

РАЗРАБОТКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЙ РАДИАЦИОННО-КОНВЕКТИВНОЙ МОБИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ПО ОТТАИВАНИЮ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ

Синицын А.А., Вельсовский А.Ю., Карпов Д.Ф.

*Вологодский государственный технический университет
email: nee-energo@yandex.ru*

В работе приводятся основные результаты исследований по разработке и определению эффективности применения автономной газовой радиационно-конвективной установки для оттаивания мерзлых грунтов при ремонтно-строительных работах.

Ключевые слова: газовый излучатель, горелочное устройство, мерзлый грунт, оттаивание грунта, радиационно-конвективная установка, ремонтно-строительные работы.

Введение

Сущность методов оттаивания и размораживания мерзлого грунта заключается в изменении структурного состояния одного из компонентов – воды (переход из твердого состояния в жидкое) при введении извне дополнительной энергии без нарушения структурного состояния самого грунта.

При применении целого ряда методов подготовки мерзлых грунтов к разработке путем введения дополнительной энергии, в грунте происходят одни и те же теплофизические процессы, которые в литературе называются методами искусственного оттаивания грунта.

Оттаивание мерзлого грунта – сложный термодинамический процесс, протекающий в неоднородной капиллярно-пористой среде, осложненный наличием фазовых переходов грунтовой влаги [1]. 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.

Глубина промерзания грунта зависит от многих факторов и их сочетания, при этом может достигать двух и более метров. Чем меньше глубина промерзания, тем меньше требуется энергозатрат на производство земляных работ. При больших объемах работ и невозможности или недопустимости по техническим

требованиям и соображениям безопасности в условиях сложного городского подземного хозяйства разрыхлить грунт механическими средствами прибегают к его оттаиванию.

Основными недостатками известных методов оттаивания мерзлых грунтов являются высокие энергозатраты и длительное время оттаивания. Работа посвящена созданию новой установки, лишенной этих недостатков. В статье приводятся результаты исследований по разработке и определению эффективности применения установки для оттаивания мерзлых грунтов при ремонтно-строительных работах.

Исследования проведены сотрудниками ГОУ ВПО «Вологодский государственный технический университет» при поддержке Федерального агентства по науке и инновациям в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы.

Актуальность работы

Поиск новых технологических решений и систем подготовки грунта при ремонтно-строительных и аварийных работах является важной задачей в нашей стране в связи с ее суровыми природно-климатическими условиями. Повышенная механическая прочность мерзлых грунтов препятствует их разработке обычными техническими средствами, что вызывает необходимость предварительной подготовки таких грунтов. Применяют следующие основные методы подготовки грунта в зимних условиях: оттаивание с последующей разработкой талого грунта, предварительное механическое рыхление и разработка мерзлого грунта. Механизированные методы в настоящее время наиболее распространены, однако применение специальных средств рыхления или резания на отдельные куски в условиях сложного городского подземного хозяйства затруднено, а иногда – невозможно по техническим требованиям и соображениям безопасности. В городских условиях проблема разработки мерзлых грунтов возникает, в первую очередь, перед аварийными, коммунальными и энергоснабжающими службами и организациями. Большое число аварийных ситуаций в зимний период связано с разрывами трубопроводов различного назначения. Время восстановления работоспособности участка напрямую зависит от скорости вскрытия ремонтной бригадой поврежденного трубопро-

вода. Еще одним важным аспектом поднятой выше проблемы является подготовка грунта перед строительством – задача, возникающая перед строительными организациями, ведущими работы в зимний период. Применение специальных средств рыхления или резания грунта не позволяет использовать полученную смесь без достаточного количества талого грунта для возведения насыпей, засыпки траншей и пазух котлованов из-за невозможности качественного уплотнения, поскольку приводит к просадкам грунта после оттаивания. В таких условиях применение альтернативных способов подготовки грунта при ремонтно-строительных и аварийных работах расширяет технические возможности организации и позволяет обеспечить эффективность проводимых работ. Эти задачи могут быть решены с помощью организации оттаивания грунта [2].

Оттаивание мерзлых грунтов по большинству показателей менее эффективно по сравнению с использованием механизированных методов. Но при небольших объемах работ, в стесненных условиях сложного городского подземного хозяйства, труднодоступных местах и в тех случаях, когда невозможно использовать более экономичные и менее энергоемкие способы прибегают к оттаиванию мерзлых грунтов. Существует большое количество способов отогрева грунта в зависимости от источника тепла (электроэнергии, пара, газа, мазута, кокса, горячих шлаков и пр.) и принципа действия. При этом сущность метода оттаивания заключается в том, что теплота, передаваемая в слой мерзлого грунта, растапливает лед в его порах и обращает грунт в талое состояние. Существующие методы оттаивания имеют ограниченное применение вследствие высоких энергетических и временных затрат или неприемлемы из соображений безопасности при раскопке инженерных коммуникаций (газовых, электрических сетей). Так оттаивание мерзлого грунта с применением открытого огня и электрического поля ограничено при проведении некоторых видов работ, к примеру, отогрев площадки с замерзшими газопроводами необходимо производить только нагретым теплоносителем. В связи с этим возникает необходимость поиска наиболее эффективного, технически безопасного и экономически оправданного метода оттаивания мерзлого грунта [2].

Обобщая приведенные аргументы, можно заключить, что поставленная задача, а именно – создание энергоэффективной мобильной установки для быстрого

оттаивания мерзлых грунтов при проведении ремонтно-строительных и аварийных работ, является актуальной.

Выбор оптимального варианта установки

Обзор современного состояния технического уровня развития средств и методов оттаивания мерзлых грунтов показал большое их разнообразие. Конкуренция продукция представлена на рынке технических средств следующими устройствами: аппараты для прогрева почвы и бетона WACKER NEUSON, парогенераторы STEAM MATE, жидкотопливные инфракрасные нагреватели Master XL, термоэлектрические маты ТЕРМОМАТ и др.

Однако все известные способы и устройства являются малоэффективными и непригодными для быстрого оттаивания грунта в зимнее время в условиях современной городской застройки. Проведенный патентный поиск показал патентную чистоту предлагаемого решения, позволил определить аналоги и прототипы технических средств для предлагаемой установки.

Идея разработки мобильной энергоэффективной установки для быстрого оттаивания мерзлых грунтов при проведении ремонтно-строительных и аварийных работ определяет новый способ подхода для осуществления прогрева замороженного слоя грунта различного состава за счет комбинации радиационной и конвективной составляющей теплопередачи при сгорании газообразного топлива.

На рис. 1 приведены результаты сравнительного анализа современного уровня технических средств и методов для осуществления процесса искусственного прогрева мерзлого грунта. На основании проведенных исследований по определению и обоснованию оптимального варианта искусственного отогрева мерзлого грунта, был выбран искусственный поверхностный вертикальный тепловой (радиационно-конвективный) подвод тепловой энергии мобильной установкой, работающей на газовом топливе. Более подробная информация о выборе оптимального варианта приведена в работах [2 - 4].

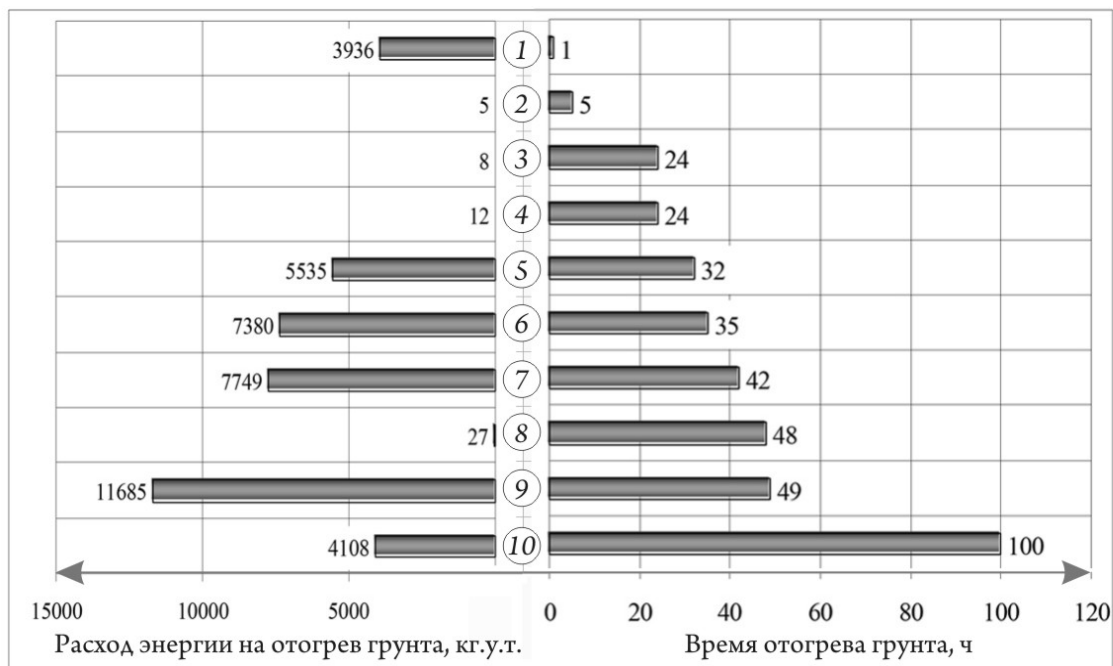


Рисунок 1. Сравнительная диаграмма основных показателей различных методов искусственного оттаивания для 1 м³ грунта:

- 1 – токи высокой частоты; 2 – горелки инфракрасного излучения;
 3 – факельные газовые горелки под коробом; 4 – костры под металлическим коробом;
 5 – электроотражательные печи; 6 – горизонтальные струйные электроды;
 7 – электротепляки; 8 – поверхностные паровые регистры;
 9 – вертикальные поверхностные электроды; 10 – электронагревательные щиты

Разработка требований к новой установке

По назначению разрабатываемая установка должна обеспечить оттаивание небольших площадей мерзлых грунтов на заранее определенную глубину в заданный временной интервал в местах аварийных или ремонтно-строительных работ при нецелесообразности или невозможности применения других способов разработки мерзлого грунта.

Целевая аудитория определялась основной характеристикой выполняемых видов работ – подготовкой к разработке небольших объемов мерзлого грунта в условиях отрицательных температур наружного воздуха. По этому показателю были выделены следующие группы потребителей: ремонтно-строительные организации, аварийные и коммунальные службы. Каждая целевая группа рассматривалась с позиции ответа на вопросы: за какое время необходимо оттаять мерзлый грунт определенной площади и глубины.

Производительность установки должна обеспечивать оттаивание мерзлого грунта в отведенные сроки для устранения аварии. При рассмотрении каждой целевой группы было определено время, необходимое для вскрытия и восстановления поврежденных коммуникаций. Анализируя общее время восстановительных работ, был сделан вывод о периоде максимум в 4 часа, необходимом для вскрытия коммуникации в зимних условиях.

При определении глубины, на которую необходимо оттаивать мерзлый грунт, учитывались климатические данные Вологодской области. Для данного региона глубина промерзания грунта на конец зимнего периода составляет до 1,5 м. Были рассмотрены минимально допустимые глубины заложения коммуникаций по выделенным целевым группам, составившие диапазон от 0,8 до 2 м. Таким образом, были сформированы следующие требования к установке: необходимо за 4 час. (максимальное время) оттаять до 1,5 м мерзлого грунта.

Габариты установки по оттаиванию мерзлого грунта определялись, исходя из требуемой для отогрева площади грунта и требований по условию транспортировки. При ремонте тех или иных видов инженерных сетей и коммуникаций необходимо отрыть канаву, минимальные размеры которой определены соответствующими нормативными документами. Для выделенных целевых групп минимальная ширина траншей составила от 0,5 до 2,4 м. Для удобства транспортировки создаваемая установка должна вращаться в параметры кузовов используемых аварийно-ремонтными бригадами машин, быть удобной, с точки зрения, ее переноски к месту работ. Одни из наиболее распространенных видов транспорта в России для перевозки небольших грузов на сегодняшний день является ГАЗ 3221-90 Газель. Учитывая минимальные размеры траншеи, необходимой для разработки, а также параметров кузова «Газели», габариты создаваемой установки должны находиться в пределах: по ширине 1- 1,5 м и по длине 1,5 - 2 м. Для определения количества обслуживающего персонала, работающего с установкой, было решено ориентироваться на бригаду из двух человек, один из которых является водителем.

Главным вопросом при разработке требований к установке стало определение ее производительности.

Определение производительности установки

Производительность энергетической установки зависит от многих факторов: вида, структуры мерзлого грунта и его теплофизических свойств, климатических условий и характера поверхности грунта, объема оттаиваемого грунта и периодичности его удаления из котлована и т.д. Что касается последнего фактора, хочется отметить, что экспериментальные исследования по скорости оттаивания мерзлого грунта опытной установкой, проводимые в натуральных условиях показали, что сильное влияние на скорость оттаивания мерзлого грунта оказывает характер удаления оттаявшей его части. При затратах энергии 1,3 кВт и площади оттаивания $85 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ насыпного песчаного грунта получены обобщающие экспериментальные зависимости изменения глубины искусственного оттаивания грунта во времени (рис. 2).

Из графика видно, что скорость, а соответственно, и глубина оттаивания зависит от условий удаления оттаявшего грунта. При постоянном удалении грунта (каждые 5 мин) глубина оттаивания в 3 раза больше, чем при оттаивании без его удаления. При периодическом удалении грунта (каждые 15 мин) глубина оттаивания в 2 раза больше, чем при оттаивании без его удаления, что было учтено при разработке технологии работ по эксплуатации установки.

Сформированная на базе работ [5, 6] математическая модель теплопереноса в мерзлом грунте при поверхностном подводе тепловой энергии была апробирована с помощью экспериментальных исследований в натуральных и лабораторных условиях. Сходимость результатов расчетных и экспериментальных исследований (рис. 3) позволила говорить о том, что выбранная модель прогрева грунта может быть использована при расчете теплопроизводительности новой установки.

Рассмотренные выше вопросы позволили составить общие требования к разрабатываемой установке по оттаиванию мерзлого грунта (табл. 1). На основании математической модели была определена мощность проектируемой установки. При оттаивании мерзлого грунта объемом $1,5 \text{ м}^3$ за 4 часа с периодическим его удалением из котлована, требуемая теплопроизводительность составила 15 кВт, что в пересчете на расход сжиженного газа будет 1,17 кг/ч.

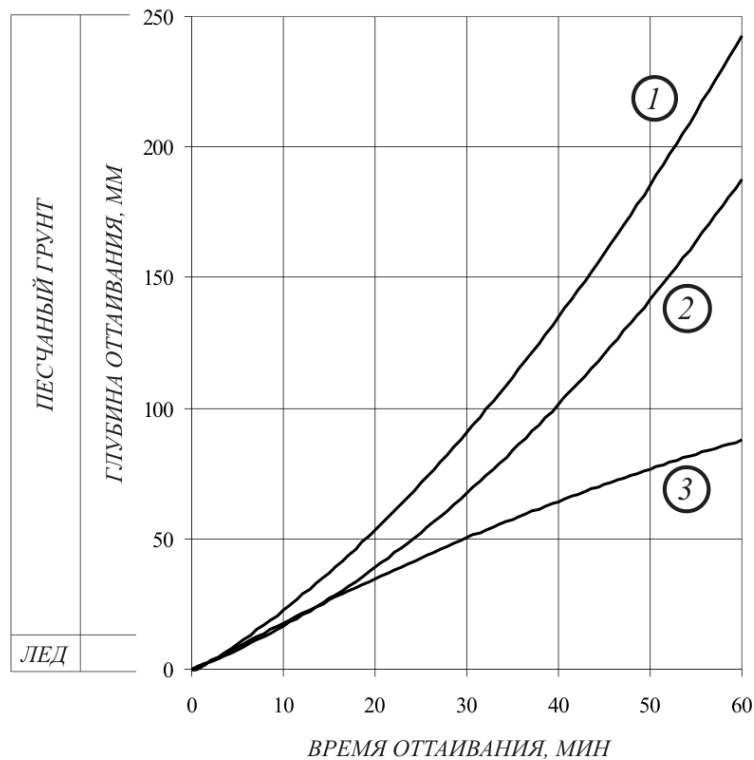
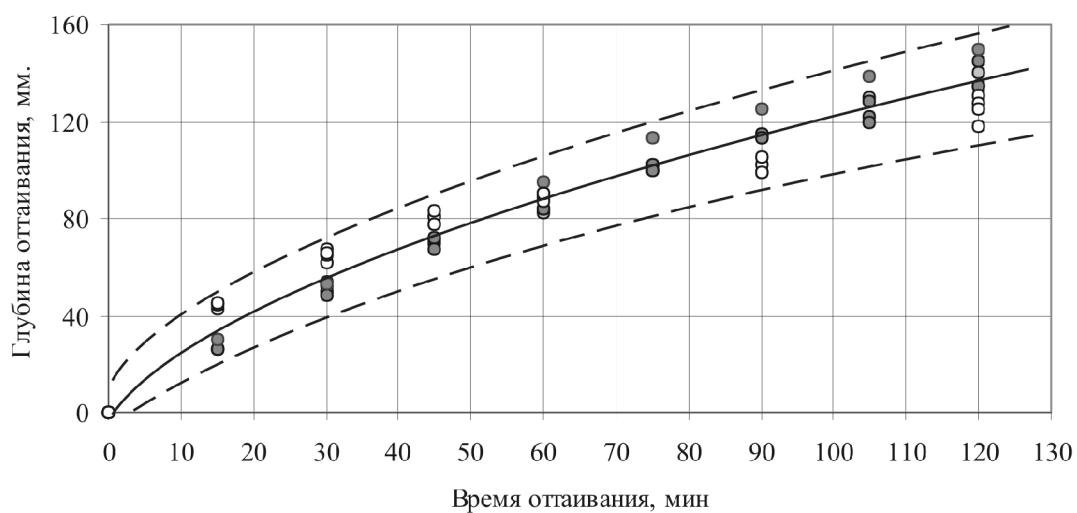


Рисунок 2. Обобщающая экспериментальная зависимость изменения глубины искусственного оттаивания мерзлого грунта во времени:
 1 – постоянное удаление оттаявшей части мерзлого грунта; 2 – периодическое удаление оттаявшей части мерзлого грунта; 3 – без удаления оттаявшей части мерзлого грунта



- - экспериментальные данные при натуральных испытаниях
- - экспериментальные данные при лабораторных испытаниях
- - расчетная зависимость из математической модели

Рисунок 3. График измерения глубины промерзания

Таблица 1

Технические характеристики новой установки по оттаиванию мерзлых грунтов

№ п/п	Характеристика	Ед. изм.	Значение
1	Тепловая мощность	кВт	15
2	Электрическая мощность	кВт	0,5
3	КПД	%	92,5
4	Расход газа (сжиженного)	кг/ч	1,17
5	Время отогрева	ч	3
6	Площадь оттаивания	м	1 x 1
7	Глубина оттаивания	м	1,5
8	Вес установки	кг	110
9	Максимальное давление	Па	5000
10	Габаритные размеры	мм	1200x1600x700

Описание принципа действия установки

Установка представляет собой единый мобильный аппарат (рис. 4), разделенный на три отдельных, но взаимосвязанных пространства: рабочее, электродвигательное и техническое, в которых размещаются: горелочное устройство, дымогарная труба, дымосос, отражательный экран, вентилятор, теплообменный аппарат и воздухоподогреватель. Работа вентилятора осуществляется за счет электродвигателя, подключенного к электрическому аккумулятору. Электродвигатель и аккумулятор размещаются в электродвигательном пространстве. Горелочное устройство, дымогарная труба, дымосос, воздухоподогреватель и теплообменный аппарат располагаются в техническом пространстве, отражательный экран – в рабочем.

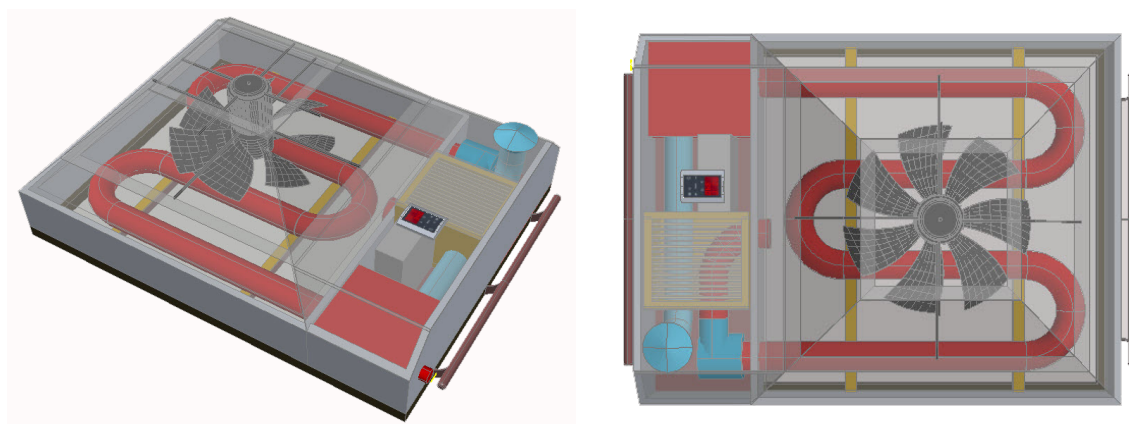


Рисунок 4. Общий вид мобильной радиационно-конвективной установки

Оттаивание мерзлых грунтов поверхностным искусственным способом достигается за счет применения устройства для радиационно-конвективного нагрева рабочих тел. Основное оборудование изобретения включает в себя горелочное устройство, с помощью которого производится организация смешения топлива и воздуха с образованием топливно-воздушной смеси и поддержание ее устойчивого сжигания, дымогарной трубы, в которой осуществляется развитие факела и движение дымовых газов, а также нагрев трубы для создания радиационно-конвективного теплопереноса от трубы к окружающей среде, дымососа, побуждающего движение дымовых газов от горелочного устройства по всей длине дымогарной трубы к ее выходу на воздухоподогреватель. В воздухоподогревателе осуществляется теплообмен между уходящими дымовыми газами и холодным воздухом, в результате чего исходный воздух подогревается до требуемой температуры для повышения эффективности сжигания смеси. В верхней части рабочего пространства аппарата над дымогарными трубами и вентилятором располагается отражательный экран. Для создания радиационно-конвективного теплопереноса в аппарате размещается вентилятор, осуществляющий движение газообразной нагреваемой среды в области рабочего пространства, ограниченной отражательным экраном и нагреваемым материалом. Работа вентилятора организуется за счет электродвигателя, подключенного к электрическому аккумулятору.

Эффективность обеспечивается за счет оптимизации расположения основных элементов установки и комбинации конвективного и радиационного способа теплопередачи.

Оценка эффективности установки

Для оценки эффективности полученных результатов произведено сравнение двух наиболее близких аналогов разрабатываемому техническому средству по оттаиванию грунта: это термоэлектрический мат ТЕРМОМАТ и устройство WACKER NEUSON E700M – агрегат для оттаивания грунта на глубину до 1,5 метров и для ухода за бетоном, работающий на жидком топливе. Результаты сравнения приведены в табл. 2. Выделенные значения показывают преимущества технического средства над другими по рассматриваемому показателю.

Таблица 2

Сравнительная характеристика технических средств

№ п/п	Показатель	Разрабатываемая установка	Термоэлектрический мат (ТЕРМОМАТ)	Устройство для прогрева почвы и бетона E700M (WACKER NEUSON)
1	Мощность установки, Вт/м ²	7500	340	180
2	Время оттаивания на глубину 0,5 м, час	1,5	30	24
3	Затраты на оттаивание, руб. / ч·м ²	4,9	23	147
4	Температура нагрева, °С	250	70	82
6	Габариты, мм x мм x мм	1200x1600x700	550x2740x15	3390x1500x1970
7	Масса, кг	110	20	3346

По таким показателям, как удельная мощность отогрева на 1 м² грунта, время оттаивания на глубину 0,5 м, затраты на оттаивание, выраженные в денежном эквиваленте – руб./ч·м², а также температуре нагрева, предлагаемая установка является более эффективной. Рассматривая такие показатели, как габариты и масса установки, более привлекательным с точки зрения перемещения и транспортировки является термомат, однако принимая в расчет его малую эффективность при оттаивании (порядка 30 час.), данные преимущества отодвигаются на второй план. В виду того, что второй аналог – устройство для прогрева почвы и бетона E700M – рассчитано на большие площади отогрева (до 400 м²), для наших условий подобное устройство неэффективно и нерационально.

Таким образом, можно говорить о том, что в сравнении с существующими техническими средствами разрабатываемая установка является эффективной и конкурентоспособной.

Кроме того, выделены основные возможности предлагаемой установки:

- конструкция и дизайн не имеют аналогов на современном рынке технических средств для ремонтно-строительных работ;
- минимальное время отогрева мерзлого грунта по сравнению с существующими установками;

- малый удельный расход энергии установкой наряду с комбинированным способом теплопередачи обеспечивают высокую эффективность установки;
- мобильность и компактность установки позволяют транспортировать в грузовом автомобильном транспорте и производить работу бригаде в количестве двух человек при любых условиях стесненности городского ландшафта;
- гибкость регулирования теплопроизводительности установки обеспечивает ее применение оттаивания строительных материалов и прогрева строительных конструкций любого назначения;
- энергоэффективное сочетание элементов установки и теплогидроизолированный корпус позволяют осуществлять ремонтно-строительные работы в любых климатических условиях.

Литература

1. Цытович, Н.А. Механика мерзлых грунтов / Н.А. Цытович. – М.: Высшая школа, 1973. – 446 с.
2. 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. – Волгоград: ВолГАСУ, 2009. – С. 99 - 101.
3. Сеницын, А.А., Суханов И.А., Рыбина Ю.В., Смирнова Е.В. К выбору оптимального способа и средства по оттаиванию мерзлого грунта // Автоматизация и энергосбережение машиностроительного производств, технология и надежность машин, приборов и оборудования: материалы пятой международной научно-технической конференции. Т.2. – Вологда: ВоГТУ, 2009 – С.146 - 149.
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 теплообмена 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.