

Алексей Андреевич ИШКОВ¹
Геннадий Владимирович АНИКИН²

УДК 536.4

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО ШАГА УКЛАДКИ
МЕЖДУ ТРУБАМИ ИСПАРИТЕЛЯ И КОЛИЧЕСТВА
КОНДЕНСАТОРНЫХ БЛОКОВ СИСТЕМЫ
ТЕМПЕРАТУРНОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ ГРУНТОВ ГЕТ***

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

² кандидат физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник, Институт криосферы Земли,
Тюменский научный центр Сибирского отделения РАН
anikin@ikz.ru

Аннотация

Интерес к освоению ресурсной базы арктических и субарктических регионов в последнее время повысился благодаря усилиям СМИ, нефтяных корпораций и правительства, однако необходимо понимать, что при строительстве на грунтах этих регионов, у которых в качестве цементирующего материала выступает лед, происходит нарушение их естественного

* 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 оптимального шага укладки между трубами испарителя и количества конденсаторных блоков системы температурной стабилизации грунтов ГЕТ / А. А. Ишков, Г. В. Аникин // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2020. Том 6. № 1 (21). С. 100-117.

DOI: 10.21684/2411-7978-2020-6-1-100-117

температурного режима, что приводит к таянию ледовой фазы. Известно, что при растеплении мерзлый грунт теряет свои прочностные свойства, в результате чего фундаменты построенных на нем сооружений подвержены риску деформации и разрушения.

Для решения этой проблемы были разработаны сезонно действующие охлаждающие устройства (СОУ), которые охлаждают грунт в холодное время года и «запираются» в теплое. По этой причине данные устройства также называют «тепловыми диодами».

В настоящей работе рассмотрена система температурной стабилизации грунтов ГЕТ (горизонтальная естественно действующая трубчатая система), установленная в основании резервуара вертикального стального (РВС), заполненного горячей водонефтяной смесью. Рассматривается система, в качестве теплоносителя в которой выступает аммиак. Кроме того, в статье проведены расчеты различных конструктивных решений системы ГЕТ, выраженных в вариации таких параметров, как длина испарителя, количество конденсаторов, шаг укладки между трубами испарителя. В работе поднимается вопрос об обосновании шага укладки между трубами испарителя системы ГЕТ и количестве конденсаторных блоков, которых будет достаточно для эффективного функционирования системы, т. е. для поддержания грунтов в мерзлом состоянии. Показано, что для эффективного функционирования системы не обязательно использовать стандартный шаг укладки, равный 0,5 м, а можно его увеличить без риска потерять несущую способность мерзлого грунта. В качестве одного из результатов работы выступает факт переопределенности системы температурой стабилизации грунтов типа ГЕТ при малых расстояниях шага укладки относительно увеличенного расстояния, что выражено в уменьшении количества рабочих дней в течение календарного года при прочих равных условиях.

Ключевые слова

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

DOI: 10.21684/2411-7978-2020-6-1-100-117

Введение

Строительство на многолетнемерзлых грунтах (ММГ) сопровождается рядом осложнений, вызванных нарушением их естественного температурного режима. При растеплении ММГ теряют свою несущую способность, что приводит к появлению просадок и изменению деформационно-напряженного состояния фундаментов. Наихудшим вариантом развития событий при описанном сценарии является разрушение объекта. Очевидно, что нельзя этого допускать.

Для того чтобы избежать растепления грунтов оснований, применяются как активные, так и пассивные методы [11]. К пассивным методам можно отнести строительство фундаментов с проветриваемыми подпольями, применение различных теплоизоляционных материалов (вспененные эпоксидные смолы, полиэтилен, винипласт, фторопласт, пенополиуретан, пенополистирол, пенофенопласт и др.), а также охлаждающих труб и каналов.

Активные методы температурной стабилизации выражены в применении различного рода сезонно охлаждающих устройств. Также нередки случаи использования пассивных и активных методов температурной стабилизации грунтов совместно.

В настоящей работе рассмотрена система температурной стабилизации грунтов ГЕТ (горизонтальная естественно действующая трубчатая система), которая представляет собой стальную герметичную конструкцию, действие которой основано на отведении тепла от грунта в атмосферу за счет механизма кипения и конденсации хладагента внутри замкнутого контура циркуляции. В качестве теплоносителя в данных системах выступает аммиак [8, 13]. Принципиальный вид и способ монтажа системы ГЕТ на примере размещения в основании технологического цеха приведен на рис. 1.

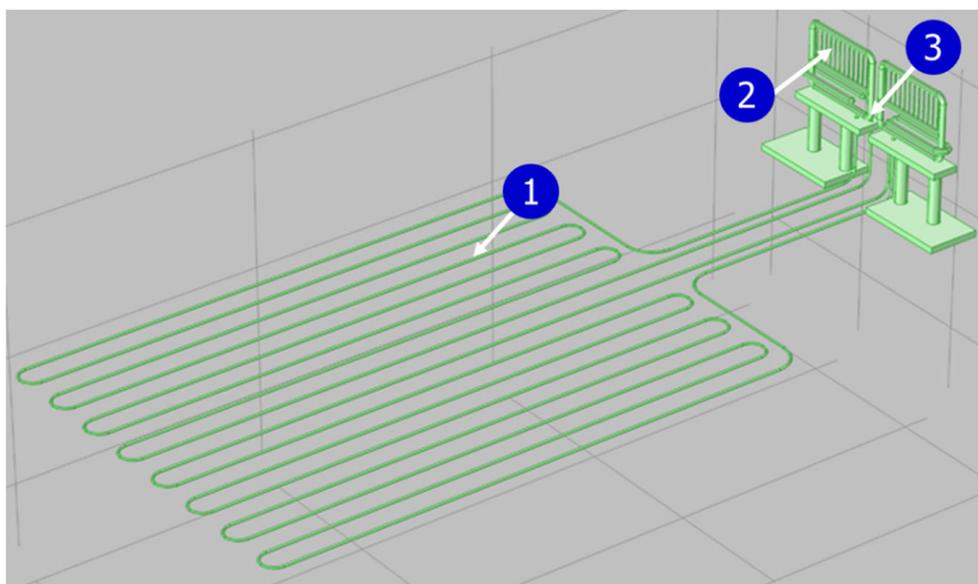


Рис. 1. Термостабилизирующая система типа ГЕТ:

- 1 — испарительная часть,
- 2 — конденсаторная часть,
- 3 — ускоритель циркуляции

Источник: [8].

Fig. 1. Thermostabilizing system of the HET type:

- 1 — evaporative part,
- 2 — condenser part,
- 3 — circulation accelerator

Source: [8].

При проектировании и монтаже системы температурной стабилизации грунтов ГЕТ расстояние между трубами испарителя, как правило, составляет 0,5 м. Количество конденсаторных блоков составляет от 8 шт. с площадью обогрева 100 м² каждый.

Задача по определению состояния температурного поля под резервуаром с горячей водонефтяной смесью системой ГЕТ (пример размещения объекта представлен на рис. 2) уже решалась [2, 4-6], однако новизной данной работы является выявление вероятностей нахождения грунта в талом состоянии под резервуаром при вариации шага укладки между трубами испарителя и количества конденсаторных блоков. Обозначенные конструктивные характеристики системы ГЕТ напрямую влияют на конечную стоимость системы.



Рис. 2. Пример размещения системы ГЕТ в основании резервуара с горячей водонефтяной смесью

Fig. 2. An example of the location of the HET system in the base of a tank with a hot oil-water mixture

Геометрия задачи

Прежде чем перейти к результатам обозначенного исследования, необходимо конкретизировать условия, для которых оно проводилось. В качестве объекта исследования выступают трехмерные температурные поля многолетнемерзлых грунтов, залегающих в основании резервуара с горячей водонефтяной смесью, при одновременном воздействии на них системы температурной стабилизации грунтов ГЕТ. Схема размещения системы ГЕТ и резервуара приведена в работе [7].

Резервуар с горячей водонефтяной смесью на месторождении представляет собой цилиндрический объект с внешним диаметром 40 м и объемом 20 000 м³.

Смесь в емкости находится при температуре 40 °С. Под резервуаром предусмотрена выемка грунта с последующим заполнением по типу «сэндвича» — послойно. Тип материала, его порядковый номер и мощность слоя имеют следующие значения: 1) уплотненный песок средней крупности — 0,9 м; 2) гидрофобный слой — 0,28 м; 3) слой песка — 0,12 м; 4) пленка HDPE — 0,001 м; 5) слой утеплителя «Пеноплэкс» — 0,2 м; 6) слой песка — 1,5 м. Под всей этой отсыпкой находятся трубы испарительной системы ГЕТ. Таким образом, общая мощность настилающей испарительные трубы толщи составляет около 3 м.

Таблица 1

**Физические и теплофизические
параметры грунтов**

Table 1

**Physical and thermophysical
properties of soils**

Описание грунта	Теплопроводность, Вт/(м · °С)		Теплоемкость объемная, кДж/(м ³ · °С)		Температура фазового перехода, °С
	$\lambda_{\text{тал.}}$	$\lambda_{\text{мерз.}}$	$C_{\text{тал.}}$	$C_{\text{мерз.}}$	
Отсыпка	1,57	1,86	2 472,1	1 885,5	0,00
Песок пылеватый	2,23	2,44	2 877,0	2 165,0	-0,05
Супесь	1,63	1,75	2 807,0	2 137,0	-0,11
Суглинок	1,61	1,86	3 345,0	2 263,0	-0,15

Описание грунта	Влажность		Теплота фазового перехода, МДж/м ³	Плотность сухого грунта, кг/м ³
	Суммарная, д. ед.	За счет неза- мерзшей воды, д. ед.		
	W_{tot}	W_w	Q_f	ρ_d
Отсыпка	0,200	0,070	60,970	1 400
Песок пылеватый	0,180	0,000	95,153	1 578
Супесь	0,270	0,071	85,998	1 290
Суглинок	0,240	0,070	88,273	1 550

Литологический разрез и климатические характеристики

Для того чтобы принципиально показать работоспособность системы температурной стабилизации грунтов типа ГЕТ, для всего массива грунта начальная температура принята равной +1 °С. Литологический разрез составляют следующие грунты: песок, супесь и суглинок. Характеристики данных грунтов приведены в таблице 1. Залегание грунтов по глубине имеет следующие значения: 0-3 м — отсыпка, 3-6 м — песок пылеватый, 6-8 м — супесь, 8-30 м — суглинок. Стоит обратить внимание, что при заявленном начальном условии все породы талые.

Теплотехнический прогноз для каждого рассматриваемого в работе варианта был выполнен сроком на 12 лет. Этого времени достаточно для того, чтобы можно было делать выводы по состоянию температурного поля грунтового массива, находящегося в основании емкости с горячей водонефтяной смесью. При этом стоит отметить, что решается задача с использованием стохастического подхода, который подробно описан в работе [5]. Применение стохастического прогнозирования по методу Монте-Карло дает возможность рассмотреть не один конкретный вариант развития событий, а их совокупность. Это позволяет оценить как наиболее позитивный, так и наиболее негативный вариант развития прогнозируемых событий. Вариация событий осуществляется изменением граничных условий на поверхности модельного куба массива мерзлого грунта.

В настоящей работе рассмотрена емкость с горячей водонефтяной смесью, расположенной на Ванкорском нефтегазоконденсатном месторождении. В таблицах 2 и 3 приведены климатические характеристики для района данного месторождения (метеостанция «Игарка»).

Значения среднемесячной мощности солнечной радиации для географической широты 68° с. ш., пересчитанные из суммарной радиации за каждый месяц в соответствии со СНИП 131.13330.2012, приведены в таблице 2. Стоит отметить, что величина солнечной радиации задавалась как есть, без применения стохастического подхода.

Таблица 2

Значения среднемесячной мощности солнечной радиации, Вт/м²

Table 2

Values of the average monthly power of solar radiation, W/m²

Месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
q_p Вт/м ²	—	46,1	104,8	219,4	301,1	333,3	331,9	239,2	137,5	45,7	12,5	—

По данным, приведенным в таблице 3, были рассчитаны характерные распределения вероятностей по каждому параметру для каждого из 12 месяцев года [7]. Стоит отметить, что для значений температуры воздуха и

Таблица 3

Среднемесячные значения температуры (t_a , °C), скорости ветра (v , м/с) и мощности снежного покрова (h , м) для Ванкорского месторождения

Table 3

Monthly average values of temperature (t_a , °C), wind speed (v , m/s) and snow cover power (h , m) for the Vankor field

Дата	t_a , °C	v , м/с	h , м	Дата	t_a , °C	v , м/с	h , м
06.2008	10,20	3,30	0,14	05.2010	-1,50	3,10	0,38
07.2008	15,50	3,20	—	06.2010	8,00	2,80	0,03
08.2008	12,10	2,90	—	07.2010	12,90	2,60	—
09.2008	-7,80	3,40	0,01	08.2010	10,00	2,40	—
10.2008	-4,20	3,70	0,14	09.2010	3,00	2,60	0,01
11.2008	-18,30	2,80	0,50	10.2010	-2,90	2,90	0,08
12.2008	-23,80	3,90	0,70	11.2010	-20,90	2,10	0,32
01.2009	-23,60	4,10	0,76	12.2010	-31,70	2,30	0,41
02.2009	-30,50	2,50	0,81	01.2011	-24,80	2,50	0,58
03.2009	-20,90	2,80	0,94	02.2011	-26,60	2,30	0,67
04.2009	-6,80	3,50	0,87	03.2011	-11,90	3,40	0,85
05.2009	-3,20	3,20	0,57	04.2011	-3,40	2,90	0,63
06.2009	9,10	3,80	0,06	05.2011	4,50	3,10	0,03
07.2009	17,40	2,90	—	06.2011	13,90	2,60	—
08.2009	13,20	2,80	—	07.2011	12,10	2,90	—
09.2009	7,20	4,00	—	08.2011	10,90	2,60	—
10.2009	-4,60	3,70	0,11	09.2011	8,10	2,40	—
11.2009	-22,00	2,80	0,31	10.2011	-2,00	2,60	0,04
12.2009	-34,50	2,10	0,31	11.2011	-17,80	3,40	0,13
01.2010	-29,00	2,40	0,36	12.2011	-16,30	3,20	0,39
02.2010	-33,90	1,30	0,53	01.2012	-27,20	1,80	0,57
03.2010	-16,20	2,50	0,55	02.2012	-18,20	2,70	0,71
04.2010	-6,90	2,40	0,57	03.2012	-15,40	2,10	0,74

толщины снежного покрова применяется нормальное распределение, а для значений скорости ветра — гамма-распределение. Для построенных по архивным данным распределений были рассчитаны параметры математического ожидания и среднеквадратического отклонения. Найденные значения приведены в таблице 4.

Полученные в таблице 4 параметры позволяют, используя генератор псевдослучайных чисел, сгенерировать массив чисел размерностью 48×144 значений для каждой климатической характеристики, т. е. получить 48 вариантов развития климатических характеристик в зависимости от времени с общей продолжительностью 144 месяца (или 12 лет) каждый. Затем для каждого полученного варианта развития событий проводится теплотехнический расчет состояния температурного поля грунта. Каждый расчет начинается и заканчивается в середине сентября для того, чтобы можно было оценить эффективность функционирования системы температурной стабилизации грунтов в период, когда система не работает. В результате решения одной постановки задачи рассчитываются 48 трехмерных температурных полей по состоянию на 15 сентября 2032 г. (при условии начала расчета в 2020 г.) с последующим экспортом в текстовый файл для удобства анализа.

Таблица 4

Параметры распределения для каждого календарного месяца

Table 4

Distribution options for each calendar month

Параметр	Месяц											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
t	-26,20	-27,00	-17,30	-8,12	-0,66	11,20	15,80	11,30	6,60	-4,20	-19,10	-24,40
σ_t	10,80	9,88	10,20	9,24	6,34	5,99	5,18	4,41	4,86	7,29	11,13	11,40
α	1,61	1,54	1,91	2,40	3,66	4,54	2,15	2,68	2,77	2,84	1,58	2,18
λ	0,59	0,60	0,64	0,75	1,06	1,39	0,91	0,94	0,88	0,87	0,59	0,70
h	0,70	0,79	0,86	0,79	0,48	0,00	0,00	0,00	0,00	0,12	0,35	0,53
σ_h	0,21	0,19	0,19	0,20	0,22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	0,13	0,17

Примечания: \bar{t} , σ_t , \bar{h} , σ_h — рассчитанные значения математического ожидания и среднеквадратического отклонения для температуры (префикс t) и толщины снежного покрова (префикс h); α , λ — рассчитанные значения параметров гамма-распределения для скорости ветра.

Notes: \bar{t} , σ_t , \bar{h} , σ_h — calculated mean values and standard deviations for temperature (prefix t) and snow thickness (prefix h); α , λ — calculated gamma distribution parameters for wind speed.

Численная реализация

Для решения поставленной в работе цели рассмотрены следующие конструктивные вариации: шаг укладки между трубами испарителя (м) — 0,5; 1; 1,5; количество конденсаторных блоков (шт.) — 10, 7, 4, 1. Таким образом, в рамках данной работы проведен теплотехнический расчет для 12 конфигураций системы ГЕТ.

Стоит отметить, что для понимания эффективности функционирования системы ГЕТ с различными конструктивными решениями необходимо решить не только внешнюю задачу, выраженную в определении температурных полей мерзлого грунта, но и внутреннюю задачу, которая состоит в определении характеристик двухфазного потока хладагента внутри контура циркуляции системы ГЕТ.

Рассмотрим постановку внешней в внутренней задачи.

Постановка внешней задачи

Конечно-разностная аппроксимация температурного поля в грунте осуществляется по явной схеме [12]. Координатная сетка равномерная с шагами по оси x и z — 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 . Учет фазовых переходов в мерзлом грунте осуществляется с помощью метода эффективной теплоемкости.

Температура испарительной части зависит от тепловой мощности, подаваемой на испаритель, температуры конденсаторной части, высоты подъема конденсатора, длины испарителя, и рассчитывается на каждом шаге дискретизации по времени согласно физико-математической модели, приведенной в работах [1, 3, 10].

Резервуар с горячей водонефтяной смесью располагается по центру верхней грани куба модели. Граничные условия на поверхности учитывают скорость ветра, величину снежного покрова, температуру воздуха и мощность солнечной радиации (таблицы 2 и 3).

Постановка внутренней задачи

Функционирование системы ГЕТ можно описать следующим образом (рис. 3). На испарительные трубы поступает тепловой поток от грунта (Q_{in}), вследствие чего хладагент начинает постепенно нагреваться. Таким образом, его температура доходит до точки начала кипения, после чего происходит фазовый переход из жидкой фазы в парообразную с соответствующим поглощением латентной теплоты фазового перехода. Т. е. в испарителе с некоторой точки (y_{max}) присутствует двухфазный поток. Начиная с момента вскипания хладагента величина массового газосодержания начинает расти вплоть до точки входа в ускоритель циркуляции. Двухфазный поток перемещается в сторону конденсаторного блока и в конечном счете приходит непосредственно на его вход. Далее жидкость снова уходит в контур циркуляции, а пар со взвешенны-

ми каплями жидкости поднимается в конденсатор, попутно проходя через ускоритель циркуляции. В ускорителе циркуляции происходит сепарация жидкой фазы хладагента, которая уходит в контур циркуляции, и в конденсатор поступает только пар. В нем пар претерпевает обратный фазовый переход «пар — жидкость», при этом выделяя латентную теплоту фазового перехода (Q_{out}). Это тепло через развитую поверхность оребрения конденсаторного блока передается в атмосферу. После конденсации охлажденный хладагент стекает в испаритель системы, тем самым замыкая цикл движения.

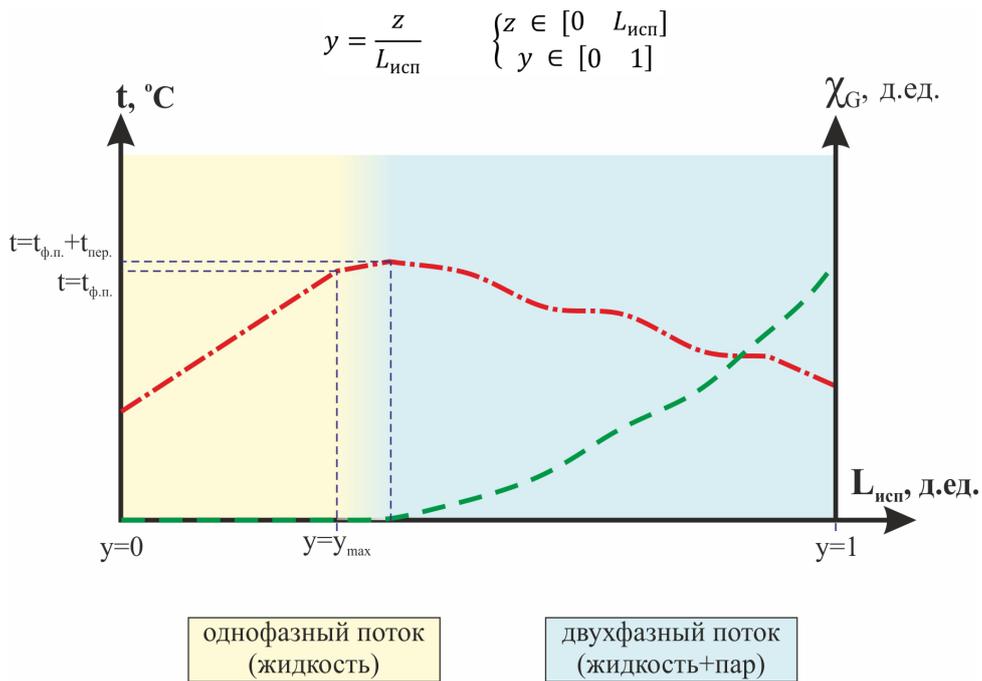


Рис. 3. Динамика изменения температуры хладагента (красная линия) и массового газосодержания (зеленая линия) по длине контура трубы испарителя

Fig. 3. Dynamics of changes in refrigerant temperature (red line) and mass gas content (green line) along the length of the evaporator pipe circuit

Для анализа функционирования двухфазного потока в трубах системы ГЕТ используются общие гидродинамические уравнения для массы, импульса, энергии и энтропии фиксированного объема смеси пара и жидкости, которые, согласно принципу локального равновесия, расписываются для конечного участка трубы системы ГЕТ. Подробный вывод уравнения сохранения импульса внутри контура циркуляции системы ГЕТ приведен в работе [3]. В данной работе это уравнение представлено без вывода:

$$\begin{aligned}
\varphi_G(1)(\rho_L - \rho_G)gH_K &= \xi(Re_x, \bar{\Delta}) \frac{G_x^2 L_x}{2D\sigma^2 \rho_L} + \\
&+ \xi(Re_0, \bar{\Delta}) \frac{G^2(L_{\text{под}} + y_n \cdot L_{\text{исп}})}{2D\sigma^2 \rho_L} + \\
&+ \int_{y_n}^1 \Phi_L^2(y') \xi(Re_L(y'), \bar{\Delta}) \frac{G_L(y')^2}{2D\sigma^2 \rho_L} \frac{U}{q(y')} dy' + \\
&+ \Phi_L^2(1) \xi(Re_y, \bar{\Delta}) \frac{G_y^2 L_{\text{от}}}{2D\sigma^2 \rho_L} + \Delta p U,
\end{aligned} \tag{1}$$

$$\Delta p U = \rho_L (V_L(1))^2 \varphi_L(1) + \rho_G (V_G(1))^2 \varphi_G(1) - \rho_L (V_L(0))^2,$$

где $\varphi_G(1)$, $\varphi_L(1)$ — истинное объемное газосодержание и содержание жидкости на выходе из испарителя; H_K — высота подъема конденсаторной части; $\Phi_L^2(1)$ — эмпирический коэффициент; $\xi(Re_x, \bar{\Delta})$ — коэффициент сопротивления трения; D — гидравлический диаметр трубы; $S_{\text{тр}}^2$ — площадь сечения трубы; $G_L(y)$ — массовый расход жидкого хладагента в зависимости от длины испарительной части; G — массовый расход парожидкостной смеси; q — тепловой поток на единицу длины испарительной части; ρ_G, ρ_L — плотности жидкости и пара; $L_{\text{исп}}$ — общая длина испарительной части; L_x — длина трубы от ускорителя циркуляции до узла соединения потоков жидкого хладагента; $L_{\text{под}}, L_{\text{от}}$ — длины подводных и отводных труб; $V_L(0)$ и $V_L(1)$ — истинные скорости жидкости на входе и выходе из испарителя; $V_G(1)$ — истинная скорость пара на выходе из испарителя [10].

Решая уравнение (1) для каждого из вариантов, можно оценить работоспособность системы с точки зрения оценки двухфазных потоков. При чрезмерном уплотнении расстояния между трубами испарителя удельный тепловой поток на них будет сокращаться, и при достижении некоторого граничного значения система прекратит свое функционирование. Тепловая нагрузка, соответствующая данному случаю, называется нижней критической тепловой нагрузкой. Для случая, когда расстояние между трубами испарительной части будет, наоборот, увеличиваться, в свою очередь будет расти удельный тепловой поток. При достижении верхней критической тепловой нагрузки на выходе из испарителя будет идти только пар, и эффективная работа системы будет остановлена. Более подробно об исследовании критических тепловых нагрузок для системы ГЕТ различных конструктивных решений можно ознакомиться в работах [9, 10].

Совершенно очевидно, что при варьировании расстояния между трубами испарительной части будет изменяться и общая длина испарителя. Так, для расстояния между трубами испарителя $\Delta z = 0,5$ м общая длина трубы испарителя будет равняться 3 214 м, для $\Delta z = 1$ м общая длина испарителя составит 1 606 м, а при $\Delta z = 1,5$ м — 1 054 м. Все приведенные в работе расчеты выполнены для геометрии рассматриваемого выше резервуара с горячей водонефтяной смесью.

Таблица 5

Вероятность нахождения грунта в талом состоянии под центром резервуара для различных конструктивных конфигураций системы ГЕТ

Table 5

The probability of the soil being in a thawed condition under the center of the tank for various structural configurations of the HET system

Расстояние между трубами испарителя Δz , м	0,5				1				1,5			
Общая длина труб испарителя, м	3 214				1 606				1 054			
Количество конденсаторных блоков	10	7	4	1	10	7	4	1	10	7	4	1
Вероятность нахождения грунта в талом состоянии	99,81	99,81	99,81	99,81	99,81	99,81	99,81	99,81	99,81	99,81	99,81	99,81
	99,81	99,81	99,81	99,81	99,81	99,81	99,81	99,81	99,81	99,81	99,81	99,81
	99,80	99,80	99,80	99,80	99,80	99,80	99,80	99,81	99,80	99,80	99,80	99,81
	99,73	99,73	99,74	99,78	99,75	99,76	99,76	99,79	99,77	99,78	99,78	99,80
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,02	0,02	0,04	0,56	0,03	0,04	0,07	0,81	0,07	0,09	0,15	1,23
	0,09	0,12	0,20	1,84	0,19	0,24	0,38	2,76	0,43	0,52	0,79	3,99
	0,15	0,20	0,33	2,52	0,34	0,41	0,65	3,94	0,77	0,90	1,35	5,25
	0,17	0,23	0,38	2,74	0,39	0,48	0,75	4,32	0,91	1,07	1,59	5,67
	0,18	0,24	0,39	2,79	0,41	0,50	0,77	4,43	0,95	1,12	1,67	5,80
	0,18	0,24	0,39	2,81	0,41	0,50	0,78	4,47	0,97	1,14	1,70	5,85
	0,18	0,24	0,39	2,81	0,41	0,50	0,78	4,47	0,97	1,14	1,70	5,86
	0,18	0,24	0,39	2,81	0,41	0,50	0,78	4,47	0,97	1,14	1,70	5,85
	0,18	0,24	0,39	2,79	0,41	0,50	0,77	4,43	0,96	1,13	1,68	5,80
	0,17	0,23	0,38	2,74	0,39	0,48	0,75	4,32	0,92	1,09	1,61	5,68
	0,15	0,20	0,33	2,52	0,34	0,41	0,65	3,94	0,80	0,95	1,40	5,27
	0,09	0,12	0,20	1,84	0,19	0,24	0,38	2,76	0,47	0,56	0,85	4,01
	0,02	0,02	0,04	0,56	0,03	0,04	0,07	0,81	0,08	0,10	0,16	1,20
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	99,73	99,73	99,74	99,78	99,75	99,76	99,76	99,79	99,79	99,79	99,79	99,81
99,80	99,80	99,80	99,80	99,80	99,80	99,80	99,81	99,81	99,81	99,81	99,81	
99,81	99,81	99,81	99,81	99,81	99,81	99,81	99,81	99,81	99,81	99,81	99,81	
99,81	99,81	99,81	99,81	99,81	99,81	99,81	99,81	99,81	99,81	99,81	99,81	

Полученные результаты и их обсуждение

Как было сказано выше, всего было рассчитано 12 вариантов конфигураций системы ГЕТ. Стоит отметить, что для каждого из этих вариантов была применена стохастическая постановка (48 решений). Т. е. в общей сложности было решено 576 задач. Для оценки того, является ли грунт под системой ГЕТ талым или мерзлым, рассмотрим плоскость, проходящую через центр резервуара. Выбор именно этой плоскости обусловлен тем, что она является самой опасной ввиду больших теплоточков от резервуара и отсутствия охлаждающего эффекта от дневной поверхности.

Применяя стохастический подход, получаем возможность рассчитать вероятность нахождения грунта в талом или мерзлом состоянии под обозначенным сечением. Таким образом, была составлена сводная таблица 5, в которой приведена рассчитанная вероятность.

Состояние температурного поля и вероятность нахождения грунта в талом состоянии представлены на начало осени (15 сентября 2032 г., если расчет начат в 2020 г.). По этой причине на краях расчетной области, т. е. области, на которой отсутствует резервуар и система температурной стабилизации грунтов и осуществляется теплообмен с атмосферой, вероятность нахождения грунта в талом состоянии — практически 100%.

Исходя из полученных данных, можно сделать вывод, что система температурной стабилизации грунтов типа ГЕТ будет успешно функционировать в подавляющем большинстве случаев. Единственный вариант, когда система ГЕТ будет вызывать опасения с точки зрения надежности охлаждения мерзлых грунтов, соответствует случаю с использованием одного конденсаторного блока. Проведенные расчеты показывают, что использование стандартной комплектации системы ГЕТ, включающей в себя 10 конденсаторных блоков и шаг укладки между трубами испарителя 0,5 м, не является обязательным по причине того, что система становится избыточной. Уменьшение количества конденсаторных блоков и увеличение расстояния между трубами испарительной системы позволит существенно уменьшить конечную стоимость системы ГЕТ.

Далее необходимо рассмотреть функционирование системы с точки зрения возможности двухфазных течений при каждом конструктивном исполнении системы ГЕТ. Для расчета характеристик двухфазных течений используется математическая модель, описанная в работах [3, 10]. В качестве входных параметров выступают следующие величины: длина труб испарителя, высота подъема конденсатора, температура конденсатора и удельная тепловая нагрузка на трубы испарителя. Согласно полученным данным, чем меньше расстояние между трубами испарителя, тем меньше количество дней в году система ГЕТ функционирует, что обусловлено низкой плотностью теплового потока на трубы испарителя и невозможностью системы запуститься в работу. Также стоит отметить, что при шаге укладки испарителя $\Delta z = 1,5$ м система ГЕТ при стандартном диаметре испарителя не работает.

Однако увеличение диаметра испарителя в два раза решает эту проблему, и функционирование системы возобновляется. Этот факт стоит учитывать при проектировании.

Выводы

1. В работе приведены результаты теплотехнических стохастических расчетов состояния температурного поля под резервуаром с горячей водонефтяной смесью с учетом функционирования системы температурной стабилизации грунтов типа ГЕТ. В общей сложности было проведено 576 расчетов.
2. Рассмотрены различные конструктивные вариации системы ГЕТ, выраженные в изменении длины испарительной части, числе конденсаторных блоков и различных шагах укладки испарительной части. Показано, что единственным вариантом, когда система ГЕТ будет вызывать опасения с точки зрения надежности охлаждения мерзлых грунтов под резервуаром, соответствует случаю с использованием одного конденсаторного блока.
3. Исходя из полученных данных, сделан вывод о том, что чем меньше расстояние между трубами испарителя, тем меньшее количество дней в году система ГЕТ функционирует, что обусловлено низкой плотностью теплового потока на трубы испарителя.
4. При проектировании системы ГЕТ в основании резервуара с горячей водонефтяной смесью стоит учитывать, что при шаге укладки испарителя $\Delta z = 1,5$ м система ГЕТ при стандартном диаметре испарителя не функционирует. Увеличение диаметра испарителя в два раза решает эту проблему.

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-B2009.
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. Метод стохастического прогнозирования нахождения температуры грунтов с помощью систем «ГЕТ» / Г. В. Аникин и др. // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2017. № 1. С. 35-40.
5. Аникин Г. В. Стохастическое прогнозирование состояния грунтов под объектами, построенными на вечной мерзлоте / Г. В. Аникин и др. // Вестник Тюменского государственного университета. 2013. № 7. С. 46-53.

6. Аникин Г. В. Усовершенствование метода стохастического прогнозирования работы горизонтальной естественно-действующей трубчатой системы / Г. В. Аникин и др. // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2017. № 6. С. 30-34.
7. Долгих Г. М. Статистическое моделирование работы системы «ГЕТ», установленной в основании нефтяного резервуара / Г. М. Долгих и др. // Криосфера Земли. 2015. Том 19. № 1. С. 70-77.
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. Ишков А. А. Сравнение функционирования системы «ГЕТ», заправленной диоксидом углерода и аммиаком / А. А. Ишков, Г. В. Аникин // Нефтепромысловое дело. 2019. № 6 (609). С. 69-75.
10. 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.
11. Различные области применения холода / ред. А. В. Быков. М.: Агропромиздат, 1985. 272 с.
12. Самарский А. А. Вычислительная теплопередача / А. А. Самарский, П. Н. Вабищевич. М.: Едиториал, 2003. 784 с.
13. Феклистов В. Н. Исследование охлаждающей системы типа «ГЕТ» для термостабилизации грунтовых 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
Gennady V. ANIKIN²

UDC 536.4

**DETERMINATION OF THE OPTIMAL STEP OF INSTALLATION
BETWEEN THE EVAPORATOR PIPES AND THE NUMBER
OF CONDENSER UNITS OF THE SYSTEM OF TEMPERATURE
STABILIZATION OF SOILS HET***

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. (Phys.-Math.), Leading Researcher,
Earth Cryosphere Institute, Tyumen Scientific Centre of Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences
anikin@ikz.ru

Abstract

Interest in developing the resource base of the Arctic and subarctic regions has recently increased thanks to the efforts of the media, oil corporations and the government, however, it must be understood that during the construction on the soils of these regions, in which ice acts as a cementing material, their natural temperature regime is violated. leading to the melting of the ice phase. It is known that when thawing frozen soil it loses its strength

* The research was supported out according to the state task, according to the Research Plan of the Tyumen Scientific Center of the SB RAS for 2018-2020, protocol No. 2 dated 08.12.2017 (Priority direction IX.135. Program IX.135.2. Project IX.135.2.4. Physico-mechanical and physical chemical models of the evolution of the state of natural-technical systems in the cryosphere of the Earth).

Citation: Ishkov A. A., Anikin G. V. 2020. "Determination of the optimal step of installation between the evaporator pipes and the number of condenser units of the system of temperature stabilization of soils HET". Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 6, no. 1 (21), pp. 100-117.
DOI: 10.21684/2411-7978-2020-6-1-100-117

properties, as a result of which the foundations of the structures on which they are built are at risk of deformation and destruction.

To solve this problem, special devices have been developed - seasonally acting cooling devices (SOU), which cool the soil in the cold season and "lock up" in the warm. For this reason, these devices are also called "thermal diodes."

In this work, we consider the system of temperature stabilization of soils HET (horizontal naturally acting tubular system) installed at the base of a vertical steel tank (PBC) filled with hot oil-water mixture. A system is considered, in which ammonia acts as a coolant. In addition, the article carried out calculations of various design solutions of the HET system, expressed in variations of such parameters as the length of the evaporator, the number of condensers, and the installation step between the pipes of the evaporator. The work raises the question of justifying the laying step between the pipes of the HET system evaporator and the number of condenser blocks that will be sufficient for the effective functioning of the system, i.e., to maintain the soil in a frozen state. It is shown that for the effective functioning of the system it is not necessary to use a standard paving step equal to 0.5 m, but it can be increased without the risk of losing the bearing capacity of frozen soil. One of the results of the work is the fact that the system is overdetermined by the temperature of stabilization of soils of the HET type at small distances of the laying step relative to the increased distance, which is expressed in a decrease in the number of working days during a calendar year, all other things being equal.

Keywords

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

DOI: 10.21684/2411-7978-2020-6-1-100-117

REFERENCES

1. Anikin G. V., 2009. "Computer simulation of the operation of horizontal soil cooling systems". Moscow: Dep. v VINITI 30.10.2009, No. 674-V2009. [In Russian]
2. Anikin G.V., Spasennikova K. A. 2012. "Computer simulation of a soil cooling system under an 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. et al. 2017. "The method of stochastic prediction of finding the temperature of soils using 'HET' systems". *Soil mechanics and foundation engineering*, no. 1, pp. 35-40. [In Russian]
5. Anikin G.V. et al. 2013. "Stochastic prediction of soil conditions under objects built on permafrost". *Tyumen State University Herald*, no. 7. pp. 46-53. [In Russian]

6. Anikin G.V. et al. 2017. "Improving the method of stochastic forecasting the operation of a horizontal naturally acting tubular system". *Soil mechanics and foundation engineering*, no. 6. pp. 30-34. [In Russian]
7. Dolgikh G. M. et al. 2015. "Statistical modelling of HET system installed at the base of oil reservoir". *Earth's Cryosphere*, vol. 19, no. 1, pp. 70-77. [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'". *Materials of the Intern. conf. "Cryosphere of oil and gas provinces"*. Tyumen, 56 pp. [In Russian]
9. Ishkov A. A., Anikin, G. V. 2019. "Comparison of the functioning of the 'HET' system, charged with carbon dioxide and ammonia". *Oilfield Engineering*, no. 6 (609), pp. 69-75. [In Russian]
10. Melnikov V. P. et al. 2017. "The parameters of the upper and lower thermal loads, limiting the functioning of the horizontal naturally acting tubular system". *Earth's Cryosphere*, vol. 21, no. 3, pp. 41-48. [In Russian]
11. Bykov A.V. (ed.). 1985. *Various applications of cold*. Moscow: Agropromizdat, 272 pp. [In Russian]
12. Samarsky A. A., Vabishchevich P. N. 2003. *Computational Heat Transfer*. Moscow: Editorial, 784 pp. [In Russian]
13. Feklistov V. N. et al. 2008. "The study of the cooling system type 'HET' for thermal stabilization of soil bases". *Materials 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]