

Алексей Андреевич ИШКОВ¹
Анатолий Анатольевич ГУБАРЬКОВ²
Геннадий Владимирович АНИКИН³

УДК 536.4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМ ТЕМПЕРАТУРНОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ ГРУНТОВ С ГОРИЗОНТАЛЬНЫМ ИСПАРИТЕЛЕМ, ЗАПРАВЛЕННЫХ РАЗНЫМИ ХЛАДАГЕНТАМИ*

¹ ведущий специалист, Отдел физико-химических
методов повышения нефтеотдачи пластов,
Филиал ООО «Лукойл-Инжиниринг»
«КогалымНИПИнефть» (г. Тюмень)
IshkovAA@tmn.lukoil.com

² кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник,
Субарктический научно-учебный полигон,
Тюменский научный центр Сибирского отделения РАН,
Тюменский индустриальный университет
agubarkov@rambler.ru

³ кандидат физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник,
Тюменский научный центр Сибирского отделения РАН
anikin@ikz.ru

* Работа выполнена по госзаданию согласно плану НИР Тюменского научного центра Сибирского отделения РАН на 2018-2020 гг., протокол № 2 от 08.12.2017 (Приоритетное направление IX.135. Программа IX.135.2. Проект IX.135.2.4. Физико-механические и физико-химические модели эволюции состояния природно-технических систем в криосфере Земли).

Цитирование: Ишков А. А. Определение эффективности функционирования систем температурной стабилизации грунтов с горизонтальным испарителем, заправленных разными хладагентами / А. А. Ишков, А. А. Губарьков, Г. В. Аникин // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2019. Том 5. № 4 (20). С. 37-57.

DOI: 10.21684/2411-7978-2019-5-4-37-57

Аннотация

В настоящее время строительство зданий и сооружений в зонах распространения мерзлых грунтов преимущественно осуществляется по I принципу. Известно, что несущая способность мерзлых грунтов существенно зависит от их значения отрицательной температуры. При растеплении такие грунты дают усадку, что отрицательно сказывается на объектах, построенных на них. Для предотвращения этого используются системы температурной стабилизации мерзлых грунтов.

Одновременный учет теплового влияния на мерзлый грунт как инженерного объекта, так и системы температурной стабилизации грунтов является сложной задачей, от правильности решения которой будет зависеть точность определения прочностных характеристик грунта. В настоящей работе приведены расчеты температурных полей мерзлых грунтов при одновременном воздействии на них объекта с интенсивным тепловыделением (РВС с горячей нефтью) и системы температурной стабилизации грунтов типа ГЕТ. Расчеты проведены на основе разработанной ранее математической модели функционирования системы температурной стабилизации с горизонтальным испарителем. Рассматривается эффективность функционирования системы ГЕТ, заправленной разными хладагентами (аммиак и диоксид углерода) для разных геокриологических подзон Западной Сибири. Особенное внимание стоит обратить на тот факт, что грунты изначально были при близкой к положительной температуре ($-0,1$ °C), но по истечении 10 лет за счет действия системы температурной стабилизации грунтов весь массив грунта вокруг испарительной части системы перешел в мерзлое состояние. Системы, заправленные диоксидом углерода, показали лучшую эффективность работы, что обусловлено двумя факторами: меньшим значением нижней критической тепловой нагрузки, что дает большее количество рабочих дней в году относительно системы, заправленной аммиаком, а также тем, что испарительная часть системы на диоксиде углерода имеет температуру в среднем ниже на 1 °C, чем системы на аммиаке. Результаты, полученные по итогу выполнения работы, позволяют сделать вывод о том, что диоксид углерода в качестве теплоносителя для системы ГЕТ является наиболее эффективным.

Ключевые слова

Тепломассоперенос, мерзлый грунт, температурные поля, температурная стабилизация грунтов, теплофизика.

DOI: 10.21684/2411-7978-2019-5-4-37-57

Введение

В настоящее время строительство зданий и сооружений на многолетнемерзлых грунтах (ММГ) преимущественно осуществляется по I принципу [5, 13]. Согласно требованиям нормативных документов, в конце стадии проектирования необходимо предоставлять теплотехнические прогнозы температурных полей мерзлых грунтов на весь срок эксплуатации объектов. Эти расчеты необходимы

для понимания рисков, связанных с растеплением ММГ вследствие нарушения их естественного температурного режима объектами со значительным тепловыделением. Таким объектом, в частности, является резервуар вертикальный стальной (РВС), предназначенный для сепарации горячей нефти от воды. Температура водонефтяной смеси в РВС может достигать значений более 60 °С. Очевидно, что при строительстве данных объектов на мерзлых грунтах повышается риск растепления ММГ.

Известно, что несущая способность мерзлых грунтов существенно зависит от значения отрицательной температуры, особенно в высокотемпературном диапазоне ММГ [5, 10]. Высокотемпературными ММГ считаются грунты с температурой выше -1 °С. Имеется ряд методов для сохранения ММГ в мерзлом состоянии, которые в целом можно охарактеризовать как пассивные и активные [12]. В рамках данной работы рассмотрены активные методы, в частности система температурной стабилизации грунтов оснований производства ООО НПО «ФундаментСтройАркас» — горизонтальная естественно действующая трубчатая система (ГЕТ) [6, 15]. Система ГЕТ представляет собой герметичную конструкцию, изготовленную из стали. Способ монтажа на объекте представлен на рис. 1.

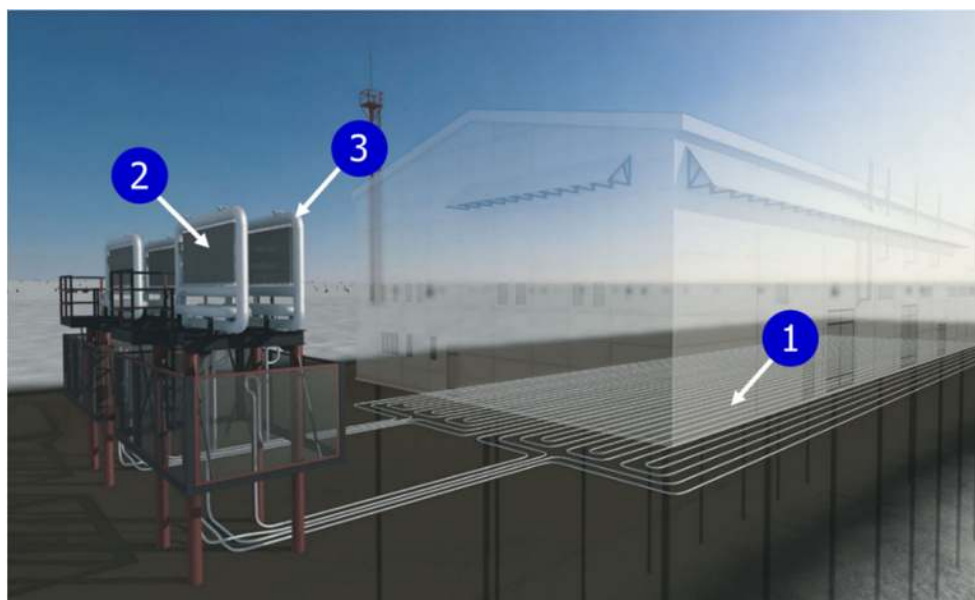


Рис. 1. Система ГЕТ: 1 — испаритель, 2 — конденсатор, 3 — ускоритель циркуляции

Источник: [8].

Fig. 1. Horizontal natural-acting tubular system (GET) system: 1 — evaporator, 2 — condenser, 3 — accelerator

Source: [8].

В системе выделяются три функциональных блока: испаритель, конденсатор и ускоритель циркуляции. Испаритель исполнен в виде криволинейной кон-

струкции с поворотами на 90-180°. Конденсатор имеет развитую поверхность оребрения площадью около 100 м². Ускоритель циркуляции — труба большего, чем испаритель, диаметра, в которой происходит отделение паров хладагента от взвешенных капель за счет силы тяжести. Системы типа ГЕТ находят широкое применение при строительстве сооружений с полами по грунту, резервуаров с основанием на отсыпке, а также в комплексе со свайным основанием и проветриваемыми подпольями.

В настоящее время системы ГЕТ заправляются аммиаком. Также есть исследования эффективности функционирования системы температурной стабилизации грунтов ГЕТ, заправленной диоксидом углерода, однако в промышленную эксплуатацию эти системы так пока и не введены [7]. В работах [4, 11] показано, что диоксид углерода как теплоноситель для системы ГЕТ является более предпочтительным.

Однако цель данной публикации состоит в том, чтобы рассмотреть функционирование системы ГЕТ в различных геокриологических условиях (зонах) Западной Сибири. Для этого был проведен теплотехнический расчет системы ГЕТ, расположенной в основании горячего резервуара с нефтью и заправленной разными хладагентами — аммиаком и диоксидом углерода. В целом выявление наиболее оптимального хладагента для системы ГЕТ даст понимание того, как эффективность функционирования системы зависит от теплоносителя. Также в зависимости от циркулирующего хладагента и его теплофизических свойств (давление насыщения, плотность, вязкость, теплоемкость) будут варьироваться режимы функционирования системы, что также скажется на эффективности замораживания грунтов и сохранения их в мерзлом состоянии.

Общая постановка задачи

Для того чтобы показать применимость систем температурной стабилизации грунтов типа ГЕТ в тех или иных условиях, было выбрано три геокриологических зоны:

- центральная зона (южная подзона) — подзона распространения островных ММП (метеостанция Белоярский 63 с. ш.);
- центральная зона (северная подзона) — подзона распространения прерывистых ММП (метеостанция Надым 65 с. ш.);
- северная зона (южная подзона) — подзона сплошного распространения ММП (метеостанция Тазовский 67 с. ш.).

Рассматриваемые метеостанции расположены примерно через 200 км с юга на север в разных геокриологических областях с различным распространением ММП по площади и в разрезе.

Климатические данные по каждому объекту были взяты как среднемесячные значения за последние 10 лет (с 01.01.2009 по 01.01.2019). Эти данные приведены в таблице 1.

Наиболее неустойчивыми к оттаиванию являются высокотемпературные грунты, для которых необходимо применение активной термостабилизации. Температура замерзания грунтов, слагающих разрез, принимается согласно теплофизическим исследованиям.

Для того чтобы исследовать динамику изменения температурного состояния ММГ в условиях залегаания в основании резервуара с нефтью и системы температурной стабилизации грунтов, начальная температура грунтового массива была принята равной $-0,1$ °С как самая неблагоприятная.

Таблица 1

Среднемесячные значения температуры воздуха (t_a , °С), скорости ветра (V , м/с) и высоты снежного покрова (h_s , м) за последние 10 лет для рассматриваемых объектов

Table 1

Monthly average values of air temperature (t_a , °С), wind speed (V , m/s), and snow depth (h_s , m) over the past 10 years for the objects under consideration

Месяц	Белоярский			Надым			Тазовский		
	t_a , °С	V , м/с	h_s , м	t_a , °С	V , м/с	h_s , м	t_a , °С	V , м/с	h_s , м
Январь	-22,53	1,80	0,44	-23,98	2,95	0,58	-26,03	5,15	0,41
Февраль	-20,44	1,80	0,54	-20,73	2,87	0,68	-23,56	4,98	0,51
Март	-9,89	2,60	0,58	-12,09	3,53	0,75	-16,43	5,35	0,65
Апрель	-1,18	2,85	0,47	-3,96	3,88	0,72	-8,86	5,25	0,70
Май	5,06	2,94	0,18	1,04	4,21	0,42	-2,91	5,05	0,34
Июнь	14,43	2,87	0,00	13,13	3,93	0,00	10,66	4,58	0,00
Июль	16,34	2,57	0,00	15,69	3,48	0,00	14,91	4,14	0,00
Август	13,22	2,32	0,00	12,03	3,18	0,00	10,70	4,15	0,00
Сентябрь	7,32	2,38	0,00	6,40	3,33	0,02	5,38	4,21	0,00
Октябрь	-0,25	2,47	0,07	-2,50	3,31	0,10	-4,38	4,47	0,08
Ноябрь	-12,42	2,24	0,16	-15,04	3,04	0,26	-18,19	4,46	0,19
Декабрь	-18,55	1,86	0,29	-19,63	2,82	0,44	-21,64	4,88	0,32

Геологический разрез задан песчаной отсыпкой сверху (0-2 м), пылеватым песком в среднем слое (2-6 м) и массивом суглинка снизу (6-10 м). Свойства грунтов для каждого инженерно-геологического элемента заданы в соответствии с таблицей 2.

Согласно приведенной начальной температуре грунта и температурам замерзания слоев, пески в начальный момент времени находятся в мерзлом состоянии (до глубины 6 м), а суглинки — в талом (в интервале от 6 до 10 м).

В данной работе рассмотрено функционирование системы ГЕТ в следующем конструктивном исполнении: общая длина труб испарителя составляет 3 200 м, число конденсаторных блоков — 8 шт., высота подъема конденсатора — 5 м, шаг укладки между трубами испарителя — 0,5 м. Изначально система заполнена хладагентом до уровня 1 м от нижней кромки конденсаторной части, чтобы столб жидкости хладагента относительно труб испарителя был равен 5 м.

Таблица 2
Физические и теплофизические свойства грунтов
Physical and thermophysical properties of soils

ИГЭ	Описание грунта	Теплопроводность, Вт/(м ² С)		Теплоемкость объемная, кДж/(м ³ С)	Температура фазового перехода, С	Влажность (весовая)		Теплота фазового перехода, МДж/м ³	Плотность сухого грунта, кг/м ³	
		$\lambda_{\text{тал.}}$	$\lambda_{\text{мерз.}}$			$C_{\text{тал.}}$	$C_{\text{мерз.}}$			Суммарная, д. ед.
Отсыпка	Песок строительный	1,57	1,86	2 472,1	1 885,5	0,00	0,20	0,07	60,97	1 400
ИГЭ18	Песок пылеватый твердомерзлый сильнольдистый	2,16	2,39	2 999,0	2 172,0	0,00	0,23	0,01	132,60	1 800
ИГЭ23	Суглинок пластичномерзлый, слоистой криотекстуры, сильнольдистый	1,57	1,90	3 440,0	2 180,0	-0,22	0,60	0,15	149,24	990

Математическая постановка задачи и схема размещения граничных условий

В работе рассматривается нефтяной резервуар для сепарации нефти, который представляет собой стальную бочку с диаметром 66 м. Температура сепарируемого продукта (обводненной нефти) составляет 45 °С. Согласно требованиям проектировщиков, под резервуаром выполнена выемка грунта, которая заполняется уплотненным песком толщиной 100 мм, под которым находится гидрофобный слой (полиэтиленовая пленка толщиной 1 мм). Под гидрофобным слоем в качестве пассивной термоизоляции укладывается утеплитель «Пеноплекс 45» толщиной 200 мм. Далее идет слой грунта отсыпки толщиной 400 мм и вновь слой песка средней крупности толщиной 100 мм. Очередность и толщина элементов отсыпки подобраны таким образом, чтобы она смогла выдержать резервуар, не испытывая при этом критических деформаций, способных привести к разрушению объекта. Как было сказано выше, начальная температура грунта принята равной -0,1 °С.

Конечно-разностная аппроксимация, по которой рассчитывалось температурное поле в грунте, имеет следующий вид [14]:

$$t_{i,j,k}^{n+1} = t_{i,j,k}^n + \frac{a_{i,j,k} \cdot h_\tau \cdot (t_{i+1,j,k}^n + t_{i-1,j,k}^n - 2t_{i,j,k}^n)}{h_x^2} + \frac{a_{i,j,k} \cdot h_\tau \cdot (t_{i,j+1,k}^n + t_{i,j-1,k}^n - 2t_{i,j,k}^n)}{h_y^2} + \frac{a_{i,j,k} \cdot h_\tau \cdot (t_{i,j,k+1}^n + t_{i,j,k-1}^n - 2t_{i,j,k}^n)}{h_z^2}.$$

Сетка пространственных и временных координат в расчетной области, а также критерий устойчивости явной разностной схемы задаются следующими выражениями [14]:

$$\begin{cases} x_i = i \cdot h_x, & 0 \leq i \leq i_{\max}, \\ y_j = j \cdot h_y, & 0 \leq j \leq j_{\max}, \\ z_k = k \cdot h_z, & 0 \leq k \leq k_{\max}, \\ \tau_n = h_\tau \cdot n, & 0 \leq n \leq n_{\max}, \end{cases}$$

$$h_\tau \leq \frac{1}{3a} \left(\frac{1}{h_x^2} + \frac{1}{h_y^2} + \frac{1}{h_z^2} \right)^{-1}, \quad a = \max(a_\tau, a_m),$$

где $t_{i,j,k}^n$ — температура в узле (i, j, k) на текущем временном слое, °С; a_τ и a_m — температуропроводности талого и мерзлого грунта, м²/с; h_x, h_y, h_z — шаги расчетной сетки по осям x, y, z , м; h_τ — временной шаг расчета, ч; $i_{\max}, j_{\max}, k_{\max}$ — размеры расчетной области, ед.; n_{\max} — количество временных шагов, за которое определяется состояние температурного поля грунта, ед.

Температуропроводность грунта в узле расчетной сетки $a_{i,j,k}$ определяется следующими выражениями:

$$a_{i,j,k} = \begin{cases} a_M & \text{при } t_{i,j,k}^n < t_{bf} - \Delta, \\ \frac{0,5(\lambda_M + \lambda_T)}{0,5(c_M + c_T) + \frac{L}{2\Delta}} & \text{при } t_{bf} - \Delta \leq t_{i,j,k}^n \leq t_{bf} + \Delta, \\ a_T & \text{при } t_{i,j,k}^n > t_{bf} + \Delta, \end{cases}$$

где c_T и c_M — объемные теплоемкости талого и мерзлого грунта, Дж/(кг·К); λ_T и λ_M — коэффициенты теплопроводности талого и мерзлого грунта, Вт/(м·К); Δ — параметр, характеризующий диапазон температур фазового перехода (в настоящей работе равен 0,2 °С), °С; t_{bf} — температура начала фазового перехода, °С; L — латентная теплота фазового перехода, Дж/кг.

Сетка координат подбирается всегда таким образом, чтобы узлы решетки проходили через трубы испарителей охлаждающей системы, причем трубы испарителей охлаждающей системы считаются линейными источниками холода [14]. Шаг сетки выбирается с учетом максимальной оптимизации расчетного времени. По оси x и z шаг составляет 0,1 м, а по оси y — 1 м. Такой выбор шага дискретизации возможен благодаря конструктивным особенностям залегания системы ГЕТ в грунте, а именно коллинеарностью укладки труб по оси y .

Величина теплового потока в каждом расчетном узле сетки с наличием испарителя системы температурной стабилизации, задается выражением:

$$U_{i,j,k} = \frac{\lambda_{гр} h_x h_z}{h_y} (t_{i,j+1,k} + t_{i,j-1,k} - 2t_n) + \frac{\lambda_{гр} h_y h_z}{h_x} (t_{i+1,j,k} + t_{i-1,j,k} - 2t_n), \quad (1)$$

где t_n — температура испарителя системы ГЕТ, °С; $\lambda_{гр}$ — теплопроводность грунта, Вт/(м·К).

Полная тепловая мощность, которую система температурной стабилизации типа ГЕТ может отводить от грунта в атмосферу, может быть рассчитана как функция конструктивных характеристик конденсатора системы с помощью выражения:

$$Q = \sum_{i,j,k \in M} U_{i,j,k} = S_{кон} \cdot N_{кон} \cdot \eta_{эф} (t_k - t_a) \cdot \alpha, \quad (2)$$

где M — множество узлов системы ГЕТ в грунте; $S_{кон}$ — площадь поверхности оребрения для одного конденсатора системы ГЕТ, м²; $N_{кон}$ — количество конденсаторов для конкретной системы ГЕТ, ед.; $\eta_{эф}$ — коэффициент эффективности теплоотдачи ребер, д. ед.; t_k — температура конденсаторной части, °С; t_a — температура атмосферы, °С; α — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К).

Для системы ГЕТ, температура конденсатора может быть определена, если известна температура испарителя, которая в свою очередь равна температуре грунта на границе с трубой испарителя [1, 2, 9]:

$$t_k = t_n - \frac{0,5\rho gH}{\frac{dP_{\text{нас}}}{dt}}, \quad (3)$$

где ρ — плотность хладагента, которым заправлена система, кг/м³; g — ускорение свободного падения, м/с²; H — высота подъема конденсаторной части, м; $\frac{dP_{\text{нас}}}{dt}$ — зависимость давления насыщенных паров от температуры, Па.

Решая совместно выражения (2)-(3), получаем уравнение для нахождения температуры испарителя [1, 9]:

$$t_n = \frac{Q}{S_{\text{кон}} \cdot N_{\text{кон}} \cdot \eta_{\text{эф}} \cdot \alpha} + \frac{0,5\rho gH}{\frac{dP_{\text{нас}}}{dt}} + t_a. \quad (4)$$

Коэффициент теплообмена атмосферы с конденсатором записывается в виде:

$$\alpha = 6,23 + 2,23 \cdot v_a, \quad (5)$$

где α — теплообмен поверхности конденсатора с атмосферным воздухом, Вт/(м²·°C); v_a — скорость ветра, м/с.

Таким образом, уравнения (1)-(5) полностью описывают взаимодействие системы ГЕТ с грунтом и атмосферой. Стоит обратить внимание, что эти соотношения получены на основе общего баланса тепла и связи температуры испарителя с кривой насыщения. Внутреннюю задачу двухфазного течения хладагента внутри контура циркуляции системы ГЕТ необходимо решать отдельно, однако в рамках решаемой задачи этого делать нет необходимости. Решение внутренней задачи рассмотрено в работах [1, 3].

Схематическое изображение расположения резервуара, системы термостабилизации и границ расчетной области в различных плоскостях приведены на рис. 2.

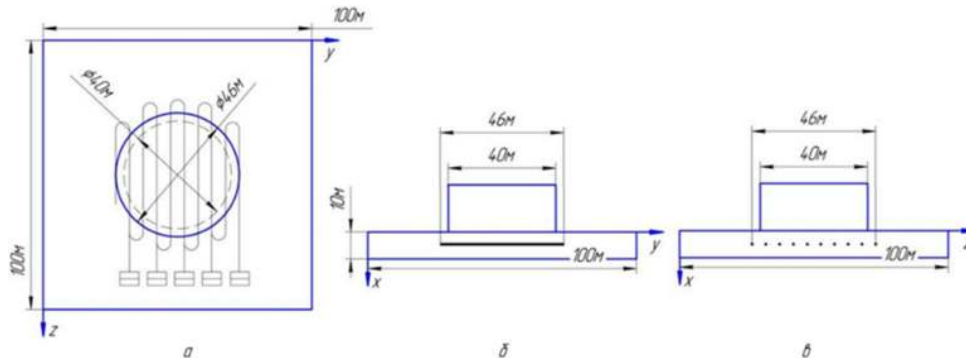


Рис. 2. Геометрия расчетной области в трех координатных плоскостях: а — (y, z); б — (x, y); в — (x, z)

Fig. 2. The geometry of the computational domain in three coordinate planes: а — (y, z); б — (x, y); в — (x, z)

Нижняя граница расчетной области расположена на глубине 30 м, однако для более детального рассмотрения температурного поля непосредственно под испарителем системы ГЕТ результаты расчетов представлены до глубины 10 м, что отображено на рис. 2.

На рис. 3 представлена схема размещения граничных условий на расчетной области.

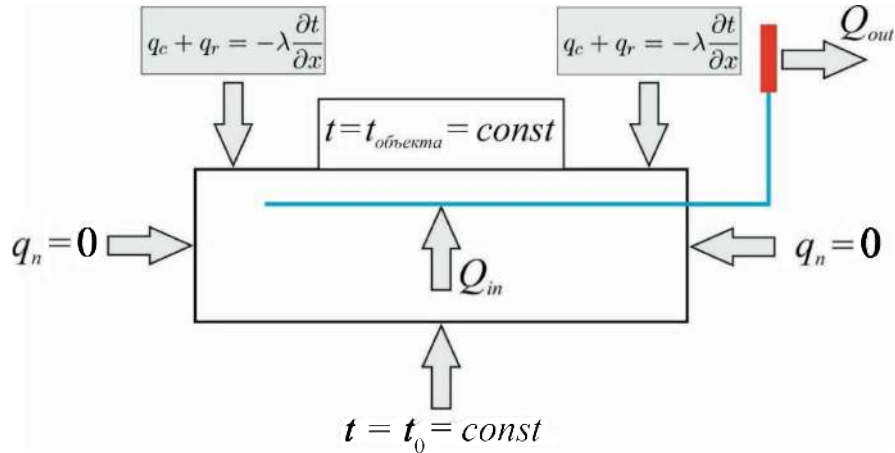


Рис. 3. Схема размещения граничных условий. Синей линией обозначена испарительная часть системы ГЕТ, красным прямоугольником — конденсаторная часть системы ГЕТ

Fig. 3. The layout of the boundary conditions. The blue line indicates the evaporative part of the GET system, the red rectangle — the condenser part of the GET system

Результаты и их обсуждение

Ключевой особенностью данного расчета является сравнительный анализ функционирования системы ГЕТ, заправленной диоксидом углерода и аммиаком. Для этого при прочих равных условиях были решены идентичные задачи для разных хладагентов в качестве теплоносителя в системах ГЕТ. Результаты расчета приведены ниже на рис. 4-9.

Согласно проведенным расчетам, отмечается, что для всех трех геокриологических подзон, несмотря на высокую начальную температуру грунта, система ГЕТ успешно справляется со своей функцией — сохраняет грунт в мерзлом состоянии. Следует отметить, что на широте п. Белоярский системы температурной стабилизации грунтов не применяются, т. к. ММГ не используются по первому принципу строительства.

Однако стоит заметить, что мерзлое ядро в грунте под системой ГЕТ, заправленной диоксидом углерода, начинает формироваться раньше и его температура ниже, чем для системы ГЕТ, заправленной аммиаком. Это обусловлено двумя факторами. Первый заключается в том, что система ГЕТ на диоксиде углерода начинает функционировать раньше и, соответственно, накопленное количество рабочих дней за год для нее больше, чем для системы, заправленной аммиаком. Вторым фактором является то, что при прочих равных условиях температура испарителя системы ГЕТ на диоксиде углерода в среднем на $1,04\text{ }^{\circ}\text{C}$

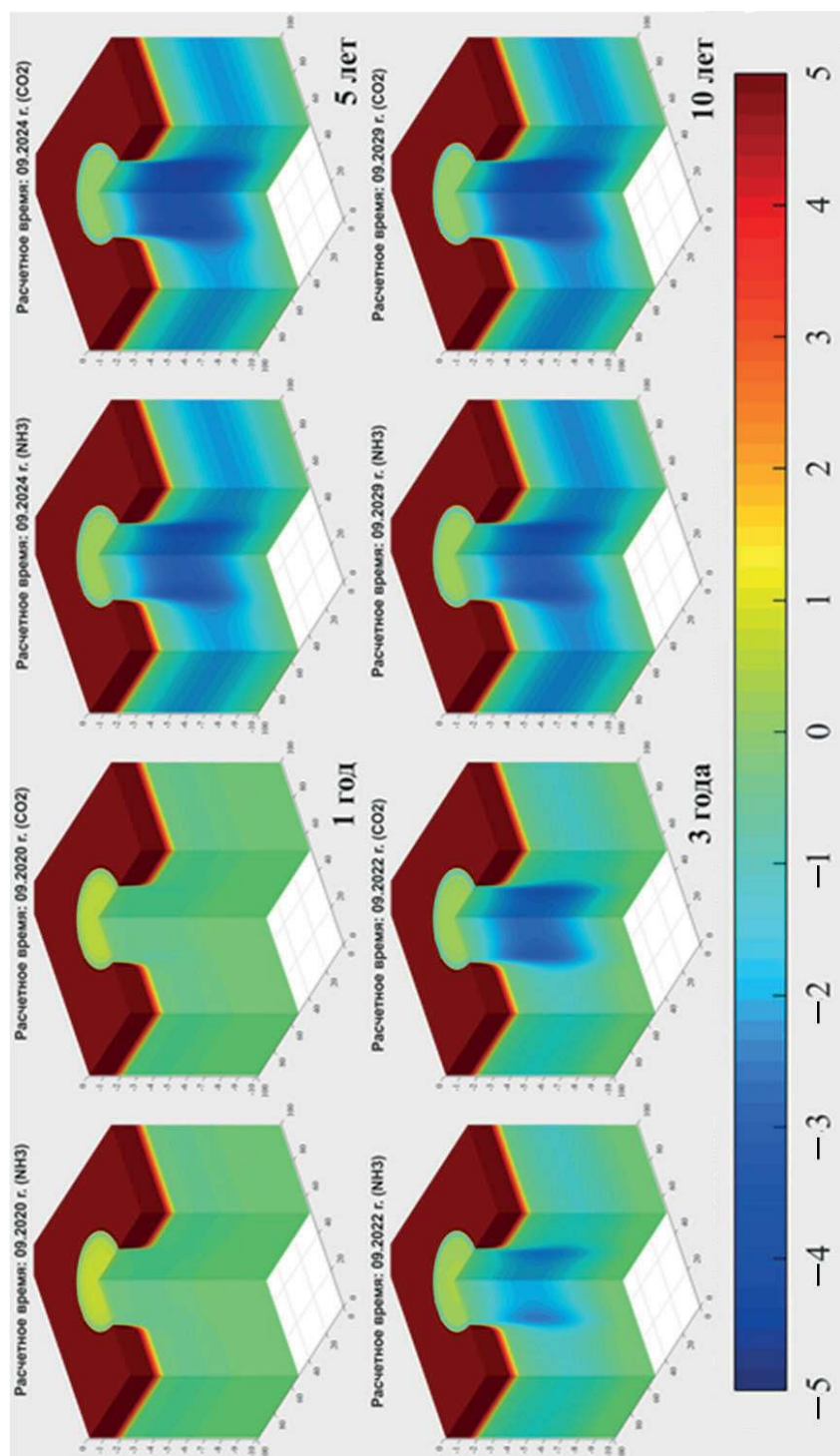


Fig. 4. The state of the temperature field for the Belayarsky weather station at the early September under the tank with hot oil (3D view)

Рис. 4. Состояние температурного поля для метеостанции Белярский на начало сентября под резервуаром с горячей нефтью (3D-вид)

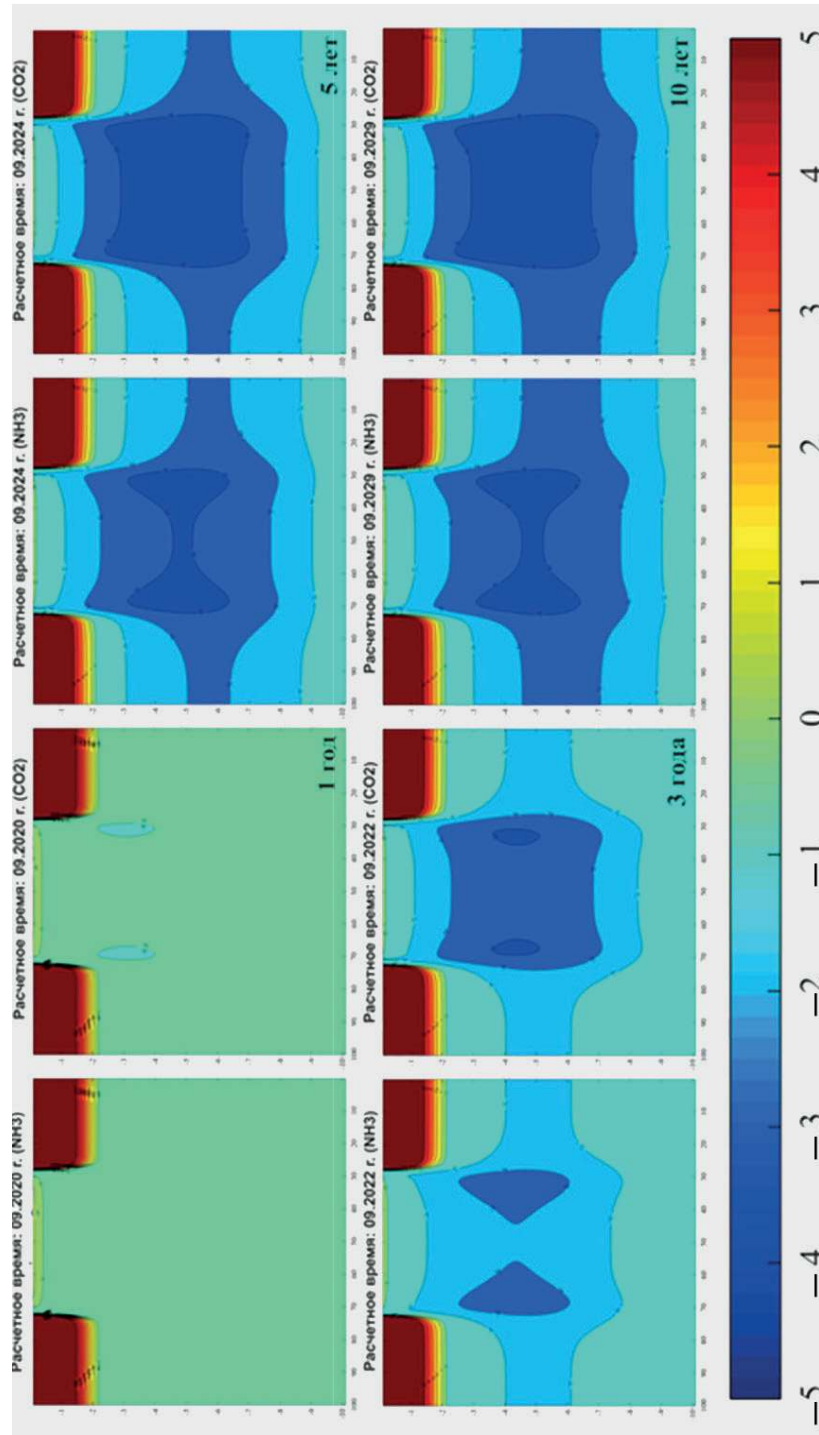


Рис. 5. Состояние температурного поля для метеостанции Белоярский на начало сентября под резервуаром с горячей нефтью в плоскости сечения, проходящего через центр резервуара параллельно трубам охлаждающей системы. Слева — аммиак (NH_3), справа — диоксид углерода (CO_2)

Fig. 5. The state of the temperature field for the Beloyarsky weather station at the early September under the tank with hot oil in the sectional plane passing through the center of the tank parallel to the pipes of the cooling system. Ammonia (NH_3) on the left, carbon dioxide (CO_2) on the right

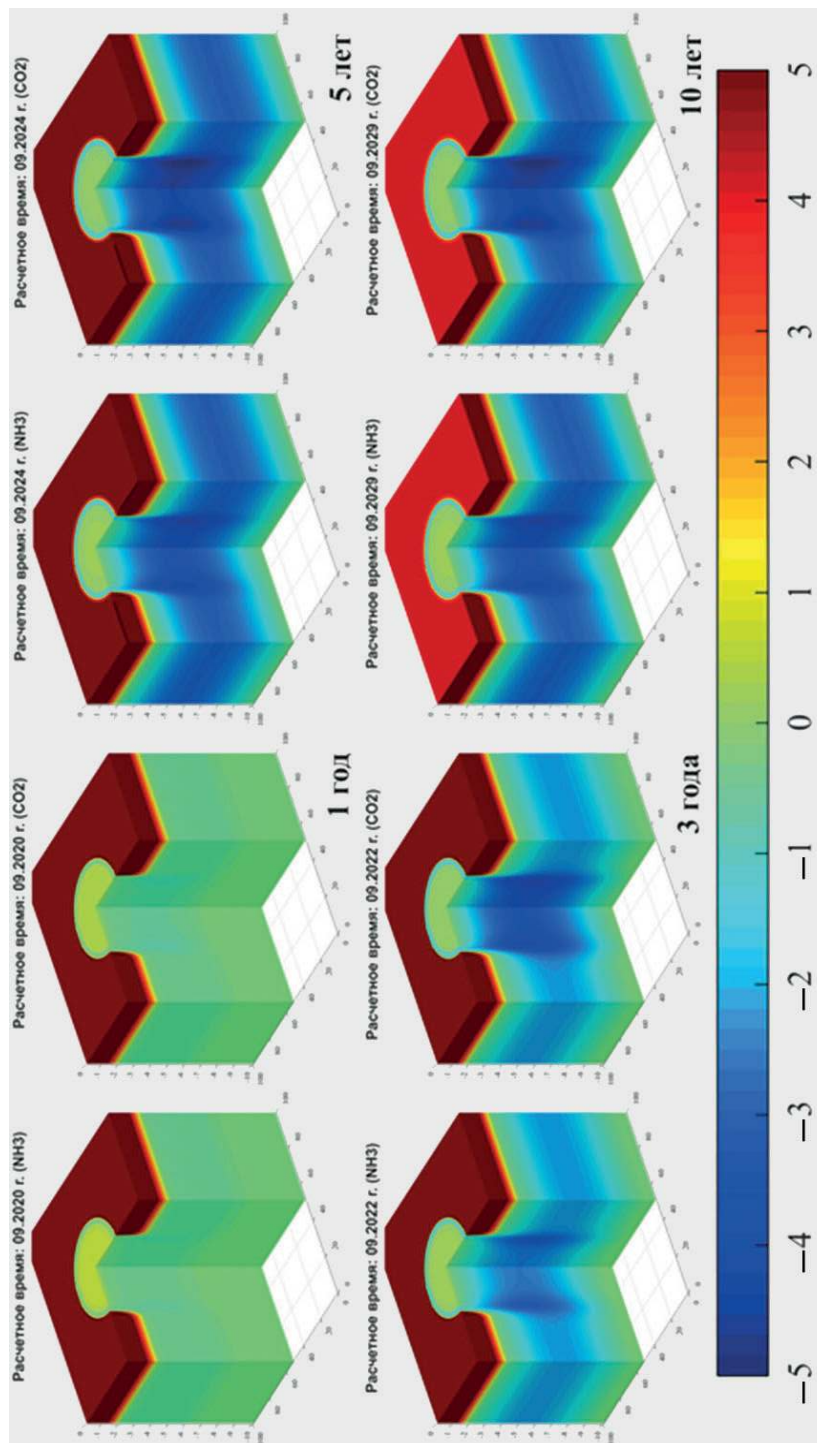


Рис. 6. Состояние температурного поля для метеостанции Надлым на начало сентября под резервуаром с горячей нефтью (3D-вид)

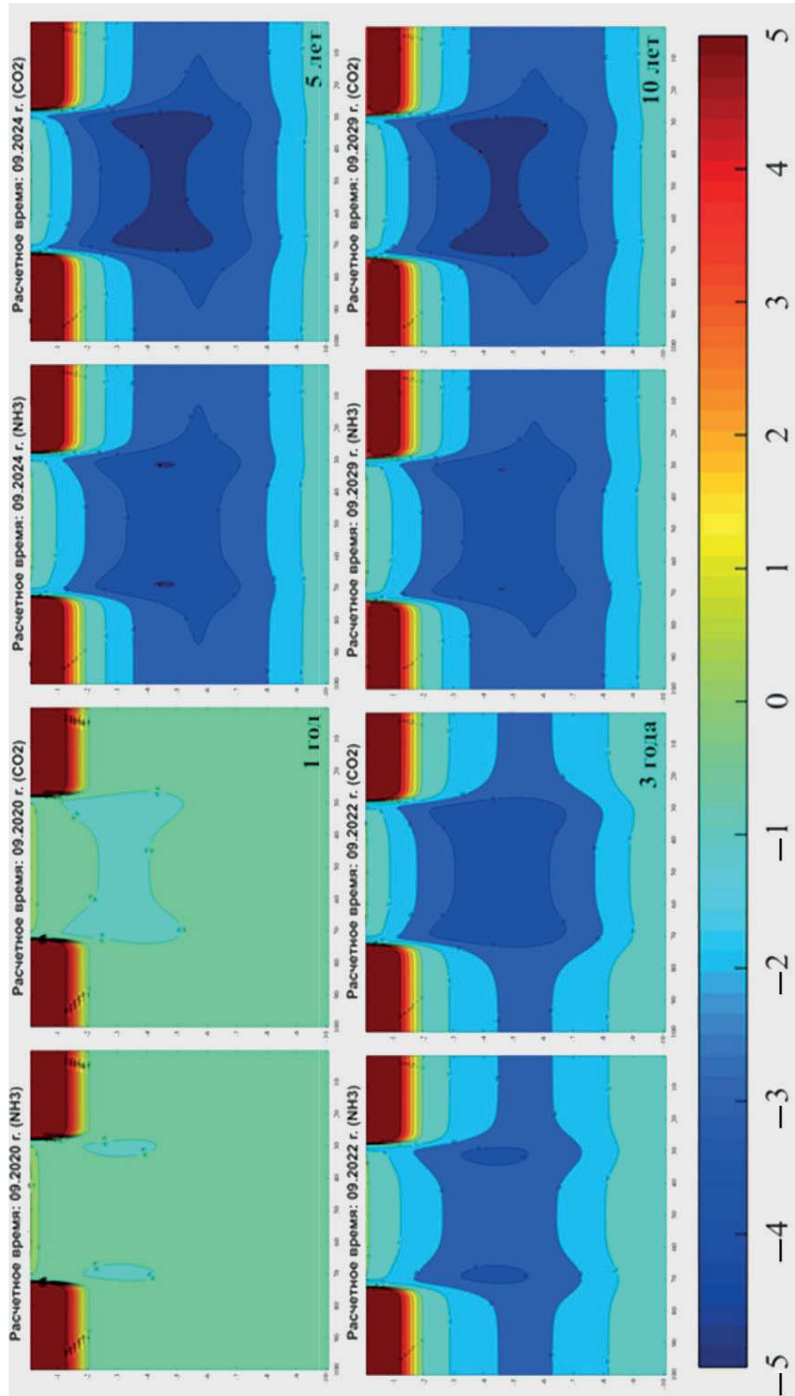


Рис. 7. Состояние температурного поля для метеостанции Надым на начало сентября под резервуаром с горячей нефтью в плоскости сечения, проходящего через центр резервуара параллельно трубам охлаждающей системы. Слева — аммиак (NH_3), справа — диоксид углерода (CO_2)

Fig. 7. The state of the temperature field for the Nadym weather station at the early September under the tank with hot oil in the sectional plane passing through the center of the tank parallel to the pipes of the cooling system. Ammonia (NH_3) on the left, carbon dioxide (CO_2) on the right

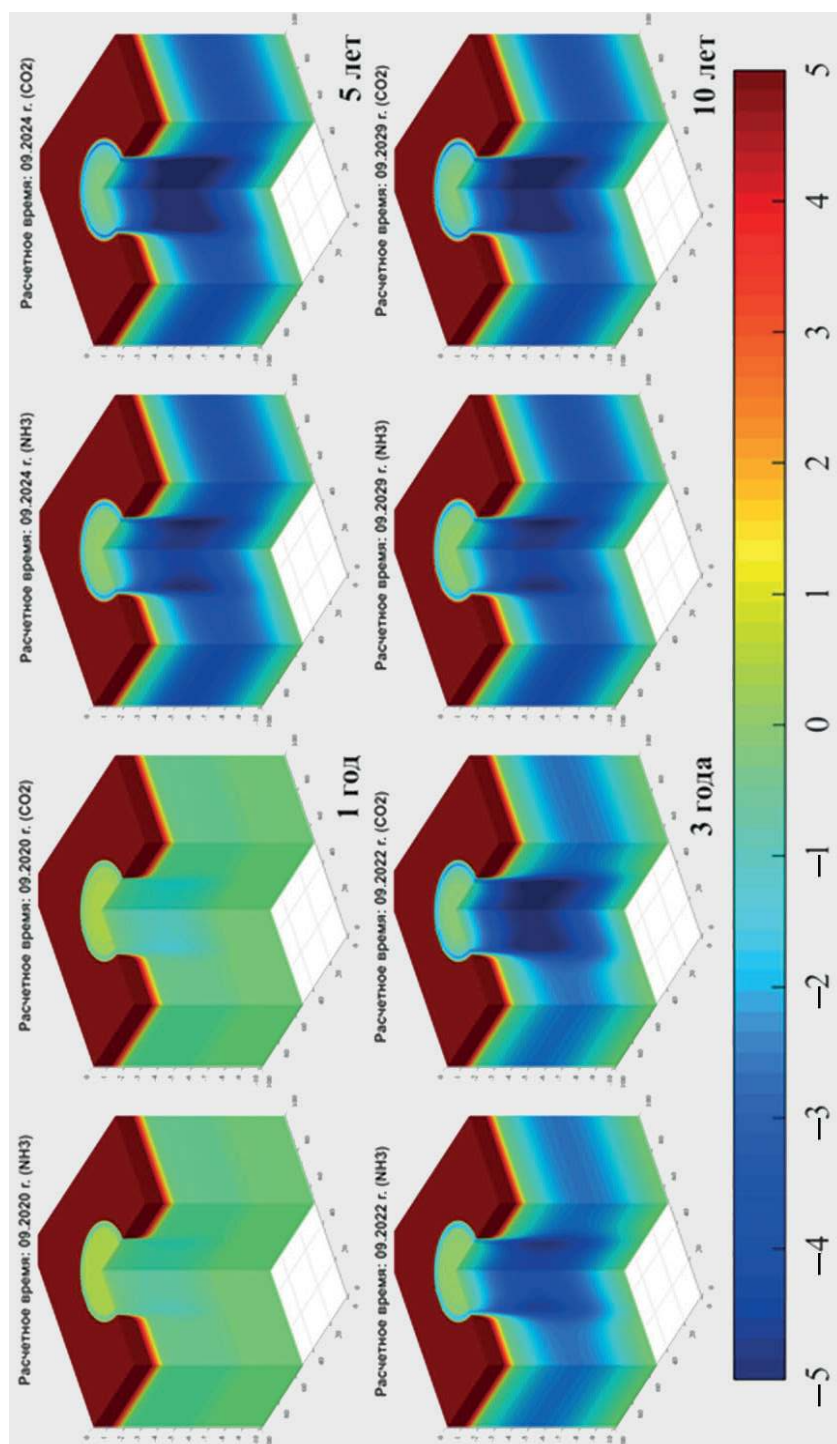


Рис. 8. Состояние температурного поля для метеостанции Тазовский на начало сентября под резервуаром с горячей нефтью (3D-вид)

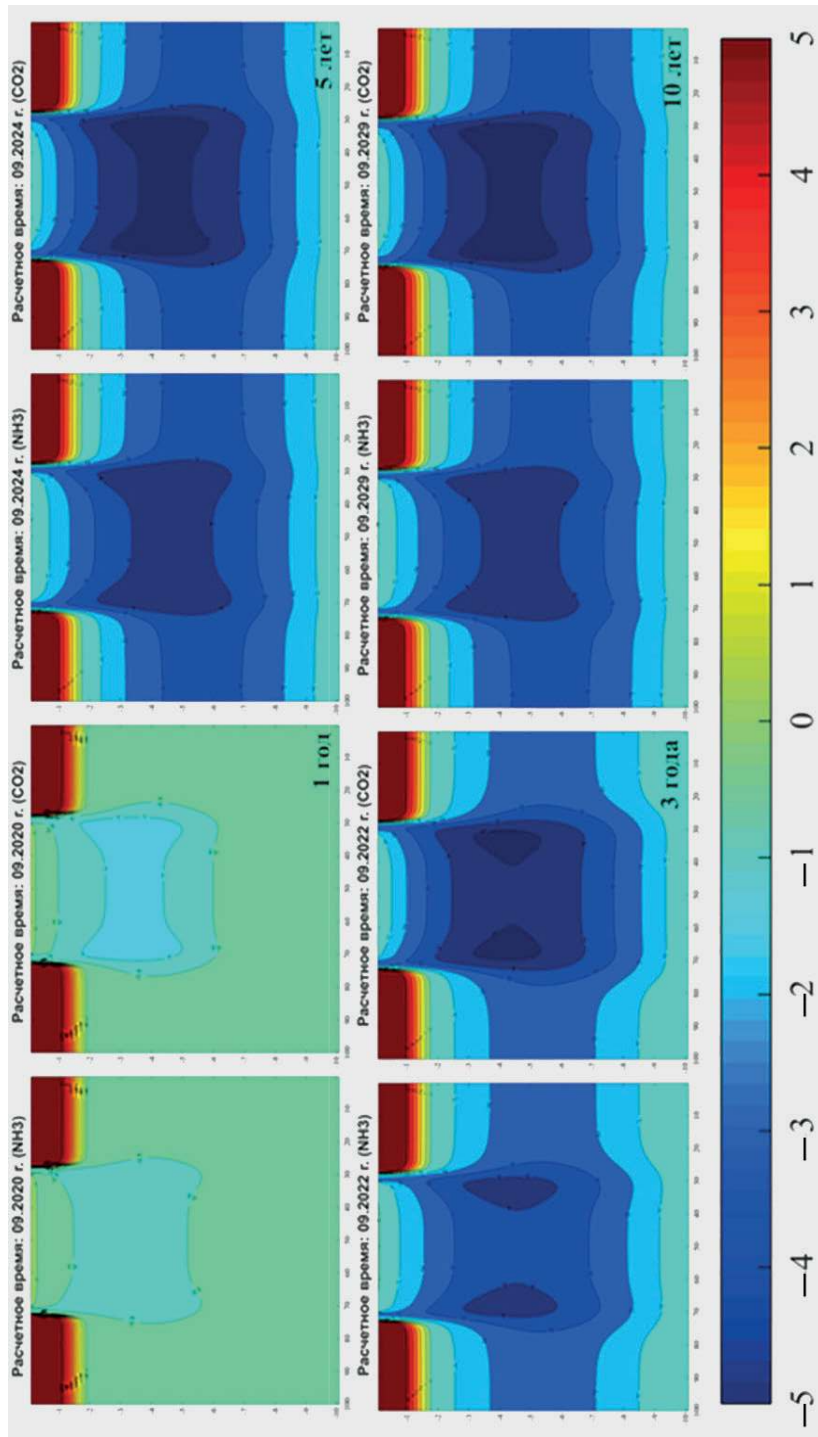


Рис. 9. Состояние температурного поля для метеостанции Тазовский на начало сентября под резервуаром с горячей нефтью в плоскости сечения, проходящего через центр резервуара параллельно трубам охлаждающей системы. Слева — аммиак (NH_3), справа — диоксид углерода (CO_2)

Fig. 9. The state of the temperature field for the Tazovsky weather station at the early September under the tank with hot oil in the sectional plane passing through the center of the tank parallel to the pipes of the cooling system. Ammonia (NH_3) on the left, carbon dioxide (CO_2) on the right

ниже, чем для аналогичной системы, заправленной аммиаком [11]. Сумма этих факторов обуславливает лучшую эффективность диоксида углерода как хладагента для системы ГЕТ. Ввиду этого рекомендуется использовать в качестве теплоносителя именно диоксид углерода.

Выводы

1. Показано, что системы ГЕТ способны охлаждать и поддерживать в мерзлом состоянии ММГ на территориях, расположенных значительно южнее их современного использования для строительства по первому принципу.
2. Согласно проведенным расчетам, установлено, что мерзлое ядро под системой ГЕТ, заправленной диоксидом углерода, формируется раньше и его температура ниже, чем для аналогичной системы, в качестве хладагента для которой выступает аммиак.
3. На основе полученных результатов можно сделать вывод, что диоксид углерода в качестве теплоносителя для системы ГЕТ является более эффективным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аникин Г. В. Компьютерное моделирование работы систем горизонтального охлаждения грунтов / Г. В. Аникин. М., 2009. Деп. в ВИНТИ 30.10.2009. № 674-В2009.
2. Аникин Г. В. Компьютерное моделирование системы охлаждения грунта под резервуаром с нефтью / Г. В. Аникин, К. А. Спасенникова // Криосфера Земли. 2012. Том 16. № 2. С. 60-64.
3. Аникин Г. В. Компьютерное моделирование тепломассопереноса в системах горизонтального охлаждения грунтов / Г. В. Аникин, С. Н. Плотников, К. А. Спасенникова // Криосфера Земли. 2011. Том 15. № 1. С. 33-39.
4. Аникин Г. В. О выборе хладагента для сезонных охлаждающих устройств типа «ГЕТ» / Г. В. Аникин, К. А. Спасенникова // Криосфера Земли. 2014. Том 18. № 2. С. 31-33.
5. Геокриология СССР. Средняя Сибирь / ред. Э. Д. Ершов. М.: Недра, 1989. 414 с.
6. Долгих Г. М. Исследование систем температурной стабилизации грунтов на опытно-промышленном полигоне / Г. М. Долгих и др. // Материалы международной научно-практической конференции по инженерному мерзлотоведению, посвященной XX-летию создания ООО НПО «Фундаментстройаркос». Тюмень: Сити-Пресс, 2011. С. 36-42.
7. Долгих Г. М. Новые перспективы северного строительства жилых и административных зданий с применением углекислотных систем температурной стабилизации грунтов / Г. М. Долгих, И. П. Рило, К. А. Желудкова // Системы температурной стабилизации грунтов оснований в криолитозоне. Актуальные вопросы исследований, расчетов, проектирования, производства, строительства, авторского надзора и мониторинга / ред. В. Д. Ахметова. Новосибирск: Гео, 2014. С. 208-215.

8. Долгих Г. М. Технические решения по замораживанию грунтов оснований, применяемые НПО «Фундаментстройаркос» / Г. М. Долгих, Д. Г. Долгих, С. Н. Окунев // Криосфера нефтегазоносных провинций: материалы международной конференции. Тюмень, 2004. С. 56.
9. Мельников В. П. Инженерные решения в строительстве на вечной мерзлоте в плане повышения энергоэффективности сооружений / В. П. Мельников и др. // Криосфера Земли. 2014. Том 18. № 3. С. 82-89.
10. Мельников В. П. Климатические и криогенные факторы обустройства северных территорий / В. П. Мельников, Д. С. Дроздов, Г. В. Малкова // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2009. Том 15. № 6. С. 75-83.
11. Мельников В. П. Параметры верхних и нижних тепловых нагрузок, ограничивающих функционирование горизонтальной естественно действующей трубчатой системы / В. П. Мельников и др. // Криосфера Земли. 2017. Том 21. № 3. С. 41-48.
12. Различные области применения холода / ред. А. В. Быков. М.: Агропромиздат, 1985. 272 с.
13. РСН 67-87. Инженерные изыскания для строительства. Составление прогноза изменений температурного режима вечномерзлых грунтов численными методами. М.: Госкомитет РСФСР по делам строительства, 1987.
14. Самарский А. А. Вычислительная теплопередача / А. А. Самарский, П. Н. Вабищевич. М.: Едиториал, 2003. 784 с.
15. Феклистов В. Н. Исследование охлаждающей системы типа «ГЕТ» для термостабилизации грунтов оснований / В. Н. Феклистов и др. // Криогенные ресурсы полярных и горных регионов. Состояние и перспективы инженерного мерзлотоведения: материалы международной конференции. Тюмень, 2008. Том 2. С. 165-168.

Alexey A. ISHKOV¹
Anatoly A. GUBARKOV²
Gennady V. ANIKIN³

UDC 536.4

**DETERMINING THE EFFICIENCY OF FUNCTIONING
OF SYSTEMS OF TEMPERATURE STABILIZATION OF SOILS
WITH HORIZONTAL EVAPORATOR FILLED
WITH DIFFERENT REFRIGERANTS***

¹ Leading Specialist, Department of Physico-Chemical Methods of Enhancing Oil Recovery,
Branch of KogalymNIPIneft LLC, Lukoil-Engineering (Tyumen)
IshkovAA@tmn.lukoil.com

² Cand. Sci. (Tech.), Leading Researcher, Subarctic Research and Training Ground
of the Tyumen Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy
of Sciences, Industrial University of Tyumen
agubarkov@rambler.ru

³ Cand. Sci. (Phys.-Math.), Leading Researcher,
Tyumen Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
anikin@ikz.ru

Abstract

The construction of buildings and structures in the zones of distribution of frozen soils follows the principle I. The bearing capacity of frozen soils significantly depends on their value of

* The research was performed within the state mission according to the Tyumen Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences plan for 2018-2020, protocol no 2 of 8 December 2017 (Priority area IX.135. Program IX.135.2. Project IX.135.2.4. Physico-mechanical and physico-chemical models of the evolution of the state of natural-technical systems in the Earth's cryosphere).

Citation: Ishkov A. A., Gubarkov A. A., Anikin G. V. 2019. "Determining the efficiency of functioning of systems of temperature stabilization of soils with horizontal evaporator filled with different refrigerants". Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 5, no 4 (20), pp. 37-57.

DOI: 10.21684/2411-7978-2019-5-4-37-57

negative temperature. When thawed, such soils shrink, which negatively affects the objects built on them. To prevent this, temperature stabilization systems for frozen soils are used.

Simultaneous accounting of the thermal effect on the frozen soil of an engineering object, as well as the temperature stabilization system of soils, is a difficult task, the accuracy of determining the strength characteristics of the soil will depend on the correctness of its solution. This paper presents calculations of the temperature fields of frozen soils with simultaneous exposure to an object with intense heat (RVS with hot oil) and soil temperature stabilization system of the horizontal natural-acting tubular system (GET) type. The calculations follow the previously developed mathematical model of the temperature stabilization system with a horizontal evaporator. The authors consider the efficiency of the operation of the GET system charged with different refrigerants (ammonia and carbon dioxide) for different geocryological subzones of Western Siberia. Particular attention should be paid to the fact that the soil was initially at a close to positive temperature ($-0,1$ °C), but after calculating for 10 years, the entire soil mass around the evaporation part of the temperature stabilization system froze because of the soil temperature stabilization system. Systems charged with carbon dioxide showed better work efficiency. This is due to two factors: a lower value of the lower critical heat load, which gives more working days per year relative to the system charged with ammonia; and the evaporative part of the system on carbon dioxide, which has the average temperature 1 °C lower than ammonia systems. The results show that carbon dioxide as the heat carrier for the GET system is the most effective.

Keywords

Heat and mass transfer, frozen ground, temperature fields, soil temperature stabilization, thermal physics.

DOI: 10.21684/2411-7978-2019-5-4-37-57

REFERENCES

1. Anikin G. V., 2009. Simulating the Operation of Cooling Systems with Horizontal Tubes. Deposited at VINITI 30 October 2009, No. 674-V2009. Moscow: IKZ. [In Russian]
2. Anikin G. V., Spasennikova K. A. 2012. "Computer modelling of the ground cooling system under the oil-tank". *Earth's Cryosphere*, vol. 16, no 2, pp. 60-64. [In Russian]
3. Anikin G. V., Plotnikov S. N., Spasennikova K. A. 2011. "Computer simulation of heat-mass exchange in the systems of horizontal ground cooling". *Earth's Cryosphere*, vol. 15, no 1, pp. 33-39. [In Russian]
4. Anikin G. V., Spasennikova K. A. 2014. "About choice of refrigerating fluid for the seasonal cooling devices of 'GET' type". *Earth's Cryosphere*, vol. 18, no 2, pp. 31-33. [In Russian]
5. Ershov E. D. (ed.). 1989. *USSR Geocryology. Middle Siberia*. Moscow: Nedra. [In Russian]
6. Dolgikh G. M. et al. 2011. "Research of soil temperature stabilization systems at a pilot industrial training ground". *Proceedings of the International Research Conference*

- on Permafrost Engineering on the 20th Anniversary of the Foundation of NPO Fundamentstroyarkos LLC, pp. 36-42. Tyumen: City Press. [In Russian]
7. Dolgikh G. M., Rilo I. P., Zheludkova K. A. 2014. "New prospects for the northern construction of residential and office buildings using carbon dioxide systems for temperature stabilization of soils". In: Akhmetova V. D. (ed.). *Systems of Temperature Stabilization of Base Soils in the Permafrost Zone. Actual Issues of Research, Calculations, Design, Production, Construction, Field Supervision and Monitoring*, pp. 208-215. Novosibirsk: Geo. [In Russian]
 8. Dolgikh G. M., Dolgikh D. G., Okunev S. N. 2004. "Technical solutions for the freezing of base soils used by the NGO Fundamentstroyarkos". *Proceedings of the International Conference "Cryosphere of Oil and Gas Provinces"*, p. 56. Tyumen. [In Russian]
 9. Melnikov V. P. et al. 2014. "Engineering solutions for building on permafrost in perspective energy-efficient enhancement". *Earth's Cryosphere*, vol. 18, no 3, pp. 82-89. [In Russian]
 10. Melnikov V. P., Drozdov D. S., Malkova G. V. 2009. "Climatic and cryogenic factors in the arrangement of the northern territories". *News of Higher Educational Institutions. Geology and Exploration*, vol. 15, no 6, pp. 75-83. [In Russian]
 11. Melnikov V. P. et al. 2017. "Maximum and minimum critical thermal loads constraining the operation of thermosyphons with horizontal evaporator tubes (HET)". *Earth's Cryosphere*, vol. 21, no 3, pp. 41-48. [In Russian]
 12. Bykov A. V. (ed.). 1985. *Various Applications of Cold*. Moscow: Agropromizdat. [In Russian]
 13. RSFSR State Committee for Construction. 1987. *Engineering Surveys for Construction. Making a Forecast of Changes in the Temperature Regime of Permafrost by Numerical Methods*. RSN 67-87. Moscow: RSFSR State Committee for Construction. [In Russian]
 14. Samarsky A. A., Vabishchevich P. N. 2003. *Computational Heat Transfer*. Moscow: Editorial. [In Russian]
 15. Feklistov V. N. et al. 2008. "The study of the 'GET' cooling system type for thermal stabilization of soil bases". *Proceedings of the International Conference "Cryogenic Resources of the Polar and Mountainous Regions. State and Prospects of Permafrost Engineering"*, vol. 2, pp. 165-168. Tyumen. [In Russian]