

УДК 624.131.4.001.4:006.354

**Карпов Д.Ф.** – аспирант

E-mail: [karpov\\_denis\\_85@mail.ru](mailto:karpov_denis_85@mail.ru)

**Синицын А.А.** – кандидат технических наук, доцент

E-mail: [nee-energo@yandex.ru](mailto:nee-energo@yandex.ru)

**Белянский Д.А.** – ассистент

E-mail: [dimcherch@inbox.ru](mailto:dimcherch@inbox.ru)

**Вельсовский А.Ю.** – старший преподаватель

E-mail: [vau@mh.vstu.edu.ru](mailto:vau@mh.vstu.edu.ru)

**Вологодский государственный технический университет**

## **РАСЧЁТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ ПРИ ИСКУССТВЕННОМ ОТТАИВАНИИ МЁРЗЛОГО ГРУНТА**

### **АННОТАЦИЯ**

В работе рассмотрен способ получения, обработки и анализа информации о динамике изменения теплофизических свойств исследуемого объекта на примере изучения характера распределения температурных полей в мерзлом грунте при его искусственном оттаивании с целью дальнейшего проектирования новой установки для аварийно-ремонтных служб. Представлены физическая модель оттаивания мерзлого грунта и схема контрольно-измерительного оснащения экспериментальной установки. Приведены результаты лабораторных исследований по оттаиванию мерзлого грунта в виде эмпирических температурных полей и характеристик нового технического средства.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** мерзлый грунт, искусственное оттаивание, температурное поле, тепловой поток, система измерений.

**Karpov D.F.** – post-graduate student

**Sinitsyn A.A.** – candidate of technical science, associate professor

**Belyansky D.A.** – assistant

**Velsovsky A.Yu.** – senior lecturer

**Vologda State Technical University**

## **COUNT AND EXPERIMENTAL STUDY OF THE DISTRIBUTION OF TEMPERATURE FIELDS DURING ARTIFICIAL THAWING OF FROZEN SOIL**

### **ABSTRACT**

The work is devoted to the method of obtaining, processing and analyzing of the information concerning the evolution of changes of the thermophysical properties of the object under analysis, it deals with the study of the distribution of temperature fields in the frozen soil during its artificial thawing for the purpose of further development of a new device for construction and emergency work. It represents the physical model of the thawing of frozen soil and the scheme of control and test equipment of the experimental device. It also shows the results of laboratory studies on the thawing of frozen soil in the form of empirical temperature fields and characteristics of a new technical gear.

**KEYWORDS:** frozen soil, artificial thawing, temperature field, heat flow, system of measures.

### **Актуальность**

Современный город нельзя представить без инженерных систем и коммуникаций, которые являются «артериями», связывающими источники энергии и потребителей. При этом нарушение их функционирования ведет к остановке всей энергосистемы. Поэтому своевременное и оперативное устранение аварий и отказов этих систем является главной задачей аварийно-ремонтных служб. В зимний период основной проблемой является разработка мёрзлого грунта для выявления места аварии.

Для мерзлых грунтов характерным является значительное увеличение трудоемкости их разработки вследствие повышенной механической прочности. Кроме того, мерзлое состояние грунта усложняет технологию, ограничивает применение некоторых типов землеройных машин,

способствует быстрому износу их деталей и рабочих механизмов. Поэтому особо актуально применение специализированных технических средств для оттаивания мерзлого грунта, причем требования к времени размораживания, энергоэффективности технологии и технике безопасности являются основополагающими при выборе оптимального способа.

Оттаивание мерзлого грунта – сложный термодинамический процесс, протекающий в неоднородной капиллярно-пористой среде и осложненный наличием фазовых переходов грунтовой влаги [1, 2]. При прогреве грунта под воздействием тепловой энергии нагревателя происходит плавление льда, перераспределение образовавшейся при этом влаги и перемещение границы оттаивания. Интенсивность процесса и формирование температурного поля зависят от грунтовых условий и тепловых характеристик нагревателя [3]. Более подробно концепция разработки таких нагревателей приведена в работе [4].

Таким образом, особую актуальность приобретают знания термоградиентных характеристик (температурных и градиентных полей), которые при дальнейших исследованиях позволяют определять термодинамические и теплофизические свойства исследуемого объекта – мерзлого грунта (коэффициенты теплопроводности, теплоотдачи, температуропроводности и др.), моделировать нестационарные процессы тепломассопереноса в мерзлых и талых грунтах, а также проектировать энергоустановки по их оттаиванию для дальнейших ремонтных работ.

За последние десятилетия опубликовано большое количество монографий и научно-исследовательских работ, посвященных вопросам теплофизики и механики мерзлых грунтов. Значительный вклад в становление и развитие механики мерзлых грунтов как науки внесли Н.А. Цытович, М.И. Сумгин и многие другие ученые.

В работах А.Р. Павлова [5] и Т.А. Сагала [6] проводится математическое моделирование процессов тепломассопереноса при фазовых переходах для различных видов грунтов. Исследование характера распределения температурных полей в этих трудах не рассматривалось, хотя и представляет научный интерес.

Проводимые исследования по данному направлению, включающие анализ существующей научно-технической литературы и патентные исследования, позволили обобщить наиболее распространенные методы оттаивания мерзлого грунта, выявить их достоинства и недостатки. Целью этих исследований являлся выбор оптимального направления для дальнейшей работы по разработке требуемого устройства.

Существует большое количество искусственных способов отогрева грунта в зависимости от источника тепла и теплоносителя. Кроме того, выделяют группы устройств по направлению распространения теплоты в грунте: поверхностное оттаивание, оттаивание сверху вниз, глубинное оттаивание снизу вверх, радиальное оттаивание, а также комбинированный способ. Все методы имеют различный принцип действия и свою специфику. Структурная схема способов отогрева мерзлого грунта представлена на рис. 1.

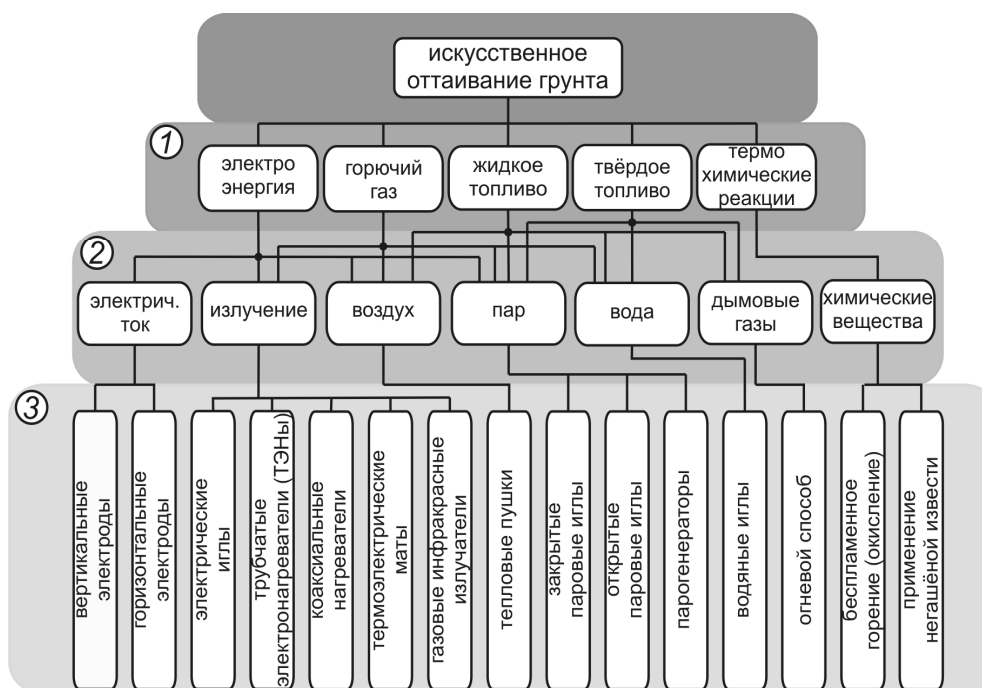


Рис. 1. Структурная схема искусственных методов оттаивания мерзлого грунта:  
1 – источник энергии, 2 – рабочее тело, 3 – метод оттаивания

**Физическая модель**

Мерзлый грунт представляет собой сложную трехфазную полидисперсную гетерогенную систему, основу которой составляют твердые частицы разнообразной формы, величины и состава. Промежутки между твердыми частицами могут быть заполнены средой различного агрегатного состояния: влагой, газом, паром и льдом, или тем и другим одновременно [2]. Оттаивание мерзлого грунта – это сложный термодинамический процесс, протекающий в неоднородной капиллярно-пористой среде и осложненный наличием фазовых переходов грунтовой влаги. При прогреве грунта под воздействием тепловой энергии происходит плавление льда, перераспределение образовавшейся при этом влаги и перемещение границы оттаивания.

В работе Ю.К. Зарецкого [7], наряду с комплексным подходом к оценке напряженно-деформированного состояния оснований и грунтовых сооружений, дана структурная схема фазовых зон грунта при переходе его из твердомерзлого в талое состояние. При таком переходе, помимо твердомерзлой и талой зон, выделяются промежуточные оттаивающая и пластичномерзлая зоны (рис. 2 А).

Модель подвода тепловой энергии к мерзлому грунту, включающая источник тепловой энергии в виде теплового потока  $Q$ , направленного перпендикулярно в центр поверхности грунта с зоной нагрева диаметром  $D$ , представлена на рис. 2 Б. Для последующей схемы измерений выбрано 27 точек замера температуры мерзлого грунта  $Tg_{i,j}$  ( $i = 1..9, j = 1..9$ ), расположенные таким образом, что составляют объемную измерительную матрицу шириной и длиной,  $L = 300\text{мм}$ , высотой  $B = 100\text{мм}$ .

Шаг измерений по длине  $l_1 = 150\text{мм}$ ,  $b_1 = 50\text{ мм}$ .

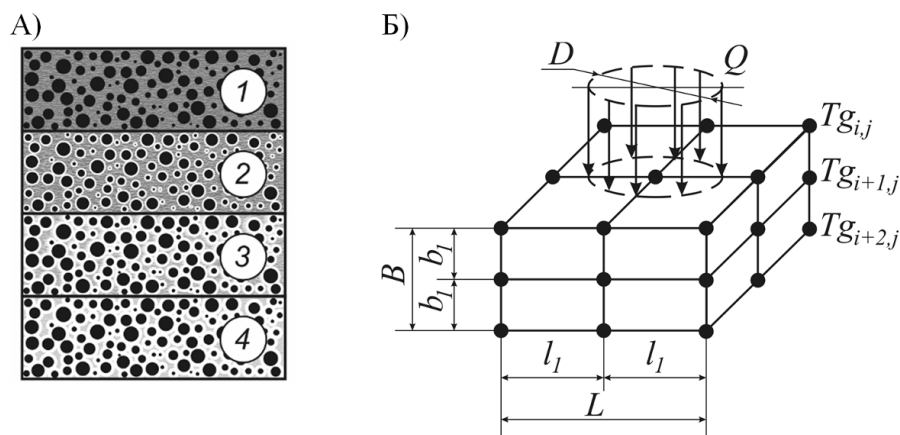


Рис. 2. Модель оттаивания мерзлого грунта: А – схема расположения зон оттаивания, Б – схема подвода тепловой энергии мерзлому грунту. 1 – талая зона, 2 – оттаивающая зона, 3 – пластичномерзлая зона, 4 – твердомерзлая зона

**Система измерений**

Одним из вопросов измерения температурных полей распределения тепловой энергии в сплошной насыпной среде является организация размещения датчиков, съема и сохранения информации о параметрах температур. В качестве основного инструмента для измерения температурных полей в объекте моделирования выбрана система Celsius (система аналогово-цифрового преобразования измерений параметров различных сред). Система состоит из платы, датчиков и программного обеспечения для отображения и записи температурных данных на ПК. Система Celsius разработана на кафедре теплогазоснабжения и вентиляции Вологодского ГТУ и апробирована при исследовании тепловых потоков теплоэнергетических объектов и систем (рис. 3).

На рис. 3 представлена схема установки термодатчиков, размещаемых в исследуемом грунте с помощью специальной рамки. Расстояния по ширине, длине и высоте указаны выше в соответствии с моделью, представленной на рис. 2 Б. Работы по созданию экспериментального образца мерзлого грунта к лабораторным исследованиям включали в себя:

- 1) подготовку необходимых элементов (форм для грунта, решеток с термопарами для измерения температурных полей, блока преобразующей аппаратуры и компьютера для снятия и регистрации показаний термопар);

2) подготовку грунта (высушивание до постоянной массы, перемешивание с целью получения однородной среды, увлажнение, укладку и послойное уплотнение в подготовленную форму);

3) подготовку стационарной холодильной камеры (типа КХН-1) к испытаниям, установку промораживаемых форм с грунтом и задание температурного режима (от -4 до -6 °С) для равномерного его промораживания.

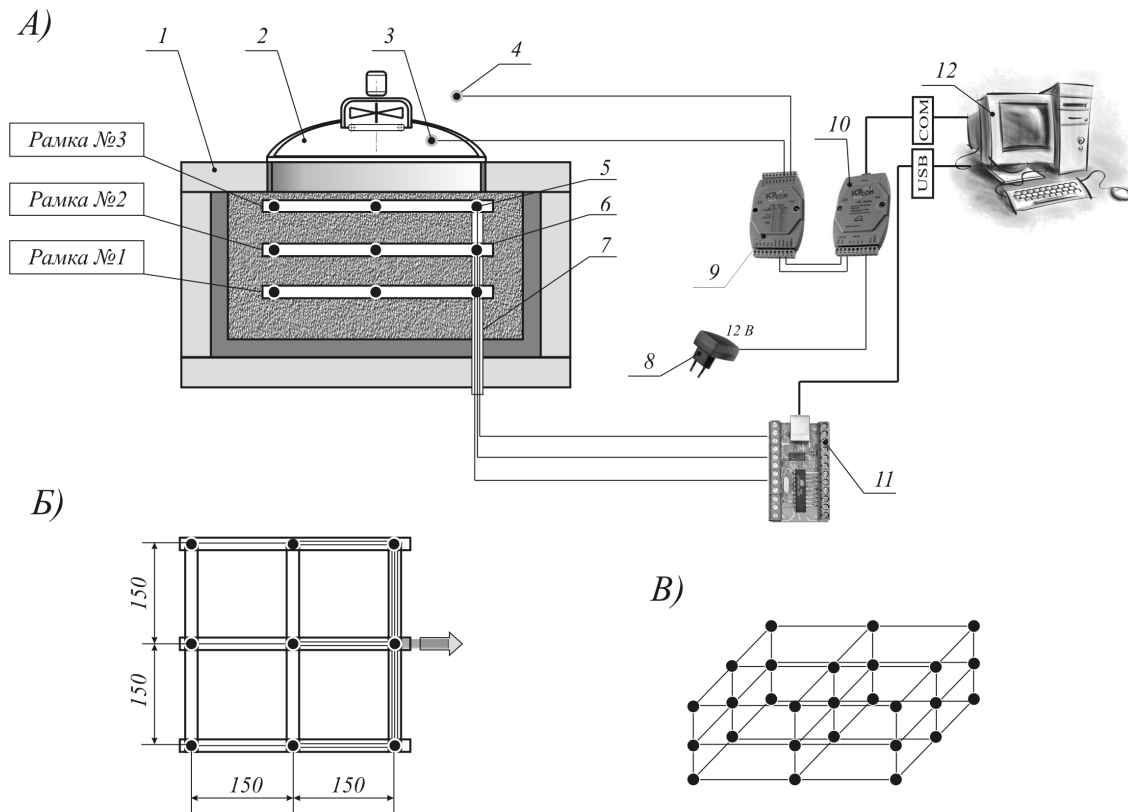


Рис. 3. Схема контрольно-измерительного оснащения экспериментальной установки по изучению динамики изменения параметров мерзлого грунта при его искусственном оттаивании:  
 А – схема измерения, Б – схема рамки для датчиков, В – схема размещения датчиков температуры мерзлого грунта.  
 1 – теплоизолированный короб с мерзлым грунтом, 2 – радиационно-конвективная установка, 3 – датчик температуры внутреннего воздуха типа ТСП, 4 – датчик температуры наружного воздуха типа ТСП, 5 – датчик температуры мерзлого грунта типа DS18B20, 6 – рамка для датчиков, 7 – теплогидроизолированный кабель, 8 – AC-DC адаптер 12 В, 9, 10 – блок аналогово-цифрового преобразователя, 11 – плата аналогово-цифрового преобразователя, 12 – персональный компьютер

Температурный диапазон в процессе испытаний: грунта – -5...+83 °С (точность измерений: ±0,06 °С), внутреннего воздуха – 0...300 °С (точность измерений: ±0,01 °С), наружного воздуха – 18...+30 °С (точность измерений: ±0,06 °С).

Измерения температуры грунта производились с помощью платы аналогово-цифрового преобразователя (далее – плата АЦП). Устройство использовано в качестве центральной части системы сбора и передачи данных с датчиков температуры DS18B20. Плата АЦП имеет 8 каналов подключения, что обеспечивает цифровой вход для подключения до 32 датчиков температуры типа DS18B20.

Измерение температуры внутреннего и наружного воздуха производилось посредством термопреобразователей сопротивления. В качестве устройства, преобразующего электрические импульсы, идущие от термопреобразователей сопротивления (хромель-алюмелевый ХА (К)), применялся блок аналогово-цифрового преобразователя ICPCON I-7014.

Плата и блок построены на основе микроконтроллера. Для отображения информации приборы подключались к ПК, где в режиме реального времени отображался процесс измерения температуры. Разработанная схема измерений с помощью системы «блок-плата АЦП» – простой, но достаточно точный способ получения информации о характере изменения температуры среды во времени с возможностью мониторинга и сохранения данных для дальнейшего анализа.

### Результаты эксперимента

В ходе эксперимента определялся характер распределения тепловой энергии в объеме мерзлого грунта при его искусственном поверхностном радиационно-конвективном оттаивании. Эксперимент проводился при следующих условиях: потребляемая электрическая мощность – 1300 Вт; установленный температурный режим – 250 °С; диаметр зоны оттаивания – 330 мм. Производилось оттаивание мерзлого песчаного грунта плотностью 1,6 г/см<sup>3</sup> и влажностью 30..35 % при начальной температуре материала – 1,8 °С и средней температурой окружающего воздуха 21 °С.

Порядок проведения эксперимента заключался в следующем: размещение установки на поверхности мерзлого грунта и ее включение на требуемую мощность; нагрев мерзлого грунта с отслеживанием температур в заданных точках согласно схеме (рис. 3); удаление установки при полном оттаивании испытуемого грунта.

Температурные данные, полученные с помощью термодатчиков, были комплексно обработаны и систематизированы в матричный формат. Для наглядного представления и автоматизации процесса обработки данных авторами была разработана программа TermoCUBE, реализующая динамическое распределение температурных полей в исследуемом объеме грунта. Результаты эксперимента приведены на рис. 4.

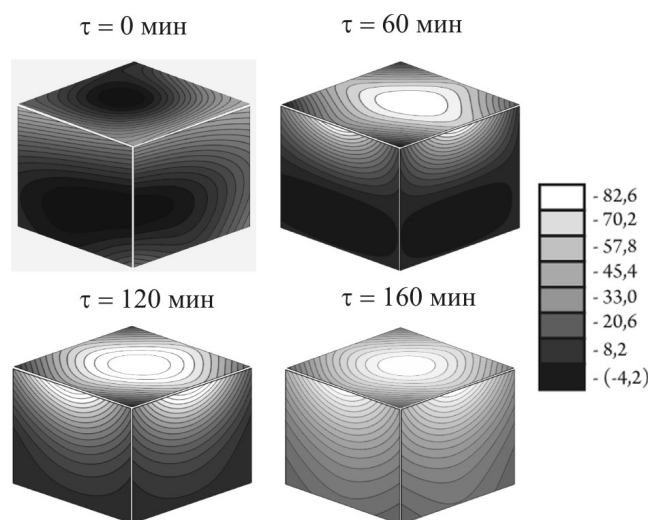


Рис. 4. Изотермические поверхности распределения теплового потока в мерзлом грунте при его искусственном оттаивании

На рис. 4 условно изображено распределение температур в объеме исследуемого мерзлого грунта в разные моменты времени: 0, 60, 120 и 160 мин. Изменение температур в диапазоне -5...+83 °С представлена в виде градации серого. Анализ полученных результатов распределения температурных полей в мерзлом грунте с помощью программы TermoCUBE позволил определить динамику теплопереноса в грунте при его искусственном поверхностном прогреве, а также время, необходимое для оттаивания мерзлого грунта. Учитывая результаты экспериментальных данных при проектировании реальной установки по оттаиванию мерзлых грунтов, а также ее технико-экономических расчетов, получены следующие технические характеристики, представленные в таблице.

Таблица

#### Технические характеристики новой установки по оттаиванию мерзлых грунтов

№ п/п	Характеристика	Ед. изм.	Значение
1	Тепловая мощность	кВт	15
2	КПД	%	92,5
3	Расход газа (сжиженного)	кг/ч	1,17
4	Время отогрева	3	ч
5	Площадь оттаивания	1 x 1	м
6	Глубина оттаивания	1,5	м
7	Вес установки	кг	110

Таким образом, проведенные в работе расчетно-экспериментальные исследования распределения температурных полей в мерзлом грунте при его искусственном оттаивании позволили определить время и мощность проектируемой установки. Разработанные программы для снятия и обработки информации о распределении температурных данных в исследуемом объекте станут неотъемлемым инструментарием при дальнейших научных исследованиях.

Работа проводится при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сеницын А.А., Карпов Д.Ф., Суханов И.А. Решение проблемы оттаивания мерзлых грунтов при подготовительных строительных работах в условиях малоэтажной застройки // Малоэтажное строительство в рамках Национального проекта «Доступное и комфортное жилье – гражданам России»: технологии и материалы, проблемы и перспективы развития в Волгоградской области: материалы Международной научно-практической конференции, 15-16 декабря 2009 г. Волгогр. гос. архит.-строит. ун-т. – Волгоград: ВолГАСУ, 2009. – С. 99-101.
2. Цытович Н.А. Механика мерзлых грунтов. – М.: Высшая школа, 1973. – 446 с.
3. Игонин В.И., Карпов Д.Ф., Павлов М.В. Определения термодинамических свойств ограждающих конструкций методом теплосилового нагружения // Материалы II ежегодных смотров-сессий аспирантов и молодых ученых по отраслям наук: в 2-х т. – Вологда: ВоГТУ, 2008, т. 1: Технические науки. – С. 210-218.
4. Вельсовский А.Ю., Сеницын А.А., Карпов Д.Ф. Разработка концепции создания радиационно-конвективной мобильной установки для оттаивания мерзлых грунтов // Вузовская наука – региону: Материалы восьмой всероссийской научно-технической конференции. В 2-х т. – Вологда: ВоГТУ, 2010, т. 1. – С. 162-167.
5. Павлов А.Р. Математическое моделирование процессов тепломассопереноса при фазовых переходах: учеб. пособие. – Якутск, 2001. – 55 с.
6. Сагала Т.А., Кологривов М.М. Применение математических моделей нестационарной теплопроводности с фазовым переходом компонента в расчетах размораживания насыпного груза // Холодильная техника и технология, 2008, № 3. – С. 46-51.
7. Зарецкий Ю.К. Вязкопластичность грунтов и расчеты сооружений. – М.: Стройиздат, 1988. – 352 с.