

УДК 624.139+624.148.5

**Р.Н. Габидуллин<sup>1</sup>**, e-mail: rasim\_gabidullin@mail.ru; **Т.Р. Мустафин<sup>1</sup>**, e-mail: st.kafedra@mail.ru

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (Уфа, Россия).

## Влияние механических повреждений оребрения конденсатора термостабилизаторов грунта на эффективность их работы

В статье приводятся результаты исследований влияния механических повреждений оребрения конденсаторов термостабилизаторов грунта на эффективность их работы. Установлено, что в практике строительства все чаще отмечается применение сезонно-действующих охлаждающих устройств с повреждениями на поверхности конденсатора в виде смятых ребер. В то же время количественные показатели дефектов оребрения конденсаторов в нормативно-технических документах не регламентируются.

В целях изучения изменений температурного поля, доли незамерзшей воды и производимой термостабилизаторами мощности были построены теплотехнические модели для термостабилизатора грунта, работающего без дефектов оребрения конденсатора, а также имеющего механические повреждения оребрения конденсаторной части с уменьшением площади поверхности контактирования конденсатора с холодным ветровым воздействием на 10 %.

По построенным моделям проведен вычислительный эксперимент, в ходе которого, в частности, установлено, что при работе термостабилизатора грунта с неповрежденным оребрением конденсаторной части на границе области замораживания достигается максимально низкая температура, составляющая  $-1,96$  °С, тогда как при работе термостабилизатора с повреждением оребрения конденсатора температура в этой же зоне повышается до  $-1,41$  °С. Максимально низкая температура при работе устройства с повреждением оребрения зафиксирована при меньшем радиусе замораживания грунта. Разница между радиусом замораживания неповрежденного и поврежденного термостабилизаторов составляет 66–67 мм, т. е. радиус уменьшается на 12 %.

Расчет холодопроизводительности термостабилизаторов продемонстрировал снижение мощности с 243 до 236 Вт при уменьшении площади поверхности конденсатора на 10 %, что свидетельствует о недопустимости применения при строительстве устройств с повреждением такого уровня.

На основе проведенных исследований предлагается включить в формулу расчета для определения радиуса замораживания коэффициент запаса 5 %, а также ввести норму, в соответствии с которой термостабилизаторы грунта с повреждением площади поверхности оребрения конденсаторной части более 7 % должны быть отбракованы.

**Ключевые слова:** термостабилизатор грунта, сезонно-действующее охлаждающее устройство, многолетнемерзлый грунт, смятие, оребрение конденсатора, испаритель, механические повреждения, радиус замораживания.

.....

**R.N. Gabidullin<sup>1</sup>**, e-mail: rasim\_gabidullin@mail.ru; **T.R. Mustafin<sup>1</sup>**, e-mail: st.kafedra@mail.ru

<sup>1</sup> State Federal-Funded Educational Institution of Higher Professional Training "Ufa State Petroleum Technological University" (Ufa, Russia).

## The Effect of Mechanical Damage to the Condenser Fins of Soil Thermal Stabilizers on the Efficiency of Their Work

The article presents the results of studies of the effect of mechanical damage to the condenser fins of soil thermal stabilizers on the efficiency of their work. It has been established that in construction practice the use of seasonally acting cooling devices with damage on the surface of the condenser in the form of crumpled ribs is increasingly noted. At the same time, the quantitative indicators of defects in the condenser fins are not regulated in regulatory and technical documents.

In order to study changes in the temperature field, the percentage of unfrozen water and the power produced by thermal stabilizers, heat engineering models of the soil thermal stabilizer without defects in the fins of the condenser, as well

as the thermal stabilizers with mechanical damage to the condenser fins with a decrease in the contact surface area of the condenser with cold wind exposure by 10%, were built.

Based on the constructed models, a computational experiment was conducted, during which, in particular, it was found that the maximum low temperature during operation of the soil thermal stabilizer with undamaged fins of the condenser part at the freezing region boundary is  $-1.96\text{ }^{\circ}\text{C}$ , while the temperature in the same zone rises up to  $-1.41\text{ }^{\circ}\text{C}$  during operation of the thermal stabilizer with damage to the condenser fins. The maximum low temperature during operation of the device with damage to the fins is fixed with a smaller radius of soil freezing. The difference between the freezing radius of an undamaged and damaged thermal stabilizer is 66–67 mm, so the radius decreases by 12 %.

The calculation of the cooling capacity of thermostabilizers showed a decrease in power from 243 to 236 W with a decrease in the surface area of the condenser by 10 %, which indicates the inadmissibility of the use of devices with such a level of damage in construction.

Based on the calculations, it is proposed to include a safety coefficient of 5 % in the calculation formula for determining the freezing radius, and also introduce a rejection rate in accordance with which soil thermal stabilizers with damage to the surface area of the condenser fins of more than 7 % should be rejected.

**Keywords:** soil thermal stabilizer, seasonally acting cooling device, permafrost soil, condenser fins, mechanical damage, radius of freezing.

## ВВЕДЕНИЕ

За последние 10 лет технология термостабилизации грунтов получила широкое распространение, что обусловлено как экономическими преимуществами, так и невозможностью обойтись без применения систем термостабилизации при строительстве на территории криолитозоны в соответствии с принципом I использования мерзлых грунтов в качестве оснований сооружений [1]. В случаях, когда использование технологии насыпного грунта и устройства в нем вентиляционных каналов, неотапливаемого первого этажа, теплоизоляционной вставки между фундаментом сооружения и мерзлым грунтом и проветриваемых подполий не обеспечивает в достаточной степени сохранность основания грунтов из-за увеличения объемов строительства и прогрессирующего глобального потепления, выходом может стать применение систем искусственного замораживания грунтов. Поэтому перед внедрением данных систем необходимо просчитать все возможные модели работы термостабилизатора грунта (ТСГ) в конкретных условиях эксплуатации с учетом всех факторов, влияющих на его работу.

К числу основных причин неэффективной работы ТСГ относятся механические

Таблица 1. Характеристика и геометрические размеры термостабилизатора грунта ТК32/10

Table 1. Description and geometrics of the soil thermostabilizer TK32/10

| Показатель<br>Index  | Значение<br>Value  |
|--|--|
| Хладагент<br>Cooling agent   | Аммиак<br>Ammonia  |
| Диаметр оребрения конденсатора, мм<br>Ribbing capacitor diameter, mm                     | 67   |
| Материал оребрения<br>Ribbing material   | Алюминий<br>Aluminium  |
| Теплопроводность алюминия, Вт/(м·°C)<br>Aluminium heat conductivity, W/(m·°C)            | 203,5  |
| Тип оребрения<br>Ribbing type  | Поперечное, круглое<br>Lateral, round                                    |
| Шаг ребер, мм<br>Rib spacing, mm   | 2,5  |
| Толщина ребер, мм<br>Rib thickness, mm   | 1,0  |
| Длина оребрения конденсатора, мм<br>Capacitor ribbing length, mm                         | 900  |
| Площадь оребрения конденсатора, м <sup>2</sup><br>Capacitor ribbing area, m <sup>2</sup> | 1,58   |
| Диаметр корпуса испарителя, мм<br>Evaporator body diameter, mm                           | 33,7   |
| Толщина стенки корпуса, мм<br>Body wall thickness, mm                                    | 3,5  |
| Длина корпуса испарителя, мм<br>Evaporator body length, mm                               | 7040   |
| Длина теплоизоляции на испарителе, мм<br>Evaporator heat insulation length, mm           | 2000 (на глубину деятельного слоя)<br>2000 (down the active layer depth) |

Ссылка для цитирования (for citation):

Габидуллин Р.Н., Мустафин Т.Р. Влияние механических повреждений оребрения конденсатора термостабилизаторов грунта на эффективность их работы // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2019. № 12. С. 64–74.

Gabidullin R.N., Mustafin T.R. The Effect of Mechanical Damage to the Condenser Fins of Soil Thermal Stabilizers on the Efficiency of Their Work. Territorija "NEFTEGAS" [Oil and Gas Territory]. 2019;(12):64–74. (In Russ.)

Таблица 2. Значения температур, скорости ветра и высоты снежного покрова для Ново-Уренгойского месторождения

Table 2. Values of temperature, wind speed and height of snow mantle for the Novo-Urengoiskoe field

| Наименование<br>Description   | Месяц<br>Month |      |      |      |     |     |     |     |     |      |      |      | Средняя в год<br>Average per year |
|---|----------------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|-----------------------------------|
|   | 1              | 2    | 3    | 4    | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10   | 11   | 12   |                                   |
| Температура воздуха, °С<br>Air temperature, °С                        | -26            | -22  | -13  | -6   | 0   | 14  | 17  | 15  | 7   | -3   | -12  | -24  | -4,7                              |
| Скорость ветра, м/с<br>Wind speed, m/s                                | 4,8            | 4,1  | 4,3  | 4,4  | 4,8 | 4,7 | 4,0 | 4,0 | 4,5 | 4,9  | 4,4  | 4,6  | 4,45                              |
| Высота снежного покрова, м<br>Height of snow mantle, m                | 0,29           | 0,31 | 0,33 | 0,28 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0,14 | 0,19 | 0,26 | -                                 |
| Плотность снега, кг/м <sup>3</sup><br>Snow density, kg/m <sup>3</sup> | 275            | 290  | 320  | 335  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 180  | 225  | 240  | -                                 |

Таблица 3. Температурное распределение по глубине грунта по состоянию на 15.01.2019

Table 3. Temperature distribution along the soil depth as of 15.01.2019

| Глубина грунта, м<br>Soil depth, m | Температура грунта, °С<br>Soil temperature, °С |
|------------------------------------|--|
| 0                                  | -0,18  |
| 1                                  | -0,42  |
| 2                                  | -0,36  |
| 3-4                                | -0,30  |
| 5-6                                | -0,26  |
| 7-9                                | -0,28  |
| 10                                 | -0,30  |
| 11                                 | -0,34  |
| 12-13                              | -0,35  |
| 14-16                              | -0,33  |
| 16-17                              | -0,34  |

Таблица 4. Теплофизические свойства грунтов

Table 4. Thermaphysic soil properties

| Параметр<br>Parameter  | Значение<br>Value            |                                |
|--|------------------------------|--------------------------------|
|  | Слой песка I<br>Sand layer I | Слой песка II<br>Sand layer II |
| Объемная теплоемкость талого грунта, МДж/(м <sup>3</sup> ·°С)<br>Heat capacity per unit volume of slushy soil, MJ/(m <sup>3</sup> ·°C)   | 2,98                         | 2,37                           |
| Объемная теплоемкость мерзлого грунта, МДж/(м <sup>3</sup> ·°С)<br>Heat capacity per unit volume of frozen soil, MJ/(m <sup>3</sup> ·°C) | 2,29                         | 2,12                           |
| Теплопроводность талого грунта, Вт/(м·°С)<br>Thermal conductivity of slushy soil, W/(m·°C)   | 1,83                         | 1,75                           |
| Теплопроводность мерзлого грунта, Вт/(м·°С)<br>Thermal conductivity of frozen soil, W/(m·°C)   | 2,09                         | 1,89                           |
| Плотность сухого грунта, кг/м <sup>3</sup><br>Density of dry soil, kg/m <sup>3</sup>   | 1550                         | 1600                           |
| Суммарная весовая влажность грунта, %<br>Total soil gravimetric moisture, %  | 16                           | 20                             |
| Температура фазового перехода, °С<br>Phase transition temperature, °C  | -0,12                        | -0,24                          |
| Число пластичности Ip<br>Plasticity number Ip  | 0,01                         | 0,018                          |
| Расчетная область, м<br>Calculated area, m   | 20 × 20 × 7                  | 20 × 20 × 9                    |

повреждения оребрения конденсаторной части. Оребрение, изготавливаемое из алюминия толщиной 1,0–1,5 мм, необходимо для эффективной работы термостабилизатора, но является легкоповреждаемым элементом устройства. Зачастую оребрение повреждается в ходе транспортировки и в процессе монтажа.

Стоит отметить, что существующие нормативные документы не содержат требований и решений для проведения качественного монтажа термостабилизатора, исключая повреждения оребрения конденсаторной части. Так, в действующих нормативно-технических документах [1–3], в т. ч. отраслевых, не приведены значения количественных показателей повреждений оребрения конденсаторной части ТСГ, которые можно использовать как нормы отбраковки. В частности, в [2] указано, что «при обнаружении механических повреждений (вмятин, трещин, смятий, перегибов) сезонно-действующие охлаждающие устройства (СОУ) отбраковываются с составлением соответствующего акта». При этом критерии отбраковки – по видам дефектов, их размерам и количеству на определенной площади – отсутствуют.

В данной статье представлены результаты исследования, целью которого были оценка влияния площади повреждения оребрения конденсаторной части на эффективность работы ТСГ и разработка рекомендаций к нормам отбраковки термостабилизаторов с повреждениями конденсаторов. Исследование было проведено в связи с участвовавшими случаями примене-

27-29  
АПРЕЛЯ 2020\*



РМЭФ

Российский Международный  
Энергетический Форум

XXVI МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА

 **ЭНЕРГЕТИКА И  
ЭЛЕКТРОТЕХНИКА**

КЛЮЧЕВАЯ  
ПЛОЩАДКА  
СФЕРЫ ТЭК

 ufi  
Approved  
Event



ENERGETIKA-RESTEC.RU

energo@restec.ru  
+7 (812) 303 88 68



ENERGYFORUM.RU

rief@expoforum.ru  
+7 (812) 240 40 40, доб. 2160, 2168

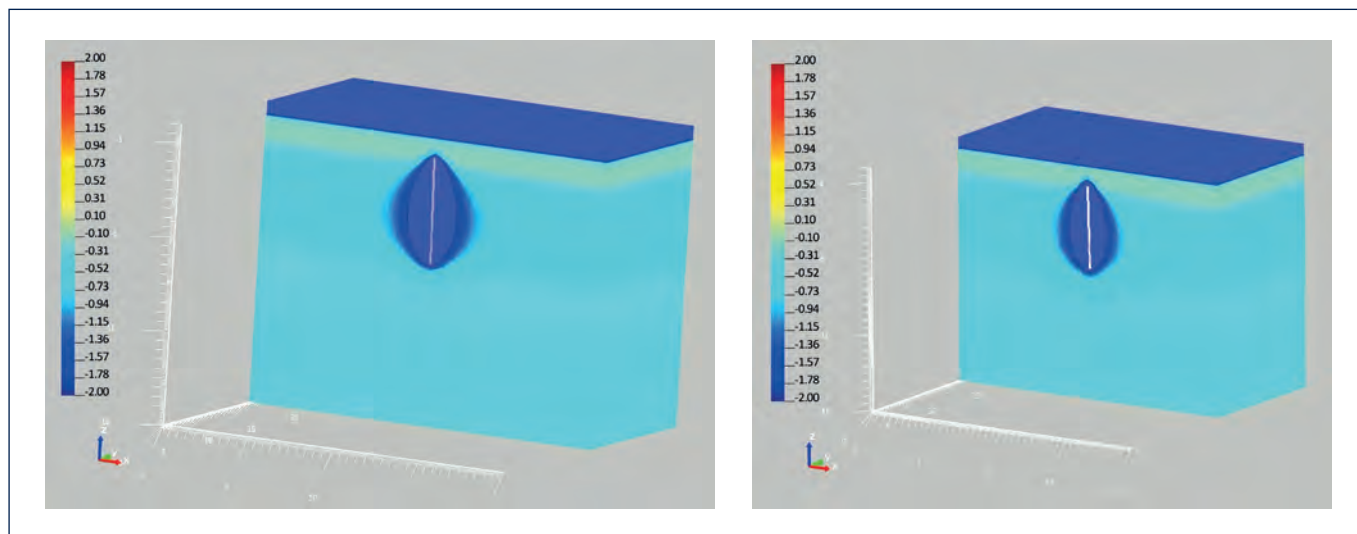
**EXPOFORUM**

КОНГРЕССНО-ВЫСТАВОЧНЫЙ ЦЕНТР  
**ЭКСПОФОРУМ**

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ  
ПЕТЕРБУРГСКОЕ ШОССЕ, 64/1

18+

\* Возможны изменения в сроках  
проведения мероприятия



а) а)

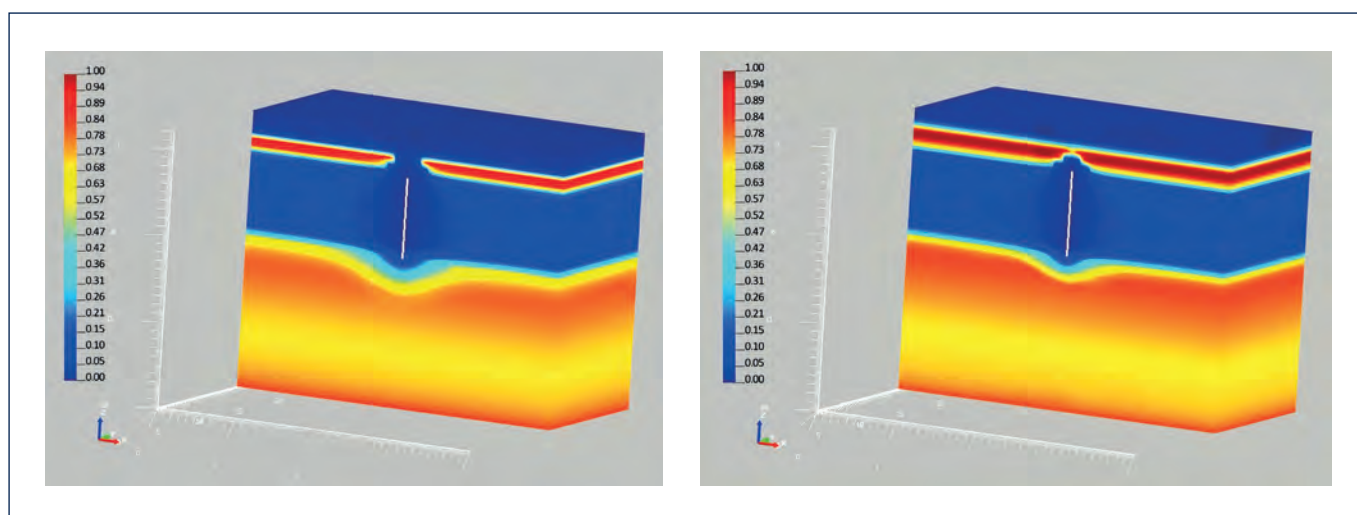
б) б)

Рис. 1. Температурный режим грунта в поперечном сечении в месте расположения термостабилизатора (расчет компьютерной модели на 15.12.2020 г.):

а) с неповрежденным оребрением конденсатора; б) с поврежденным на 10 % оребрением конденсатора

Fig. 1. Soil temperature conditions in cross-section at the thermostabilizer location point (computer model design as of 15.12.2020):

а) with nonfailed capacitor ribbing; б) with 10 % failed capacitor ribbing



а) а)

б) б)

Рис. 2. Доля незамерзшей воды в грунте в поперечном сечении моделируемой области в месте расположения термостабилизатора (расчет компьютерной модели на 15.12.2020 г.):

а) с неповрежденным оребрением конденсатора; б) с поврежденным на 10 % оребрением конденсатора

Fig. 2. Percentage of nonfrozen soil water in cross-section of the area under modeling at the thermostabilizer location point (computer model design as of 15.12.2020):

а) with nonfailed capacitor ribbing; б) with 10 % failed capacitor ribbing

ния при монтаже и эксплуатации СОУ с повреждениями конденсатора в виде смятых ребер.

## ДИЗАЙН ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводилось на территории строительства установки комплексной подготовки газа (УКПГ)

Ново-Уренгойского месторождения (Ямало-Ненецкий АО). На момент сбора информации из 4269 индивидуальных ТСГ, предусмотренных проектом, было смонтировано 3172 устройства. Согласно собранному статистическим данным, при выполнении монтажных работ известными методами на 10 смонтирован-

ных термостабилизаторов приходилось 1–2 с повреждениями площади оребрения конденсатора на 10 % и более, 2–3 – с меньшими повреждениями, 5–7 – без повреждений.

В рамках исследования были построены модели работы ТСГ с повреждениями в объеме 10 % площади оребрения

конденсаторной части и без дефектов. Также было проанализировано влияние механического повреждения оребрения конденсатора на эффективность работы ТСГ на примере термостабилизатора ТК32/10 (табл. 1).

Моделирование условий и их анализ проводились на платформе Simmakers в программе Frost 3D. Данные для моделирования и расчетов представлены в табл. 1–4. В частности, значения среднемесячных температур и скорости ветра приняты согласно [4]. В качестве грунтовых условий приняты два геологических слоя из песка по изысканиям проектных работ на территории строительства УКПГ. Характеристики слоев приведены в табл. 4.

В программном комплексе Frost 3D выполнено моделирование расчетной области, ограничивающейся характеристиками выбранных слоев грунта. Также заданы граничные условия с учетом параметров, приведенных в табл. 1–4, для моделируемых объектов – грунтов и СОУ. С помощью «Калькулятора расчета условий теплообмена» рассчитан коэффициент теплообмена конденсаторной части СОУ для выполнения численных расчетов при задании граничных условий на СОУ.

Вычислительным экспериментом является тепловой расчет компьютерной модели на четыре года начиная с 15 октября 2019 г. По результатам вычисления проанализировано влияние СОУ на грунт, представленное в виде трехмерной модели распределения температуры и доли незамерзшей воды в моделируемой области на рис. 1–2. Эффективность теплопередачи вычислялась в зависимости от площади оребрения термостабилизатора. Так, по [2] соотношение площадей теплообмена конденсатора и испарителя  $F_k/F_{и}$  должно составлять 1,2–2,0. Для термостабилизатора ТК32/10 данное соотношение равно 2,0.

Из рис. 1–2 видно, что при смятии 10 % оребрения конденсатора цветовая гамма области вокруг ТСГ становится светлее, т. е. уменьшается радиус замораживания грунта вокруг термостабилизатора. Это происходит из-за изменения температурного диапазона воздействия ТСГ на грунт.

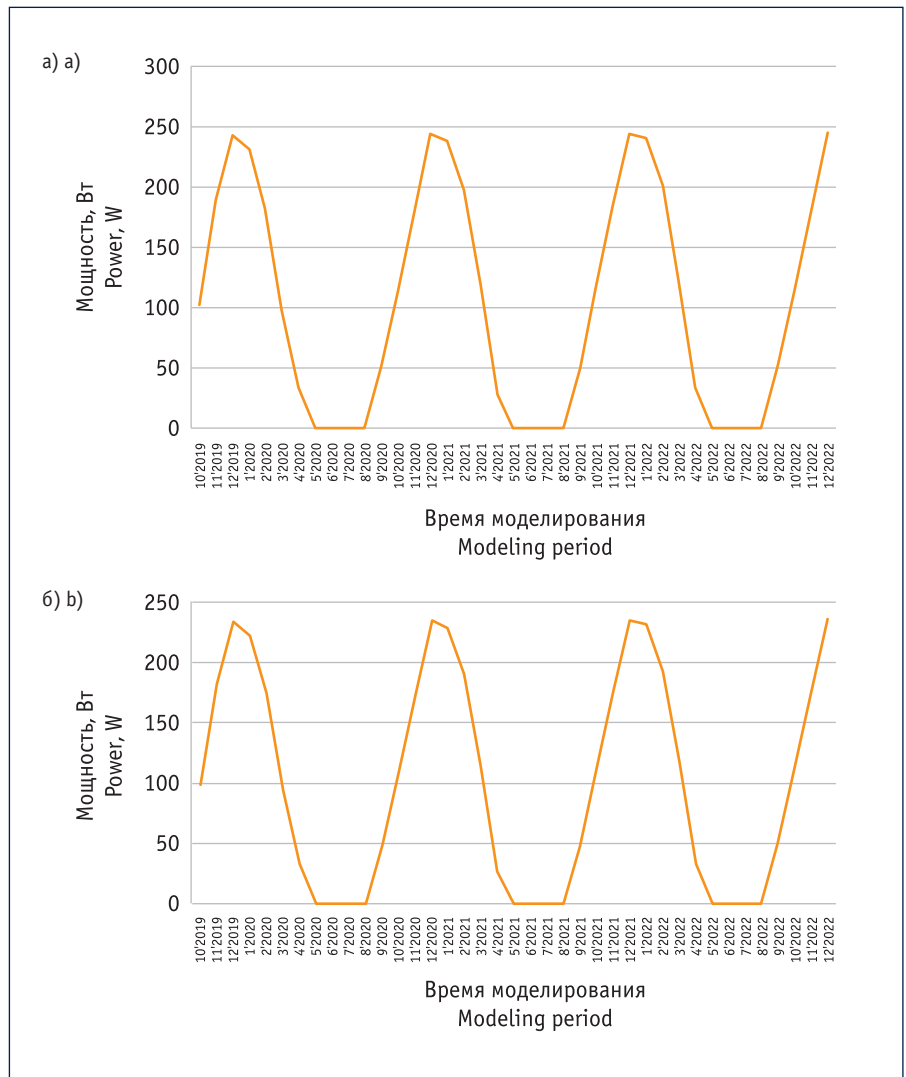


Рис. 3. График холодопроизводительности термостабилизатора за время моделирования с октября 2019 г. по декабрь 2022 г.:

а) с неповрежденным оребрением конденсатора; б) с поврежденным на 10 % оребрением конденсатора

Fig. 3. Thermostabilizer cooling power schedule during the modeling period from October 2019 to December 2022:

a) with nonfailed capacitor ribbing; b) with 10 % failed capacitor ribbing





Таблица 5. Значения коэффициента теплообмена между наружным воздухом и поверхностью конденсатора парожидкостного термосифона  $\alpha_{out}$  для гладких и оребренных труб конденсатора термосифона

Table 5. Values of thermal conductivity between open air and the capacitor vapour-liquid thermosyphon  $\alpha_{out}$  for smooth and ribbed pipes of the capacitor thermosyphon

| Радиус трубы конденсатора, мм<br>Capacitor pipe radius, mm | Коэффициент теплообмена $\alpha_{out}$ для гладких (числитель) и оребренных (знаменатель) труб конденсатора, Вт/(м <sup>2</sup> ·°C), при скорости ветра, м/с<br>Thermal conductivity $\alpha_{out}$ for smooth (numerator) and ribbed (denominator) pipes of the capacitor, W/(m <sup>2</sup> ·°C), under wind speed, m/s |         |         |         |         |
|--|--|---------|---------|---------|---------|
|  | 0  | 2       | 4       | 6       | 8       |
| 17   | 6,9/8,7  | 21/24,4 | 33/37,1 | 45/48,7 | 55/59,2 |
| 22   | 6,5/9,2  | 20/24,4 | 31/38,3 | 42/49,9 | 51/60,3 |
| 28,5   | 6,0/11,0   | 17/30,2 | 29/47,6 | 38/61,5 | 48/74,2 |
| 36,5   | 5,3/11,2   | 16/30,2 | 27/47,6 | 36/61,5 | 44/74,2 |
| 44,5   | 4,9/10,3   | 15/26,7 | 26/41,8 | 34/54,4 | 41/65,0 |
| 54   | 4,4/8,2  | 15/23,2 | 24/36,0 | 31/47,6 | 38/56,8 |
| 63,5   | 4,1/11,8   | 14/33,6 | 23/53,4 | 30/68,4 | 37/83,5 |
| 73   | 3,6/10,6   | 14/29,0 | 22/45,2 | 29/59,2 | 36/71,9 |
| 84   | 3,4/10,0   | 13/25,5 | 21/39,4 | 28/52,2 | 35/62,6 |

При работе ТСГ с неповрежденным оребрением конденсаторной части на границе области замораживания достигается максимально низкая температура  $-1,96$  °C. Однако при работе термостабилизатора с повреждением оребрения конденсатора температура в этой же зоне повышается до  $-1,41$  °C. Максимально низкая температура во втором случае наблюдается при меньшем радиусе замораживания грунта.

По данным рис. 26 видно, что доля незамерзшей воды в верхней площади области замораживания увеличивается при повреждении оребрения термоста-

билизатора в отличие от представленного на рис. 2а.

Результаты расчета эффективности работы СОУ представлены на рис. 3.

В соответствии с графиками холодопроизводительность в самый холодный период года снижается с 243 до 236 Вт. Кроме того, всех точках моделируемого расчета наблюдается снижение мощности.

### АЛГОРИТМ РАСЧЕТОВ

Расчет радиуса замораживания грунта был произведен в соответствии с [1] (номограмма для расчета представлена на рис. 4). В частности, для определе-

ния радиуса замораживания (рис. 5) была использована формула:

$$r_f = \eta_a \cdot r_p \quad (1)$$

где  $\eta_a$  – безразмерный параметр, определяемый по номограмме в зависимости от значений безразмерных параметров  $b, M, H_a; r_p$  – внешний радиус замораживающей колонки, м.

Данные для расчета содержатся в табл. 1–4. При вычислении необходимо учесть, что, если при смятии между соседними алюминиевыми ребрами сохранилось расстояние, куда могут свободно проходить холодные ветровые потоки,

# Cabex — энергия успеха



Ufi  
Approved  
Event

# Cabex

19-я Международная выставка  
кабельно-проводниковой  
продукции

17–19 марта 2020 года  
Москва, КВЦ «Сокольники»

- Кабели и провода
- Кабельная арматура
- Электромонтажные изделия
- Электротехнические изделия
- Оборудование для монтажа, переработки кабеля
- Материалы для производства кабеля

Реклама

Получите электронный  
билет по промокоду  
**M99-NA-3486**



Организаторы



Международная  
Выставочная  
Компания

+7 (495) 252 11 07  
cabex@mvk.ru



АССОЦИАЦИЯ  
ЭЛЕКТРОКАБЕЛЬ

Генеральный  
информационный партнер

**RusCable.Ru**

Энергетика. Электротехника. Связь.  
Первое отраслевое электронное СМИ ЭП № ФС77-28661

Специальный  
отраслевой партнер



Таблица 6. Данные численного расчета радиуса замораживания моделируемого термостабилизатора грунта  
 Table 6. Freezing radius numerical computation data of the model-based soil thermostabilizer

| №<br>No. | Плотное смятие ребер*, %<br>Compact crushing of ribs*, % | Количество ребер, шт.<br>Quantity of ribs, pcs. | Площадь поверхности оребрения конденсатора термосифона $S_{ct}$ , м <sup>2</sup><br>The area of thermosiphon capacitor ribbing $S_{ct}$ , m <sup>2</sup> | Длина повреждения, м<br>Failure length, m | Площадь поверхности повреждения конденсатора термосифона, которая вычисляется как площадь поверхности гладкого цилиндра $S_{cp}$ , м <sup>2</sup><br>Thermosiphon capacitor failure area to be computed as smooth cylinder face area $S_{cp}$ , m <sup>2</sup> | Внутреннее термическое сопротивление колонки теплообмену $R_{int}$ , м <sup>2</sup> ·°C/Вт<br>Core internal heat exchange resistance $R_{int}$ , m <sup>2</sup> ·°C/W | Площадь поверхности конденсатора термосифона $S_c$ , м <sup>2</sup><br>Thermosiphon capacitor face area $S_c$ , m <sup>2</sup> | Повреждение от изначального**, %<br>Failure against initial**, % | Безразмерные параметры<br>Dimensionless parameters |      |         |          | Радиус замораживания $r_f$ , мм<br>Freezing radius $r_f$ , mm | Разность, мм<br>Difference, mm |
|----------|--|---|--|---|--|---|--|--|--|------|---------|----------|---|--------------------------------|
|          |  |   |  |   |  |   |  |  | $b$  | $M$  | $H_a$   | $\eta_a$ |   |                                |
| 1        | 0  | 300   | 1,580  | 0,000                                     | 0,000  | 0,0116  | 1,580  | 0  | 1,460  | 0,02 | 5846,04 | 50       | 842,5   | 0,0                            |
| 2        | 5  | 285   | 1,501  | 0,045                                     | 0,008  | 0,0122  | 1,509  | 4  | 1,529  | 0,02 | 5846,04 | 48,2     | 812,2   | 30,3                           |
| 3        | 6  | 282   | 1,485  | 0,054                                     | 0,010  | 0,0123  | 1,495  | 5  | 1,544  | 0,02 | 5846,04 | 47,8     | 805,4   | 37,1                           |
| 4***     | 7  | 279   | 1,470  | 0,063                                     | 0,011  | 0,0124  | 1,481  | 6  | 1,559  | 0,02 | 5846,04 | 47,5     | 800,4   | 42,1                           |
| 5        | 8  | 276   | 1,454  | 0,072                                     | 0,013  | 0,0125  | 1,467  | 7  | 1,574  | 0,02 | 5846,04 | 46,9     | 790,3   | 52,2                           |
| 6        | 9  | 273   | 1,438  | 0,081                                     | 0,015  | 0,0126  | 1,452  | 8  | 1,590  | 0,02 | 5846,04 | 46,7     | 786,9   | 55,6                           |
| 7        | 10   | 270   | 1,422  | 0,090                                     | 0,016  | 0,0128  | 1,438  | 9  | 1,606  | 0,02 | 5846,04 | 46,5     | 783,5   | 59,0                           |
| 8        | 11   | 267   | 1,406  | 0,099                                     | 0,018  | 0,0129  | 1,424  | 9,88   | 1,622  | 0,02 | 5846,04 | 46,2     | 778,5   | 64,0                           |
| 9        | 12   | 264   | 1,391  | 0,108                                     | 0,019  | 0,0130  | 1,410  | 10,78  | 1,638  | 0,02 | 5846,04 | 46,0     | 775,1   | 67,4                           |
| 10       | 15   | 255   | 1,343  | 0,135                                     | 0,024  | 0,0134  | 1,367  | 13   | 1,690  | 0,02 | 5846,04 | 45,3     | 763,3   | 79,2                           |
| 11       | 20   | 240   | 1,264  | 0,180                                     | 0,032  | 0,0142  | 1,296  | 18   | 1,784  | 0,02 | 5846,04 | 44,8     | 754,9   | 87,6                           |
| 12       | 25   | 225   | 1,185  | 0,225                                     | 0,040  | 0,0150  | 1,225  | 22   | 1,889  | 0,02 | 5846,04 | 44       | 741,4   | 101,1                          |
| 13       | 30   | 210   | 1,106  | 0,270                                     | 0,048  | 0,0160  | 1,154  | 27   | 2,007  | 0,02 | 5846,04 | 43       | 724,6   | 118,0                          |
| 14       | 35   | 195   | 1,027  | 0,315                                     | 0,056  | 0,0170  | 1,084  | 31   | 2,141  | 0,02 | 5846,04 | 42,5     | 716,1   | 126,4                          |
| 15       | 40   | 180   | 0,948  | 0,360                                     | 0,064  | 0,0182  | 1,013  | 36   | 2,294  | 0,02 | 5846,04 | 41,8     | 704,3   | 138,2                          |
| 16       | 45   | 165   | 0,869  | 0,405                                     | 0,073  | 0,0196  | 0,942  | 40   | 2,471  | 0,02 | 5846,04 | 41,3     | 695,9   | 146,6                          |
| 17       | 50   | 150   | 0,790  | 0,450                                     | 0,081  | 0,0213  | 0,871  | 45   | 2,677  | 0,02 | 5846,04 | 40,7     | 685,8   | 156,7                          |
| 18       | 55   | 135   | 0,711  | 0,495                                     | 0,089  | 0,0232  | 0,800  | 49   | 2,921  | 0,02 | 5846,04 | 39,8     | 670,6   | 171,9                          |
| 19       | 60   | 120   | 0,632  | 0,540                                     | 0,097  | 0,0255  | 0,729  | 54   | 3,213  | 0,02 | 5846,04 | 37,5     | 631,9   | 210,6                          |
| 20       | 65   | 105   | 0,553  | 0,585                                     | 0,105  | 0,0284  | 0,658  | 58   | 3,571  | 0,02 | 5846,04 | 36       | 606,6   | 235,9                          |
| 21       | 70   | 90  | 0,474  | 0,630                                     | 0,113  | 0,0319  | 0,587  | 63   | 4,018  | 0,02 | 5846,04 | 34       | 572,9   | 269,6                          |
| 22       | 75   | 75  | 0,395  | 0,675                                     | 0,121  | 0,0365  | 0,516  | 67   | 4,594  | 0,02 | 5846,04 | 32       | 539,2   | 303,3                          |
| 23       | 80   | 60  | 0,316  | 0,720                                     | 0,129  | 0,0426  | 0,445  | 72   | 5,361  | 0,02 | 5846,04 | 29       | 488,7   | 353,9                          |

\* Поврежденная площадь оребрения конденсатора относительно общей площади оребрения.  
 Deffective capacitor ribbing area against total ribbing area.

\*\* Эффективная площадь поврежденной части оребрения, участвующая в процессе теплопередачи.  
 Effective area of defective ribbing involved in heat transfer.

\*\*\* Предлагаемая норма отбраковки.  
 Suggested rejection rate.

эффективность работы конденсатора изменится незначительно. Однако 10%-ное повреждение конденсатора термостабилизатора грунта означает, что произошло плотное смятие 11–12 % суммарного количества ребер. Площадь оребрения конденсатора при этом изменится, и хотя поверхность поврежденных участков все же будет выполнять работу охлаждения, но уже как гладкая металлическая поверхность. Зависимость площади соприкосновения с холодным атмосферным воздухом проявляется при вычислении внутреннего термического сопротивления колонки теплообмену. Как указано в [1], расчет для парожидкостных термосифонов производится по формуле:

$$R_{in} = \frac{S_e}{\alpha_{out} S_c}, \quad (2)$$

где  $\alpha_{out}$  – коэффициент теплообмена между наружным воздухом и поверхностью конденсатора парожидкостного термосифона, Вт/(м<sup>2</sup>·°С) (табл. 5);  $S_e, S_c$  – площадь поверхности испарителя и конденсатора термосифона соответственно, м<sup>2</sup>.

В знаменателе формулы (2) отражено основное уравнение теплопередачи. Впрочем, формула не даст возможности достаточно точно рассчитать внутреннее термическое сопротивление, поскольку в ней не учтено, что при повреждении к площади оребрения добавляется площадь его повреждения. Исходя из [5] основное уравнение теплопередачи выглядит следующим образом:

$$Q = \alpha_{out1} S_{c1} + \alpha_{out2} S_{c2r} \quad (3)$$

где  $\alpha_{out1}$  – коэффициент теплообмена между наружным воздухом и поверхностью оребрения конденсатора парожидкостного термосифона, Вт/(м<sup>2</sup>·°С) (табл. 5);  $S_{c1}$  – площадь поверхности оребрения конденсатора термосифона, м<sup>2</sup>;  $\alpha_{out2}$  – коэффициент теплообмена между наружным воздухом и поврежденной (гладкой) поверхностью конденсатора парожидкостного термосифона, Вт/(м<sup>2</sup>·°С) (табл. 5);  $S_{c2}$  – площадь поврежденной (гладкой) поверхности конденсатора термосифона, м<sup>2</sup>, которая вычисляется как площадь поверхно-

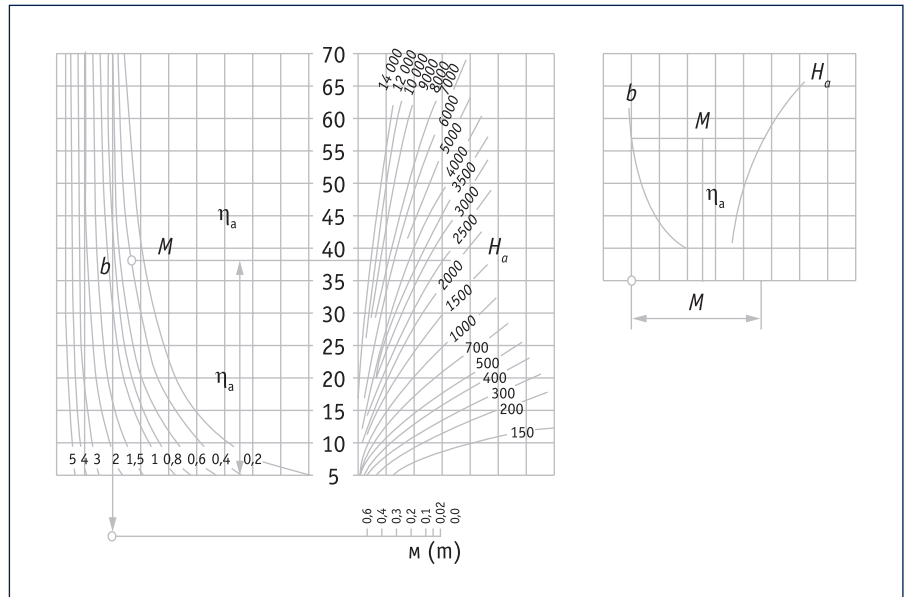


Рис. 4. Номограмма для расчета радиуса охлаждения и оттаивания грунта вокруг термостабилизатора:

$\eta_a$  – безразмерный параметр, определяемый в зависимости от значений безразмерных параметров  $b, M, H_a$ , рассчитываемых по формулам, изложенным в [1]

Fig. 4. The nomographic chart to calculate cooling and frost retreat radius around the thermostabilizer:

$\eta_a$  – a dimensionless parameter to be determined depending on the values of dimensionless parameters  $b, M, H_a$ , computed to the formulas given in [1]

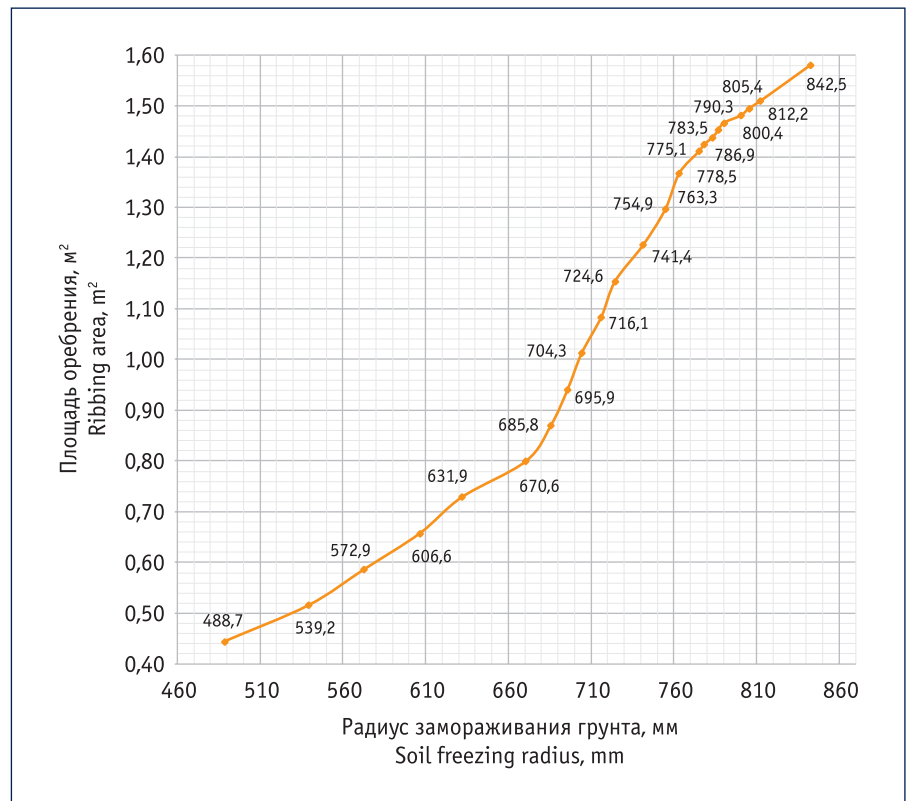


Рис. 5. Зависимость радиуса замораживания грунта от площади оребрения конденсатора термостабилизатора

Fig. 5. Dependence of soil freezing radius on thermostabilizer capacitor ribbing area

сти гладкого цилиндра, причем длина цилиндра берется в зависимости от процентного соотношения количества поврежденных ребер к их общему количеству.

При расчете внутреннего термического сопротивления колонки теплообмену площадь испарительной части оребрения  $S_e$  останется неизменной для обоих случаев, поскольку мы рассматриваем работу одного и того же термостабилизатора грунта. Формула (2) при этом будет выглядеть следующим образом:

$$R_{in} = \frac{S_e}{\alpha_{out1} S_{c1} + \alpha_{out2} S_{c2}}. \quad (4)$$

Оставшиеся расчеты необходимо выполнить согласно [1], их результаты представлены в табл. 6.

По [2] охлаждающие устройства необходимо расставлять таким образом, чтобы обеспечить 50%-ное перекрытие их зоны действия, то есть при выходе из строя одного из устройств (контуров испарения) защищаемые этим контуром элементы основания должны

перекрываться зоной действия соседнего контура в объеме 50 %. При этом действующий ТСГ должен обеспечивать расчетный радиус замораживания. Однако если он будет иметь повреждения оребрения конденсаторной части, это приведет к уменьшению радиуса замораживания, и требования [2] не будут выполняться. Поэтому в том же документе [2] принципиально не допускается применение ТСГ с дефектами. Однако, согласно приведенной статистике, в практике строительства незначительные повреждения площади оребрения конденсаторной части ТСГ происходят довольно часто. Основной причиной этого являются ошибки, допущенные при монтаже ТСГ, и недостаточность требований нормативно-технических документов к осуществлению данного монтажа [6]. Отметим, что случайные повреждения в любом случае не исключены. И перед строителями всегда будет стоять вопрос об отбраковке ТСГ из-за незначительных повреждений либо о вводе поврежденного ТСГ в эксплуатацию под свою ответственность.

Проведенные исследования позволяют решить поставленную проблему. Установлено, что при повреждении площади оребрения конденсаторной части ТСГ в объеме 7 % и менее радиус замораживания уменьшается максимум на 5 % (табл. 6). Поэтому предлагается:

1) ввести в формулу (1) коэффициент запаса 5 %:

$$r_f = \eta_a \cdot r_p \cdot k_z, \quad (5)$$

где  $k_z = 0,95$  – коэффициент запаса;

2) повреждение площади оребрения конденсаторной части ТСГ объемом 7 % взять за норму отбраковки.

Таким образом, предлагается отбраковывать ТСГ с повреждением площади оребрения конденсаторной части более 7 %, ТСГ с повреждениями объемом до 7 % включительно допускать к монтажу. При этом с учетом введенного коэффициента запаса фактический радиус замораживания обеспечит перекрытие необходимой зоны действия, и требования [2] будут соблюдены.

## Литература:

- СП 25.13330.2012. Основания и фундаменты на вечномёрзлых грунтах. Актуализированная редакция СНиП 2.02.04-88 (с изм. № 1–3) [Электронный источник]. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200095519> (дата обращения: 13.12.2019).
- СТО Газпром 2-2.1-390-2009. Руководство по проектированию и применению сезонно-охлаждающих устройств для термостабилизации грунтов оснований фундаментов. М.: ООО «Газпром экспо», 2010.
- СТТ-91.060.00-КТН-087-12 (с изм. 1–4). Индивидуальные сезоннодействующие охлаждающие устройства – термостабилизаторы [Электронный источник]. Режим доступа: [https://niitn.transneft.ru/u/ovp\\_main\\_pdf\\_file/4471/stt-91.060.00-ktn-087-12\\_s\\_izm4\\_sr.pdf](https://niitn.transneft.ru/u/ovp_main_pdf_file/4471/stt-91.060.00-ktn-087-12_s_izm4_sr.pdf) (дата обращения: 13.12.2019).
- СП 131.13330.2018. Строительная климатология. Актуализированная версия СНиП 23-01-99\*. [Электронный источник]. Режим доступа: <https://ap-групп.рф/wp-content/uploads/2019/05/SP-131.13330.2018-SNiP-23-01-99-Stroitel'naya-klimatologiya-.pdf> (дата обращения: 13.12.2019).
- Аникин Г.В., Плотников С.Н., Спасенникова К.А. Расчет динамики промерзания грунта под воздействием одиночного термосифона // Криосфера Земли. 2013. Т. XXVII. № 1. С. 51–55.
- Габидуллин Р.Н., Мустафин Т.Р. Выбор способа монтажа термостабилизаторов грунта при строительстве объектов на многолетнемерзлых грунтах // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2019. № 11. С. 48–52.

## References:

- Handbook of Instructions (SP) 25.13330.2012. Soil Bases and Foundations on Permafrost Soils. Revised edition of the Construction Norms and Regulations (SNiP) 2.02.04-88 (as amended No. 1–3). Weblog. Available from: <http://docs.cntd.ru/document/1200095519> [Accessed 13th December 2019]. (In Russ.)
- Company Standard (STO) Gazprom 2-2.1-390-2009. Guidelines for the Design and Use of Seasonal Cooling Devices for Thermal Stabilization of Soils of Foundations. Moscow: Gazprom Expo LLC; 2010. (In Russ.)
- Special Technical Requirements (CTT) 91.060.00-KTN-087-12 (as amended 1–4). Individual seasonally Acting Cooling Device – Thermal Stabilizers. Weblog. Available from: [https://niitn.transneft.ru/u/ovp\\_main\\_pdf\\_file/4471/stt-91.060.00-ktn-087-12\\_s\\_izm4\\_sr.pdf](https://niitn.transneft.ru/u/ovp_main_pdf_file/4471/stt-91.060.00-ktn-087-12_s_izm4_sr.pdf) [Accessed 13th December 2019]. (In Russ.)
- Handbook of Instructions (SP) 131.13330.2018. Revised edition of the Construction Norms and Regulations (SNiP) 23-01-99\*. Building Climatology. Weblog. Available from: <https://ap-групп.рф/wp-content/uploads/2019/05/SP-131.13330.2018-SNiP-23-01-99-Stroitel'naya-klimatologiya-.pdf> [Accessed 13th December 2019]. (In Russ.)
- Anikin G.V., Plotnikov S.N., Spasennikova K.A. Calculation of Soil Freezing Rate under the Influence of a Solitary Thermosyphon. Kriosfera Zemli [Earth Cryosphere Institute]. 2013;XXVII(1):51–55. (In Russ.)
- Gabidullin R.N., Mustafin T.R. Choosing a Method of the Soil Thermal Stabilizers Installation in the Construction of Facilities on Permafrost Soils. Territorija "NEFTEGAS" [Oil and Gas Territory]. 2019;(11):48–52. (In Russ.)