $\tau_1 = 49$  мин,  $\tau_2 = 84.5$  мин. Период, содержащий первый по времени пик,  $T_1 = \tau_1 - \tau_0 =$

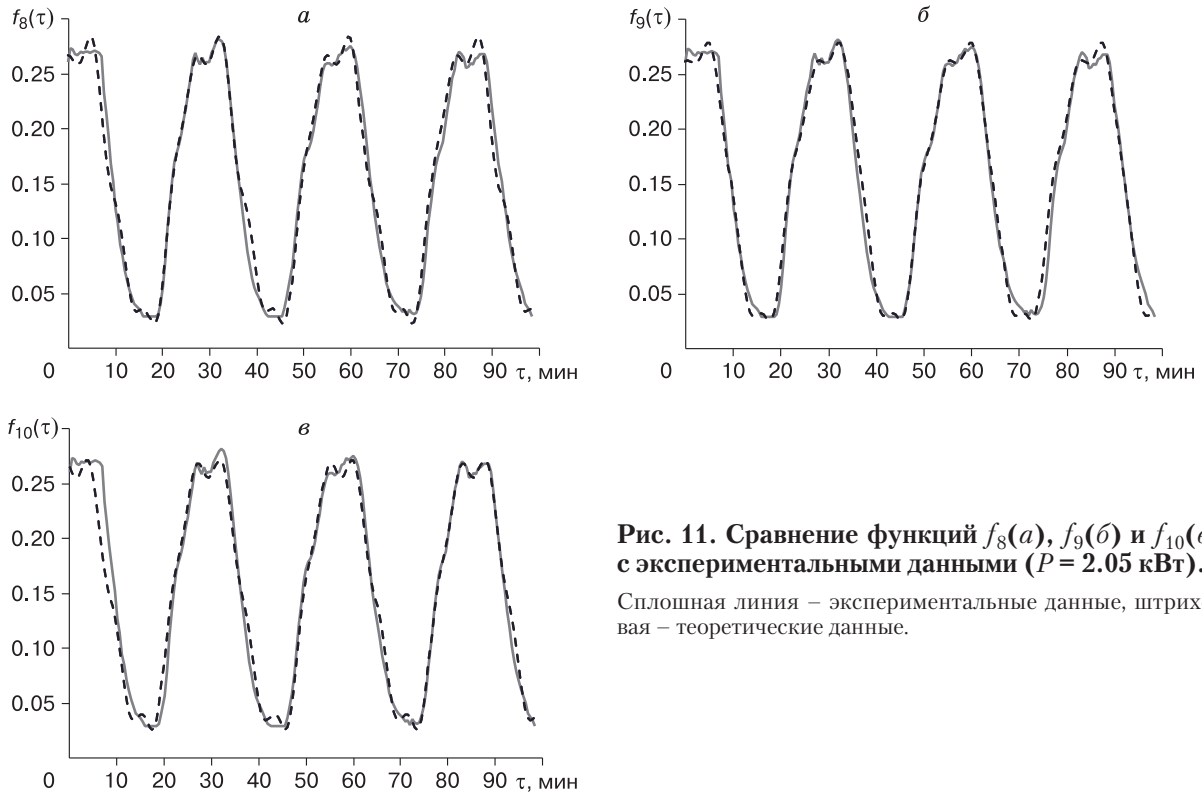
$= 35$  мин; период, содержащий второй пик,  $T_2 = \tau_2 - \tau_1 = 35.5$  мин. Используя ту же методику, разложим в ряд Фурье функцию, представленную на рис. 6, в, согласно формулам (5), (6), по периоду, содержащему второй, третий и четвертый по времени пики. Из полученных функций  $f_6$  и  $f_7$  функция  $f_6(\tau)$  имеет наилучшее соответствие и приведена на рис. 10.

Разложим в ряд Фурье функцию, представленную на рис. 6, г. Для этого рассмотрим три значения времени, при которых функция пересекает линию  $v = 0.1$  м/с и одновременно убывает. Получаем:  $\tau_0 = 10.5$  мин,  $\tau_1 = 38$  мин,  $\tau_2 = 65.5$  мин,  $\tau_3 = 93.5$  мин. Период, содержащий второй по вре-



**Рис. 10. Сравнение функций  $f_6(a)$  и  $f_7(b)$  с экспериментальными данными ( $P = 1.51$  кВт).**

Сплошная линия – экспериментальные данные, штриховая – теоретические данные.



**Рис. 11. Сравнение функций  $f_8(a)$ ,  $f_9(b)$  и  $f_{10}(v)$  с экспериментальными данными ( $P = 2.05$  кВт).**

Сплошная линия – экспериментальные данные, штриховая – теоретические данные.

Средняя скорость жидкости ( $v$ ) на выходе из конденсатора для стационарного режима при больших мощностях ( $P$ ) и осциллирующего режима с обратным (слева) и прямым (справа) движением жидкости в минимумах осцилляций

$P$ , кВт	$v$ , м/с	$P$ , кВт	$v$ , м/с
0.734	0.0265	1.05	0.102
1.51	0.0366	2.05	0.155
2.07	0.059	3.62	0.126
3.62	0.126	6.25	0.164
6.25	0.164	7.89	0.183
7.89	0.183		

мени пик,  $T_1 = \tau_1 - \tau_0 = 27.5$  мин; период, содержащий третий пик,  $T_2 = \tau_2 - \tau_1 = 27.5$  мин; период, содержащий четвертый пик,  $T_3 = \tau_3 - \tau_2 = 28$  мин. Разложим в ряд Фурье функцию, приведенную на рис. 6, з, согласно формулам (5), (6), по периоду, содержащему второй, третий и четвертый по времени пики. Из двух функций  $f_8$  и  $f_{10}$  функция  $f_8(\tau)$  имеет наилучшее соответствие и приведена на рис. 11.

Далее были выполнены эксперименты при больших тепловых мощностях, подаваемых на испаритель. При этом флуктуаций скорости жидкости на выходе из конденсатора не наблюдалось.

Результаты анализа средней скорости жидкости на выходе из конденсатора в стационарном режиме и скорости жидкости для осциллирующего режима (средняя скорость равна  $0.5a_0$ ) приведены в таблице.

Результат визуализации обеих зависимостей, аппроксимированных сплайном, представлен на рис. 12. При мощности выше 3.60 кВт (11.84 Вт/м) наблюдается стационарный режим течения (здесь кривые совпадают).

### ВЫВОДЫ

1. Показано, что система, заправленная диоксидом углерода, эффективнее охлаждает грунт, чем аналогичная система, в которой в качестве хладагента выступает аммиак.

2. Обнаружено три режима течения хладагента в установке: стационарный (при больших мощностях), пульсирующий с изменением направления скорости, пульсирующий без изменения направления скорости. При всех трех режимах установка работала и эффективно отводила тепло от испарителя в атмосферу.

3. Показано, что при тепловых нагрузках на испарительную часть выше 3.60 кВт (11.84 Вт/м) наблюдается стационарный режим течения хладагента. Использование этого значения позволяет подобрать наилучшую конфигурацию системы, однако данный вопрос требует дополнительных исследований.

Работа выполнена при финансовой поддержке АНО "Тюбинская академия".

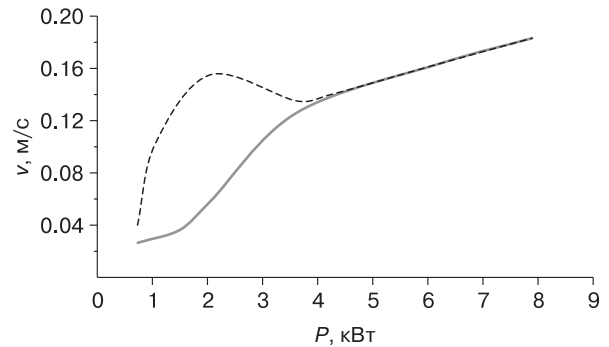


Рис. 12. Зависимость скорости жидкости на выходе из конденсатора ( $v$ ) от мощности ( $P$ ), подаваемой на испаритель.

Сплошная линия – пульсирующий режим с изменением направления скорости потока; штриховая линия – пульсирующий режим без изменения скорости потока (см. таблицу).

### Литература

Аникин Г.В., Спасеникова К.А. О выборе хладагента для сезонных охлаждающих устройств типа "ГЕТ" // Криосфера Земли, 2014, т. XVIII, № 2, с. 31–33.

Горелик Я.Б. Причины неустойчивой работы двухфазного естественно-конвективного охлаждающего устройства с горизонтальным испарителем // Криосфера Земли, 2015, т. XIX, № 4, с. 81–93.

Долгих Г.М., Окунев С.Н. Разработка природоохранных мероприятий, экологически безвредных технологий и оборудования для освоения газовых, газоконденсатных месторождений полуострова Ямал // Отчет о НИР. Тюмень, Гипротюменнефтегаз, 1989, 152 с.

Ишков А.А., Аникин Г.В., Долгих Г.М., Окунев С.Н. Сравнение результатов физико-математического моделирования системы "ГЕТ" с экспериментальными данными // Криосфера Земли, 2018, т. XXII, № 5, с. 57–64.

Основы геокриологии. Ч. 5. Инженерная геокриология / Под ред. Э.Д. Ершова. М., Изд-во Моск. ун-та, 1999, 526 с.

Феклистов В.Н., Долгих Г.М., Окунев С.Н., Паздерин Д.С. Исследование охлаждающей системы типа "ГЕТ" для термостабилизации грунтовых оснований // Материалы Междунар. конф. "Криогенные ресурсы полярных и горных регионов. Состояние и перспективы инженерного мерзловедения". Тюмень, 2008, т. 2, с. 165–168.

Farouki O.T. Thermal Properties of Soils. Clausthal-Zellerfeld, Germany, Trans. Tech. Publications, 1986, 136 p.

Holubec I. Flat loop thermosyphon foundations in warm permafrost // Report submitted to the Government of the Northwest Territories, Asset Management Division. Department of Public Works and Services, and Public Infrastructure Engineering Vulnerability Committee, 2008, 83 p.

Holubec I. Geotechnical site investigation guidelines for building foundations in permafrost // Report submitted to the Government of the Northwest Territories. Department of Public Works and Services, 2010, 48 p.

Long E.L. The long thermopile // Proc. of the First Intern. Conf. on Permafrost. Purdue University, US Nat. Acad. of Sci., 1963, p. 487–490.



## References

- Anikin G.V., Spasennikova K.A. On the choice of refrigerating fluid for type "GET" systems for seasonal cooling. *Earth's Cryosphere*, 2014, vol. XVIII, No. 2, p. 26–28.
- Gorelik J.B. Operation of two-phase thermosyphons with horizontal evaporator tubes: causes of instability. *Earth's Cryosphere*, 2015, vol. XIX, No. 4, p. 74–83.
- Dolgikh G.M., Okunev S.N. Nature conservation measures, environment-friendly technologies, and equipment for development of new gas and condensate fields in the Yamal Peninsula. In: *Otchet o NIR [Research Activity Report]*. Tyumen, Giprotymenneftegaz, 1989, 152 p. (in Russian).
- Ishkov A.A., Anikin G.V., Dolgikh G.M., Okunev S.N. Horizontal evaporator tube (HET) thermosyphons: physical-mathematical modeling and experimental data, compared. *Earth's Cryosphere*, 2018, vol. XXII, No. 5, p. 51–56.
- Osnovy geokriologii. Pt 5. Inzhenernaya geokriologiy [Fundamentals of Geocryology. Part 5. Engineering Geocryology]. E.D. Ershov (ed.). Moscow, Moscow University Press, 1999, 526 p. (in Russian).
- Feklistov V.N., Dolgikh G.M., Okunev S.N., Pazderin D.S. Investigation into HET thermosyphons for soil stabilization. In: *Resources of Polar and Highland Areas. State and Prospects of Geocryology: Proc. Intern. Conf. Tyumen, Book 2, 2008*, p. 165–168.
- Farouki O.T. *Thermal Properties of Soils*. Clausthal-Zellerfeld, Germany, Trans. Tech. Publications, 1986, 136 p.
- Holubec I. Flat loop thermosyphon foundations in warm permafrost. Report submitted to the Government of the Northwest Territories, Asset Management Division. Department of Public Works and Services, and Public Infrastructure Engineering Vulnerability Committee, 2008, 83 p.
- Holubec I. Geotechnical site investigation guidelines for building foundations in permafrost. In: Report submitted to the Government of the Northwest Territories. Department of Public Works and Services, Canada, 2010, 48 p.
- Long E.L. The long thermopile. In: *Proceedings of the First International Conference on Permafrost*. Purdue University, US National Academy of Sciences, USA, 1963, p. 487–490.

*Поступила в редакцию 28 октября 2019 г.,  
после доработки – 21 января 2020 г.,  
принята к публикации 31 января 2020 г.*