

Моделирование работы термостабилизатора с распределенным подводом хладагента к внешней поверхности

Александр Янович Гильманов¹✉, Андрей Сергеевич Ким²,
Александр Павлович Шевелёв¹

¹ Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия

² Альянс, Тюмень, Россия

Контакт для переписки: a.gilmanov@utmn.ru✉

Аннотация. Для предотвращения обрушения зданий и сооружений в условиях криолитозоны из-за протаивания вечномерзлого грунта вследствие тепловой нагрузки от этих объектов необходимо использовать термостабилизаторы. Широкое распространение среди них получили двухфазные пассивные термосифоны, основными преимуществами которых являются высокая степень автономности и отсутствие дополнительных экономических затрат на компрессоры. Для повышения эффективности работы устройства впервые предлагается конструкция с распределенным подводом хладагента к внешней поверхности за счет сегментирования трубы, разделяющей нисходящий и восходящий поток теплоносителя. Определение оптимальных параметров работы такого термостабилизатора невозможно без этапа моделирования процессов тепломассопереноса. Всё вышеперечисленное обуславливает цель исследования — расчет распределения температуры в грунте при использовании термостабилизатора с распределенным подводом хладагента к внешней поверхности. Такой расчет проводится с использованием физико-математической модели термостабилизатора с выделением трех связанных задач: 1) описания движения жидкого хладагента по внутренней трубе термосифона под действием гравитационных сил; 2) расчета восходящего потока хладагента в зазоре между внешней трубой термостабилизатора и сегментами разделителя потоков; 3) расчета кондуктивного теплообмена в системе «термостабилизатор — грунт». В основе моделирования лежат подходы неизотермической многофазной механики и теплофизики. Система уравнений для первой задачи решается аналитически, для остальных — численно. Проведен расчет температурного профиля в зазоре между устройством, разделяющим

потоки и состоящим из четырех сегментов, и трубой термостабилизатора, а также в грунте на удалении 1 м от поверхности термосифона. Предложенная модель позволяет определить радиальное распределение температуры, согласующееся с практическими данными с точностью 90%. В результате исследования установлено, что использование такого разделяющего устройства позволяет увеличить эффективность снижения температуры грунта на 20%.

Ключевые слова: термостабилизатор, термосифон, теплообмен, уравнение теплопроводности, физико-математическая модель, уравнение неразрывности, закон сохранения импульса, температурный профиль, мерзлый грунт, криолитозона

Цитирование: Гильманов А. Я., Ким А. С., Шевелёв А. П. 2024. Моделирование работы термостабилизатора с распределенным подводом хладагента к внешней поверхности // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. Том 10. № 1 (37). С. 55–71. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2024-10-1-55-71>

Поступила 06.02.2024; одобрена 04.03.2024; принята 22.03.2024

Simulation of heat stabilizer with a distributed refrigerant supply to the outer surface

Alexander Ya. Gilmanov¹, Andrey S. Kim², Alexander P. Shevelev¹

¹ University of Tyumen, Tyumen, Russia

² Alyans, Tyumen, Russia

Corresponding author: a.y.gilmanov@utmn.ru

Abstract. To prevent the breaking of buildings in the cryolithozone due to thawing of permafrost soil due to thermal load from these objects, it is necessary to use heat stabilizers. Two-phase passive thermosyphons are widely used among them. To increase the efficiency of such device, a design of a heat stabilizer with a distributed refrigerant supply to the outer surface is proposed. Determining the optimal operating parameters of such device is impossible without a stage of modeling heat and mass transfer. This determines the purpose of the study — the calculation of the temperature distribution in the ground with such heat stabilizer. A calculation is carried out using physico-mathematical model of it with three related tasks: 1) description of the movement of liquid refrigerant through the inner tube of the thermosyphon; 2) calculation of the upward flow of refrigerant in the gap between the outer tube and the segments of the flow separator; 3) calculation of conductive heat transfer in the heat stabilizer-soil system. The modeling is based on the approaches of non-isothermal multiphase mechanics

and thermophysics. The temperature profile was calculated in the gap between the flow-separating device consisting of four segments and the heat stabilizer pipe, as well as in the soil at 1 m from the surface of the thermosyphon. The proposed model makes it possible to determine the radial temperature distribution consistent with practical data with an accuracy of 90%. It was found that the use of such separating device can increase the efficiency of reducing soil temperature by 20%.

Keywords: heat stabilizer, thermosyphon, heat and mass transfer, thermal conductivity equation, physical and mathematical simulation, continuity equation, law of conservation of momentum, temperature profile, frozen soil, cryolithozone

Citation: Gilmanov, A. Ya., Kim, A. S., & Shevelev, A. P. (2024). Simulation of heat stabilizer with a distributed refrigerant supply to the outer surface. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, 10(1), 55–71. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2024-10-1-55-71>

Received Feb. 6, 2024; Reviewed Mar. 4, 2024; Accepted Mar. 22, 2024

Введение

Значительную часть активно развиваемой территории Российской Федерации составляет криолитозона. Строительство жилых и промышленных зданий, прокладка магистральных нефте- и газопроводов сопряжены с рисками обрушения конструкций из-за протаивания вечной мерзлоты вследствие тепловой нагрузки от обозначенных объектов [Сао и др., 2021; Wang и др., 2023].

Кратковременным способом решения данной проблемы является возведение зданий на сваях с вентилируемым зазором между поверхностью земли и основанием здания. Такой способ позволяет снизить тепловую нагрузку на вечномерзлый грунт за счет конвективных потоков холодного воздуха в зимний период. Однако за счет теплопроводности материалов свай в долгосрочной перспективе происходит нагрев поверхностных слоев грунта и его постепенное протаивание.

Для борьбы с этим явлением на практике широкое распространение получило использование термостабилизаторов — устройств, помещаемых в грунт и осуществляющих его охлаждение за счет циркуляции хладагента внутри самой установки. Среди этих устройств выделяются активные (всесезонные) и пассивные (сезонные) [Ефимов и др., 2017; Глухов и др., 2021]. Активные термостабилизаторы предполагают поддержание хладагента в жидком состоянии с использованием охлаждающих устройств, работающих круглогодично или в период положительных температур окружающего воздуха [Meng и др., 2024]. В пассивных термостабилизаторах хладагент циркулирует внутри установки за счет естественных конвективных потоков [Badache и др., 2019; Liu и др., 2024], обусловленных отрицательной температурой воздуха в зимний период. Преимуществом таких установок являются минимальные затраты на поддержание термостабилизатора в рабочем состоянии и автоматическое отключение в летний период, что предотвращает протаивание грунта в результате работы в инверсном тепловом режиме.

Среди пассивных термостабилизаторов выделяются однофазные и двухфазные устройства [Валиева, 2016; Пономарёв и др., 2020; Fuso и др., 2023]. В однофазных термосифонах используется хладагент в жидком или газообразном состоянии, а в двухфазных теплоноситель претерпевает фазовый переход «жидкость — пар» вблизи охлаждающей поверхности устройства. Сам термостабилизатор, как правило, состоит из внутренней (слабо проводящей тепло) и внешней трубы (рис. 1). Внутренняя труба служит для транспортировки хладагента в нижнюю часть термостабилизатора в жидком состоянии. В результате фазового перехода первого рода из окружающего мерзлого или замораживаемого грунта поглощается дополнительное количество теплоты, равное теплоте испарения хладагента. Такие термостабилизаторы нашли распространение в России, Китае, Канаде [Yu и др., 2021; Chen и др., 2023]. В качестве теплоносителей обычно используются углекислота, аммиак и фреон.

В стандартных конструкциях термостабилизаторов фазовый переход происходит в его нижней части в зазоре между внутренней и внешней трубой, в результате чего эффективность охлаждения верхних слоев грунта оказывается недостаточно высокой. Особую актуальность это приобретает при расположении термостабилизаторов в непосредственной близости от свай в силу тепловой нагрузки, передаваемой в грунт через сваю здания. Из-за уплотнения льда при забивке сваи зачастую не получается расположить ее в грунте целиком на всю проектную глубину. Поэтому на практике получил распространение способ, при котором сваи опускаются в заранее пробуренную скважину. При таком способе строительства помещение термостабилизатора в прямом контакте со свайей в той скважине учитывается уже на этапе проектирования здания. При этом может возникнуть проблема с обдувом надземной части термостабилизатора, если свая будет перекрывать поток воздуха в зависимости от направления ветра. Для борьбы с этим явлением возможно расположение термосифонов с учетом розы ветров. Перспективным также видится отклонение надземной части термостабилизатора в вертикальной плоскости в сторону, противоположную расположению сваи, для интенсификации обдува. Однако более эффективным представляется расположение термостабилизатора вблизи одного из углов сваи на расстоянии от нее порядка 0,5 м. Такое расположение позволяет воздействовать сразу на две ее стенки, в отличие от расположения термостабилизатора вблизи одной из стенок сваи, однако требует бурения отдельной скважины для установки термостабилизатора.

При описанном расположении термосифона предлагается модификация его конструкции, позволяющая более равномерно охлаждать грунт в вертикальной плоскости. Внутренняя труба такого термостабилизатора состоит из сегментов, разделенных между собой небольшими зазорами, служащими для подвода жидкого хладагента в зазор между внутренней и внешней трубой по всей глубине установки (рис. 2). Каждый сегмент представляет собой отдельную цилиндрическую трубу, изготовленную из материала с низким коэффициентом теплопроводности. Толщина стенки трубы составляет 3 мм. Сегменты для постоянного размера зазоров скреплены тонкими стержнями, и вся эта конструкция лежит на основании термосифона. Варьирование размеров и количества сегментов позволяет добиваться более равномерного охлаждения мерзлого грунта в вертикальном

направлении. Определение оптимальных характеристик такой установки невозможно без этапа физико-математического моделирования процессов теплообмена в системе «термостабилизатор — грунт», поскольку такое варьирование размеров сегментов и зазоров между ними можно осуществить только при изготовлении термостабилизатора, но не в процессе его эксплуатации.

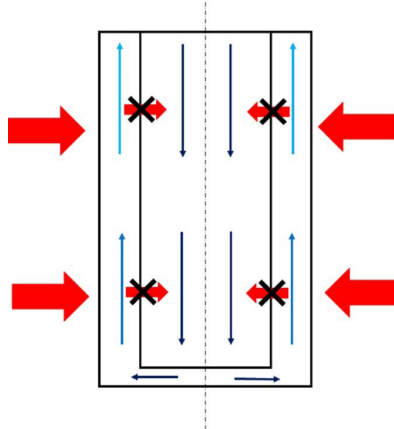


Рис. 1. Схематичное изображение потоков тепла (красные стрелки) и массы (синие стрелки) в термостабилизаторе стандартной конструкции с разграничением нисходящих и восходящих потоков хладагента

Fig. 1. Schematic representation of heat (red arrows) and mass (blue arrows) flows in a heat stabilizer of standard design with a distinction between downstream and upstream refrigerant flows

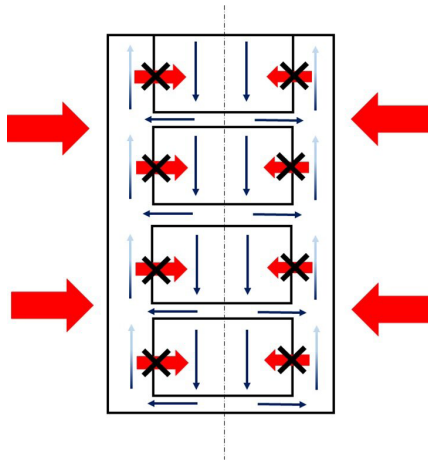


Рис. 2. Схематичное изображение потоков тепла (красные стрелки) и массы (синие стрелки) в термостабилизаторе с распределенным подводом хладагента к внешней поверхности

Fig. 2. Schematic representation of heat (red arrows) and mass (blue arrows) flows into a heat stabilizer with distributed refrigerant supply to the outer surface

При наличии большой экспериментальной базы перспективным направлением в моделировании является использование эмпирических корреляций и критериальных уравнений для расчета параметров теплообмена [Савченкова и др., 2016; Zuetter и др., 2021; Wu и др., 2023]. Преимуществом такого подхода является наличие в специализированной литературе большого количества подобных соотношений. Однако к недостаткам использования эмпирических корреляций относится высокая чувствительность числовых коэффициентов к конкретным условиям и режимам теплообмена, что накладывает определенные ограничения на применимость данного метода.

В последнее время в связи с активным развитием нейросетевого моделирования накопленный практический опыт эксплуатации термосифонов может быть использован с привлечением самообучающихся алгоритмов определения эффективных режимов работы установки [Machado и др., 2023]. В этом случае достигается наивысшая скорость обработки данных и высокая степень автоматизации процесса анализа влияния параметров термостабилизатора. К недостаткам такого подхода относится невозможность его применения к нестандартным условиям, для которых отсутствует достаточная база данных для обучений нейросети.

Другим подходом к моделированию и оптимизации режимов работы термостабилизатора является использование уравнений теплофизики и механики многофазных сред [Кузнецов и др., 2011; Ананьев, 2015; Максимов, Нурпейис, 2019]. Простые модели пренебрегают процессами массообмена как внутри термостабилизатора, так и в окружающем грунте и учитывают только кондуктивную передачу тепла, описываемую уравнением теплопроводности [Кислицын, 2002; Zhou и др., 2024]. Нередко это позволяет получить аналитические решения. Более подробные модели учитывают законы сохранения массы и импульса в дополнение к закону сохранения энергии в виде уравнения теплопроводности. Получение аналитических решений для таких моделей является существенно более сложной задачей, поэтому широкое распространение нашло использование численных методов. Для решения стандартных задач хорошо себя зарекомендовало применение коммерческих программных комплексов, таких как ANSYS [Красношлыков, Кузнецов, 2015]. Однако есть ряд задач, связанных с внедрением новых технических решений, лежащих за пределами текущих возможностей этих программ. Кроме того, вычисление с помощью таких комплексов занимает длительное время, что ограничивает возможность принятия оперативных решений в задачах, сопряженных с быстропротекающими процессами. Поэтому создание физико-математических моделей термостабилизаторов с модифицированной конструкцией является актуальной задачей.

Целью работы является расчет распределения температуры в грунте при использовании термостабилизатора с распределенным подводом хладагента к внешней поверхности.

Методы

Для более равномерного распределения жидкого хладагента в зазоре между внешней и внутренней трубой по высоте термостабилизатора предлагается использовать внутреннюю трубу, состоящую из сегментов, разделенных между собой небольшими зазорами. При этом размеры зазоров и сегментов могут изменяться в зависимости от того, какую

часть грунта требуется проморозить в большей степени. Сегменты представляют собой цилиндрические трубы со стенкой, выполненной из материала с низким коэффициентом теплопроводности (λ_1), чтобы теплообменом между нисходящим и восходящим потоком хладагента можно было пренебречь (рис. 2). Внешняя труба термостабилизатора также является цилиндрической и изготовлена из стали с высоким коэффициентом теплопроводности: $\lambda_2 = 70 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ (рис. 3). В первом приближении предполагается, что зазоры имеют одинаковый линейный размер: $h_c = 1 \text{ см}$. Количество сегментов (n_s) принимается равным 4. Высота каждого сегмента: $h_{si} = 5 \text{ м}$, где i — номер сегмента, $i = (1, 2, \dots, n_s)$; общая высота заглубленной части термостабилизатора: $h = 20 \text{ м}$. Поскольку размеры зазоров на 3 порядка меньше размеров установки и одинаковы, массовые потоки между зазорами сегментов разделяющего устройства также одинаковы, а часть потока продолжает движение внутри этого устройства. Внутренний радиус сегментов: $r_{in1} = 0,017 \text{ м}$; внешний радиус сегментов: $r_{in2} = 0,02 \text{ м}$; внутренний радиус внешней трубы термостабилизатора: $r_{out1} = 0,027 \text{ м}$; внешний радиус этой трубы: $r_{out2} = 0,03 \text{ м}$. Грунт находится в замороженном состоянии с одинаковой по высоте температурой: $T_r = 270 \text{ К}$; коэффициент теплопроводности грунта: $\lambda_3 = 2 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$. Для интенсификации теплообмена в системе «термостабилизатор — грунт» внешняя поверхность термостабилизатора оребрена. Радиальный размер ребер: $\delta = 3 \text{ см}$. Размеры возмущенной теплообменом части грунта (r_{of}) не превышают 2 м. Температура окружающего воздуха (T_e) принимается равной 233 К. В качестве хладагента используется углекислота под давлением (P_s), равном 9 атм, при котором фазовый переход первого рода для выбранного хладагента происходит при температуре (T_s), равной 243 К. Удельная теплоемкость жидкой фазы хладагента: $c_f = 2155 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; удельная теплоемкость газовой фазы: $c_g = 791 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$.

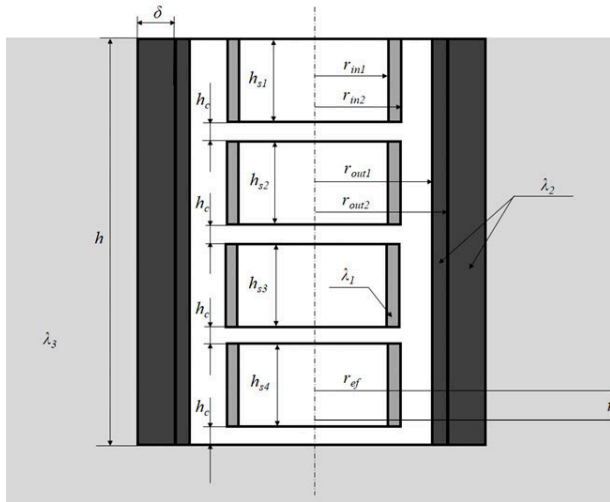


Рис. 3. Конструкция термостабилизатора с распределенным подводом хладагента к внешней поверхности и оребрением этой поверхности

Fig. 3. Construction of a heat stabilizer with distributed refrigerant supply to the outer surface and the finning of this surface

Моделируется установившийся режим работы термостабилизатора [Ананьев, 2015]. Специфика протекающих процессов теплопереноса в установке позволяет выделить три связанных между собой задачи: 1) описание движения жидкого хладагента по внутренней трубе термосифона под действием гравитационных сил; 2) расчет восходящего потока хладагента в зазоре между внешней трубой термостабилизатора и сегментами разделителя потоков; 3) расчет кондуктивного теплообмена в системе «термостабилизатор — грунт». В случае первой и второй задачи рассматривается квазиодномерное движение теплоносителя с вертикальной координатой z в силу симметрии процесса, используется односкоростное приближение, трение потока о стенки труб не учитывается. Начало координат ставится на поверхности грунта. Для третьей задачи в рамках концепции плоских сечений выделяется радиальная симметрия для тепловых потоков, поэтому вводится соответствующая ось координат r . Нисходящими потоками хладагента, поступающего из зазоров между сегментами разделяющего устройства, пренебрегается.

Движение нисходящего потока хладагента моделируется в рамках гидростатического приближения. Распределение давления в таком случае может быть найдено из закона сохранения импульса:

$$\frac{dP_{in}}{dz} = \rho_{fin}g, \quad (1)$$

где ρ_{fin} — плотность жидкого хладагента, равная 933 кг/м^3 ; g — ускорение свободного падения; P_{in} — давление потока внутри сегментированного разделителя потоков.

В описанной выше постановке задачи граничное условие для уравнения (1) имеет вид:

$$P_{in}(z = 0) = P_s. \quad (2)$$

Задача об отыскании распределения давления внутри разделителя потоков термостабилизатора (формулы (1), (2)) имеет аналитическое решение:

$$P_{in} = \rho_{fin}gz + P_s. \quad (3)$$

Движение восходящего двухфазного потока углекислоты описывается в рамках классических подходов многофазной неизотермической механики с записью уравнений неразрывности для жидкой и газовой фазы, закона сохранения импульса многофазного потока в гидравлическом приближении, баланса энергии [Нигматулин, 1987]:

$$\frac{d(\rho_f \alpha_f v)}{dz} = -\frac{q}{l}, \quad (4)$$

$$\frac{d(\rho_g \alpha_g v)}{dz} = \frac{q}{l}, \quad (5)$$

$$\frac{dP}{dz} + \rho_m \frac{v^2}{2h} = \rho_m g, \quad (6)$$

$$\frac{d((\rho_f \alpha_f c_f + \rho_g \alpha_g c_g)vT)}{dz} = q, \quad (7)$$

где ρ_f и ρ_g — плотности жидкой и газовой фазы хладагента; α_f и α_g — массовая концентрация жидкой и газообразной фазы в общем потоке; P — давление; T — температура; v — скорость двухфазного потока; l — удельная теплота фазового перехода первого рода для углекислоты, равная 215 кДж/кг; q — удельный (на единицу объема) тепловой поток на внешней границе установки (рис. 2); ρ_m — плотность двухфазной смеси:

$$\rho_m = \rho_f \alpha_f + \rho_g \alpha_g. \quad (8)$$

В силу определения массовых концентраций выполняется соотношение:

$$\alpha_f + \alpha_g = 1. \quad (9)$$

Связь плотности и давления углекислоты для газовой и жидкой фазы описывается уравнениями состояния реального газа Редлиха — Квонга, при решении которых наибольшая плотность соответствует жидкой фазе, а наименьшая — газовой:

$$P = \frac{\rho_g R T P_c}{M P_c - 0,0866 \rho_g R T_c} - \frac{0,427 \rho_g^2 R^2 T_c^{2,5}}{\sqrt{T} M (M P_c + 0,0866 \rho_g R T_c)}, \quad (10)$$

$$P = \frac{\rho_f R T P_c}{M P_c - 0,0866 \rho_f R T_c} - \frac{0,427 \rho_f^2 R^2 T_c^{2,5}}{\sqrt{T} M (M P_c + 0,0866 \rho_f R T_c)}, \quad (11)$$

где R — универсальная газовая постоянная; M — молярная масса углекислоты, равная 44 г/моль; P_c — критическое давление углекислоты, равное 7,38 МПа; T_c — ее критическая температура, равная 304 К.

Граничные условия для зазора между нижним сегментом и основанием термостабилизатора определяются из решений задачи о нисходящем потоке хладагента внутри разделяющего устройства (3):

$$P(z = h) = \rho_{fin} g h + P_s, \quad (12)$$

$$T(z = h) = T_s, \quad (13)$$

$$\alpha_f(z = h) = 1, \quad (14)$$

$$v(z = h) = \sqrt{2gh}. \quad (15)$$

Для остальных сегментов на их нижней границе должен выполняться баланс массы и тепла, учитывающий притоки из нижележащего сегмента и зазора между сегментами, а также конвективный отток хладагента вверх:

$$P(z = z_{ei}) = P(z = z_{s, i+1}), \quad (16)$$

$$v(z = z_{ei}) = \sqrt{2gz_{ei}}, \quad (17)$$

$$\alpha_f(z = z_{ei}) = \frac{v_b \rho_{fb} \alpha_{fb} S + 2\pi r_{in2} h_c \rho_{fin} \sqrt{2gz_{ei}}}{v_b (\rho_{fb} \alpha_{fb} + \rho_{gb} \alpha_{gb}) S + 2\pi r_{in2} h_c \rho_{fin} \sqrt{2gz_{ei}}}, \quad (18)$$

$$T(z = z_{ei}) = \frac{v_b(c_f \rho_{fb} \alpha_{fb} + c_g \rho_{gb} \alpha_{gb}) T_b S + 2\pi r_{in2} h_c \rho_{fin} \sqrt{2gz_{ei}} c_f T_s}{v_b(c_f \rho_{fb} \alpha_{fb} + c_g \rho_{gb} \alpha_{gb}) S + 2\pi r_{in2} h_c \rho_{fin} \sqrt{2gz_{ei}} c_f}, \quad (19)$$

где z_{si} — вертикальная координата верхней границы i -го сегмента; z_{ei} — вертикальная координата нижней границы i -го сегмента; S — площадь кольцевого зазора между разделяющим потоки сегментом и внешней трубой термостабилизатора. Также введены плотность жидкой (ρ_{fb}) и газовой фазы (ρ_{gb}), скорость двухфазного потока (v_b), температура (T_b), массовые концентрации жидкой (α_{fb}) и газовой фазы (α_{gb}) на верхней границе нижележащего сегмента относительно рассматриваемого.

Решение задачи (4)–(19) невозможно без нахождения теплового потока в системе «термостабилизатор — грунт».

Теплообмен термостабилизатора с окружающим грунтом описывается уравнением теплопроводности с кусочно-постоянным значением коэффициента теплопроводности (λ):

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda(r) \frac{\partial T}{\partial r} \right) = 0. \quad (20)$$

Вертикальные перетоки тепла в грунте, вызванные неравномерностью его охлаждения, учитываются в виде линейной интерполяции полученного вертикального температурного профиля.

Наличие оребрения в первом приближении учитывается в рамках концепции скин-фактора, представляющего собой слой вблизи поверхности термостабилизатора с повышенным коэффициентом теплопроводности. Этот эффект моделируется увеличением радиуса внешней поверхности установки на половину радиального размера ребер. Тогда на внутренней границе трубы термостабилизатора задается значение температуры, полученное из решения задачи о восходящем двухфазном потоке хладагента:

$$T(r = r_{out1}, z) = T(z). \quad (21)$$

В силу постановки задачи на расстоянии r_{ef} задается постоянное значение температуры в грунте:

$$T(r = r_{ef}) = T_r. \quad (22)$$

Задача (20)–(22) является классической, ее решение имеет вид [Кислицын, 2002]:

$$q = \frac{2\pi(T_r - T_s)}{\left(\frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{r_{out2}}{r_{out1}} + \frac{1}{\lambda_3} \ln \frac{r_{ef}}{r_{out1}} + \frac{1}{\alpha r_{out1}} \right) S}, \quad (23)$$

где коэффициент теплоотдачи с внутренней поверхности трубы вычисляется по формуле:

$$\alpha = \frac{(\rho_f \alpha_f c_f + \rho_g \alpha_g c_g) v S (T_s - T_e)}{2 \left(T_s + \frac{q S}{2\pi \lambda_2} \ln \frac{r_{out2}}{r_{out1}} - T_s \right) \pi r_{out1} h}. \quad (24)$$

Решение задачи (4)–(19) с учетом решения (23), (24) ищется численно с аппроксимацией производных по методу Эйлера. Для определения теплового потока (23), (24) используется простая итерационная процедура. Остальная система уравнений решается методом последовательного исключения неизвестных.

Результаты и обсуждение

Получено распределение давления (рис. 4) в результате решения задачи о восходящем двухфазном потоке хладагента в зазоре между сегментированным разделяющим устройством и трубой термостабилизатора. Наличие сегментов обуславливает нелинейную зависимость давления от вертикальной координаты.

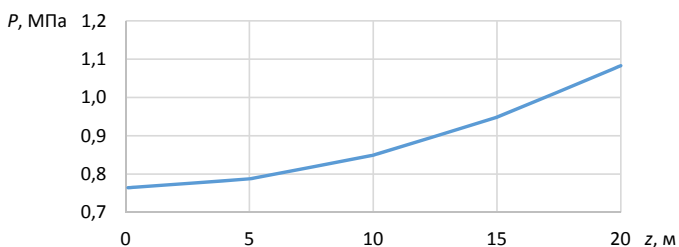


Рис. 4. Распределение давления в зазоре между разделяющим потоки устройством и трубой термостабилизатора

Fig. 4. Pressure distribution in the gap between the flow separation device and the heat stabilizer pipe

Распределение температуры по длине термостабилизатора приведено на рис. 5. Приток хладагента из зазора между сегментами разделяющего устройства вызывает падение температуры двухфазного восходящего потока. Это приводит к более эффективному охлаждению грунта. Наличие изломов на кривой обусловлено постоянным подводом хладагента, находящегося на линии насыщения, из зазора между сегментами разделяющего устройства.

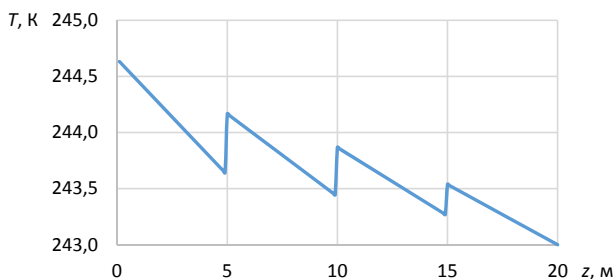


Рис. 5. Распределение температуры в зазоре между разделяющим потоки устройством и трубой термостабилизатора

Fig. 5. Temperature distribution in the gap between the flow separation device and the heat stabilizer pipe

В классической конструкции термостабилизатора предполагается наличие несегментированного устройства, разделяющего нисходящий и восходящий поток. Расчеты температурного профиля в вертикальном направлении, проведенные для такой конструкции на удалении 1 м от термостабилизатора, свидетельствуют о линейном характере ее изменения (рис. 6). Вблизи основания заглубленной части термостабилизатора температура грунта ниже, поскольку массовое содержание жидкой фазы хладагента выше и температурный градиент больше. Как правило, расстояние между соседними термостабилизаторами составляет порядка 2 м [Ефимов и др., 2017], что обуславливает выбор расстояния, равного 1 м, для построения вертикального температурного профиля.

Анализ вертикального профиля температуры (рис. 6) с учетом линейной интерполяции расчетных данных показывает, что при наличии сегментов разделяющего устройства температура грунта оказывается ниже, чем в случае сплошного разделяющего устройства, а сам грунт охлаждается по вертикали более равномерно. В частности, при наличии четырех сегментов температура грунта вблизи поверхности становится ниже на 1 К.

Валидация полученных результатов на основании сопоставления расчетов радиального распределения температуры с данными практического применения свидетельствует об удовлетворительной (90%) точности предложенной модели: зона эффективного охлаждения грунта в обоих случаях составляет порядка 1 м [Евдокимов и др., 2014].

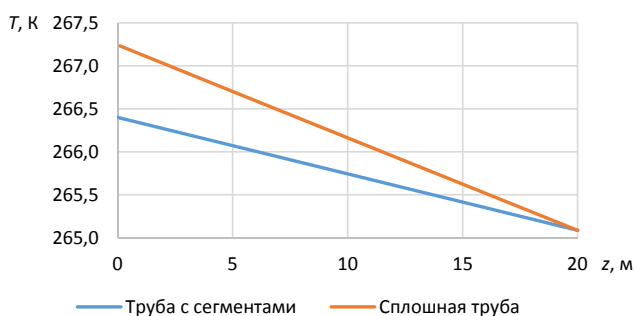


Рис. 6. Вертикальный профиль температуры в грунте на расстоянии 1 м от термостабилизатора

Fig. 6. Vertical profile of the temperature in the soil at a distance of 1 m from the heat stabilizer

Заключение

1. Использование сегментированного устройства, разделяющего нисходящий и восходящий поток, позволяет более равномерно охладить грунт, что увеличивает эффективность снижения его температуры на 20%.
2. Предложенная модель позволяет определить радиальное распределение температуры, согласующееся с практическими данными с точностью 90%.
3. Скорость падения давления двухфазного восходящего потока хладагента убывает при движении от сегмента к сегменту.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Ананьев В. В. 2015. Моделирование двухфазного термосифона // Решетневские чтения. Том 1. С. 62–65.
- Валиева А. Е. 2016. Математическое моделирование режимов работы двухфазного термосифона в условиях извлечения геотермальной энергии // Высокие технологии в современной науке и технике: сб. науч. тр. V Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов (5–7 декабря 2016 г., Томск, Россия). Томск: СТИ. С. 486–487.
- Глухов С. М., Лёзов А. Д., Шумков Д. Е., Климова В. А., Ташлыков О. Л. 2021. Моделирование системы пассивного отвода тепла от шахты-хранилища исследовательского ядерного реактора ИВВ-2М при помощи термосифонов // Физика. Технологии. Инновации: сб. ст. VIII Междунар. молодеж. науч. конф. (17–21 мая 2021 г., Екатеринбург, Россия) / под ред. В. Ю. Иванова, Д. Р. Байтмирова, Е. Д. Нархова, Д. М. Спиридонова. Екатеринбург: Урал. фед. ун-т. С. 113–122.
- Евдокимов В. С., Максименко В. А., Васильев В. К., Третьяков А. В. 2014. Исследование работы сезоннодействующего термостабилизатора грунта // Проблемы региональной энергетики. № 3 (26). С. 74–80.
- Ефимов В. М., Васильчук Ю. К., Рожин И. И., Попенко Ф. Е., Степанов А. В. 2017. Моделирование температурного режима грунтовых оснований с сезонноохлаждающими устройствами в условиях криолитозоны Республики Саха (Якутия) // Арктика и Антарктика. № 4. С. 86–97. <https://doi.org/10.7256/2453-8922.2017.4.25036>
- Кислицын А. А. 2002. Основы теплофизики: лекции и семинары. Тюмень: Изд-во Тюмен. гос. ун-та. 152 с.
- Красношлыков А. С., Кузнецов Г. В. 2015. Численное моделирование тепловых режимов термосифонов // Интеллектуальные энергосистемы: труды III Международ. молодеж. форума (28 сентября — 2 октября 2015 г., Томск, Россия): в 3 т. Том 1. Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та. С. 25–28.
- Кузнецов Г. В., Аль-Ани М. А., Шеремет М. А. 2011. Математическое моделирование нестационарных режимов теплопереноса в замкнутом двухфазном цилиндрическом термосифоне в условиях конвективного теплообмена с внешней средой // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. № 1 (13). С. 93–104.
- Максимов В. И., Нурпейис А. Е. 2019. Математическое моделирование теплопереноса в замкнутом двухфазном термосифоне // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. Том 21. № 3. С. 3–13. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2019-21-3-3-13>
- Нигматулин Р. И. 1987. Динамика многофазных сред: в 2 ч. Часть 1. М.: Наука. 464 с.
- Пономарёв К. О., Кузнецов Г. В., Феоктистов Д. В., Орлова Е. Г., Максимов В. И. 2020. О механизме теплопереноса в слое теплоносителя на нижней крышке закрытого двухфазного термосифона // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. Том 6. № 1 (21). С. 65–86. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2020-6-1-65-86>
- Савченкова Н. М., Сасин В. Я., Кравцов Д. А., Петриков С. А., Гончаров К. А. 2016. Моделирование процессов теплопереноса в котле-утилизаторе термосифонного типа // Вестник Московского энергетического института. № 5. С. 98–104.

- Badache M., Aidoun Z., Eslami-Nejad P., Blesent D. 2019. Ground-coupled natural circulating devices (thermosiphons): A review of modeling, experimental and development studies // *Inventions*. Vol. 4. No. 1. Article 14. <https://doi.org/10.3390/inventions4010014>
- Cao Y., Li G., Wu G., Chen D., Gao K., Tang L., Jia H., Che F. 2021. Proposal of a new method for controlling the thaw of permafrost around the China–Russia crude oil pipeline and a preliminary study of its ventilation capacity // *Water*. Vol. 13. No. 20. Article 2908. <https://doi.org/10.3390/w13202908>
- Chen K., Jin M., Li G., Liu Y., Lu J., Zhao Y., Yu Q. 2023. Thermal performance and heat transfer process of an expressway embankment with horizontal-thermosiphons in permafrost regions // *Cold Regions Science and Technology*. Vol. 212. Article 103887. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2023.103887>
- Fuso L. S., Cisterna L. H. R., Mantelli M. B. H. 2023. Experimental study of two phase loop thermosiphons for hybrid solar systems // *Energy Conversion and Management*. Vol. 293. Article 117550. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117550>
- Liu L., Zhang Q., Zheng H., Meng F. 2024. Experimental study on thermal characteristics of thermosyphon with water condenser and LTES condenser in parallel (TWCLC) // *Journal of Energy Storage*. Vol. 76. Article 109507. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.109507>
- Machado P. L. O., Pereira T. S., Trindade M. G., Biglia F. M., Santos P. H. D., Tadano Y. S., Siqueira H., Antonini Alves T. 2023. Estimating thermal performance of thermosiphons by artificial neural networks // *Alexandria Engineering Journal*. Vol. 79. Pp. 93–104. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.08.001>
- Meng F., Zhang Q., Zou S., Zhu X., Liu L., Chen S. 2024. Operating parameters optimization of a thermosyphon and compressor system used in SG TBS // *Applied Thermal Engineering*. Vol. 241. Article 122331. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.122331>
- Wang F., Li G., Fedorov A., Ma W., Chen D., Wu G., Mu Y., Wang X., Jing H., Zhang Z. 2023. Applicability analysis of thermosyphon for thermally stabilizing pipeline foundation permafrost and its layout optimization // *Cold Regions Science and Technology*. Vol. 208. Article 103769. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2022.103769>
- Wu X., Zhang W., Hao W., Ye Z., Xie H., Shi L. 2023. Thermal hydraulic analysis of a novel passive residual heat removal system with loop thermosiphons for the pool-vessel reactor // *Nuclear Engineering and Design*. Vol. 412. Article 112467. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2023.112467>
- Yu W., Yi X., Han F., Pei W., Chen L. 2021. Study on the geometric parameters of elbow ventiduct embankment in permafrost regions along the Qinghai-Tibet Engineering Corridor // *Cold Regions Science and Technology*. Vol. 182. Article 103209. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2020.103209>
- Zhou Y., Zhang M., Pei W., Wu K., Li G. 2024. Numerical modeling and cooling performance evaluation of a pressure-driven two-phase closed thermosyphon with a long horizontal evaporator // *Renewable Energy*. Vol. 222. Article 119804. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119804>
- Zueter A. F., Newman G., Sasmito A. P. 2021. Numerical study on the cooling characteristics of hybrid thermosiphons: Case study of the Giant Mine, Canada // *Cold Regions Science and Technology*. Vol. 189. Article 103313. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2021.103313>

References

- Ananiev, V. V. (2015). Modeling two-phase thermosiphon. *Reshetnevskie chteniya*, 1, 62–65. [In Russian]
- Valieva, L. E. (2016). Mathematical modeling of the operating modes of a two-phase thermosiphon under conditions of geothermal energy extraction. In *High technology: Research and applications-2016: Proceedings of the 5th International conference for young scientists* (pp. 486–487). STT. [In Russian]
- Gluhov, S. M., Lyozov, A. D., Shumkov, D. E., Klimova, V. A., & Tashlykov, O. L. (2021). Simulation of the passive heat removal system from the storage shaft of the IVV-2M research nuclear reactor using thermosyphons. In V. Yu. Ivanov, D. R. Baitimirov, E. D. Narkhov, & D. M. Spiridonov (Eds.), *Physics. Technologies. Innovations: Proceedings of the 8th International youth scientific conference* (pp. 113–122). Ural Federal University. [In Russian]
- Evdokimov, V. S., Maximenko, V. A., Vasilyev, V. K., & Tretyakov, A. V. (2014). The experimental research of the season-acting thermostabilizer of soil. *Problems of the Regional Energetics*, (3), 74–80. [In Russian]
- Efimov, V. M., Vasilchuk, Yu. K., Rozhin, I. I., Popenko, F. E., & Stepanov, A. V. (2017). Modeling of the temperature schedule of the soil foundations with thermal stabilizers in the cryolithozone of the Sakha Republic (Yakutia). *Arctic and Antarctica*, (4), 86–97. <https://doi.org/10.7256/2453-8922.2017.4.25036> [In Russian]
- Kislitsin, A. A. (2002). *Fundamentals of thermophysics*. University of Tyumen. [In Russian]
- Krasnoshlykov, A. S., & Kuznetsov, G. V. (2015). Numerical simulation of thermal modes of thermosyphons. *Intelligent energy systems: Proceedings of the 3rd International youth forum in 3 vols.: Vol. 1* (pp. 25–28). Tomsk Polytechnic University Publishing House. [In Russian]
- Kuznetsov, G. V., Al-Ani, M., & Sheremet, M. A. (2011). Mathematical simulation of transient heat transfer in a two-phase closed cylindrical thermosiphon in conditions of convective heat exchange with an environment. *Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*, (1), 93–104. [In Russian]
- Maksimov, V. I., & Nurpeiis, A. E. (2019). Mathematical modeling of heat transfer in a closed two-phase thermosiphon. *Power Engineering: Research, Equipment, Technology*, 21(3), 3–13. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2019-21-3-3-13>
- Nigmatulin, R. I. (1987). *Dynamics of multiphase media: in 2 parts. Part 1*. Nauka. [In Russian]
- Ponomarev, K. O., Kuznetsov, G. V., Feoktistov, D. V., Orlova, E. G., & Maksimov, V. I. (2020). On heat transfer mechanism in coolant layer on bottom cover of a two-phase closed thermosiphon. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, 6(1), 65–86. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2020-6-1-65-86> [In Russian]
- Savchenkova, N. M., Sasin, V. Ya., Kravtsov, D. A., Petrikov, S. A., & Goncharov, K. A. (2016). Modeling the heat transfer processes in a thermosiphon-type heat recovery boiler. *Vestnik Moskovskogo energeticheskogo instituta*, (5), 98–104. [In Russian]
- Badache, M., Aidoun, Z., Eslami-Nejad, P., & Blessent, D. (2019). Ground-coupled natural circulating devices (thermosiphons): A review of modeling, experimental and development studies. *Inventions*, 4(1), Article 14. <https://doi.org/10.3390/inventions4010014>
- Cao, Y., Li, G., Wu, G., Chen, D., Gao, K., Tang, L., Jia, H., & Che, F. (2021). Proposal of a new method for controlling the thaw of permafrost around the China–Russia crude oil pipeline

- and a preliminary study of its ventilation capacity. *Water*, 13(20), Article 2908. <https://doi.org/10.3390/w13202908>
- Chen, K., Jin, M., Li, G., Liu, Y., Lu, J., Zhao, Y., & Yu, Q. (2023). Thermal performance and heat transfer process of an expressway embankment with horizontal-thermosyphons in permafrost regions. *Cold Regions Science and Technology*, 212, Article 103887. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2023.103887>
- Fuso, L. S., Cisterna, L. H. R., & Mantelli, M. B. H. (2023). Experimental study of two phase loop thermosyphons for hybrid solar systems. *Energy Conversion and Management*, 293, Article 117550. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117550>
- Liu, L., Zhang, Q., Zheng, H., & Meng, F. (2024). Experimental study on thermal characteristics of thermosyphon with water condenser and LTES condenser in parallel (TWCLC). *Journal of Energy Storage*, 76, Article 109507. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.109507>
- Machado, P. L. O., Pereira, T. S., Trindade, M. G., Biglia, F. M., Santos, P. H. D., Tadano, Y. S., Siqueira, H., & Antonini Alves, T. (2023). Estimating thermal performance of thermosyphons by artificial neural networks. *Alexandria Engineering Journal*, 79, 93–104. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.08.001>
- Meng, F., Zhang, Q., Zou, S., Zhu, X., Liu, L., & Chen, S. (2024). Operating parameters optimization of a thermosyphon and compressor system used in 5G TBS. *Applied Thermal Engineering*, 241, Article 122331. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.122331>
- Wang, F., Li, G., Fedorov, A., Ma, W., Chen, D., Wu, G., Mu, Y., Wang, X., Jing, H., & Zhang, Z. (2023). Applicability analysis of thermosyphon for thermally stabilizing pipeline foundation permafrost and its layout optimization. *Cold Regions Science and Technology*, 208, Article 103769. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2022.103769>
- Wu, X., Zhang, W., Hao, W., Ye, Z., Xie, H., & Shi, L. (2023). Thermal hydraulic analysis of a novel passive residual heat removal system with loop thermosyphons for the pool-vessel reactor. *Nuclear Engineering and Design*, 412, Article 112467. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2023.112467>
- Yu, W., Yi, X., Han, F., Pei, W., & Chen, L. (2021). Study on the geometric parameters of elbow ventiduct embankment in permafrost regions along the Qinghai-Tibet Engineering Corridor. *Cold Regions Science and Technology*, 182, Article 103209. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2020.103209>
- Zhou, Y., Zhang, M., Pei, W., Wu, K., & Li, G. (2024). Numerical modeling and cooling performance evaluation of a pressure-driven two-phase closed thermosyphon with a long horizontal evaporator. *Renewable Energy*, 222, Article 119804. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119804>
- Zueter, A. F., Newman, G., & Sasmito, A. P. (2021). Numerical study on the cooling characteristics of hybrid thermosyphons: Case study of the Giant Mine, Canada. *Cold Regions Science and Technology*, 189, Article 103313. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2021.103313>

Информация об авторах

Александр Янович Гильманов, кандидат физико-математических наук, старший преподаватель кафедры моделирования физических процессов и систем, Физико-технический институт, Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия
a.y.gilmanov@utmn.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7115-1629>

Андрей Сергеевич Ким, заместитель директора, Альянс, Тюмень, Россия
3659696@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-3224-5463>

Александр Павлович Шевелёв, кандидат физико-математических наук, доцент, профессор кафедры моделирования физических процессов и систем, Физико-технический институт, Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия
a.p.shevelev@utmn.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0017-4871>

Information about the authors

Alexander Ya. Gilmanov, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Lecturer, Department of Modeling of Physical Processes and Systems, Institute of Physics and Technology, University of Tyumen, Tyumen, Russia
a.y.gilmanov@utmn.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7115-1629>

Andrey S. Kim, Deputy Director, Alyans, Tyumen, Russia
3659696@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-3224-5463>

Alexander P. Shevelev, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Professor, Department of Modeling of Physical Processes and Systems, Institute of Physics and Technology, University of Tyumen, Tyumen, Russia
a.p.shevelev@utmn.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0017-4871>