Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. LXVII, вып. 1, 1975 г.

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ МЕРЗЛЫХ ГОРНЫХ ПОРОД

Кандидаты техн. наук *Ю. М. Мисник*, *Л. Б. Некрасов*

(Ленинградский горный ин-т)

Наиболее характерной особенностью разработки мерзлых горных пород является ее высокая энергоемкость и себестоимость. Сцементированные льдом рыхлые горные породы при низких отрицательных температурах становятся настолько прочными, что их экскавация без предварительной подготовки оказывается малоэффективной.

Традиционные способы подготовки мерзлоты к выемке путем оттаивания и взрывания требуют либо больших затрат тепла, либо бурения шпуров и взрывных скважин, что резко увеличивает себестоимость работ и, главное, препятствует их комплексной механизации.

С учетом огромных масштабов работ* изыскание и внедрение принципиально новых технологических процессов разрушения мерзлых пород, способных улучшить производство, дать максимальный экономический эффект — задача первостепенной важности.

Одна из наиболее характерных особенностей современного этапа научно-технической революции состоит в том, что качественно новые достижения техники, как правило, базируются на открытиях в области фундаментальных наук. Примером тому служит разработка в конце шестидесятых годов способа разрушения мерзлых пород, основанного на комбинированном воздействии на мерзлую породу мощных быстропеременных электромагнитных полей (МБЭП) и механических породоразрушающих нагрузок. Идея применения для разрушения горных пород комбинированного воздействия электромагнитной энергии и механических нагрузок была высказана впервые А. В. Варзиным еще в 1956 г. [1]. Однако в силу ряда объективных причин эта идея развития не получила и по существу была забыта. Объяснялось это слабым развитием техники генерирования больших высокочастотных и сверхвысокочастотных мощностей и полным отсутствием информации о поведении горных пород в МБЭП, без чего целесообразность их использования для разрушения горных пород представлялась проблематичной.

Первые обнадеживающие результаты, подтвердившие перспективность использования МБЭП для разрушения мерзлых пород, были получены в Ленинградском горном институте. В 1968 г. здесь впервые увен-

* В настоящее время в стране ежегодно разрабатывается свыше 1 млрд. м^3 мерзлых пород.

чалась успехом попытка технической реализации способа комбинированного разрушения мерзлых пород: было создано простейшее электротермомеханическое (ЭТМ) устройство — ручной ЭТМ инструмент [2, 7].

Опытный образец ЭТМ ручного инструмента испытывался в 1968—1969 гг. при проходке наклонных стволов в искусственно замороженных плывунах строящихся станций «Московская» и «Звездная» Ленинградского метрополитена. При этом была достигнута производительность труда, равная суммарной производительности 3—5 отбойных молотков модели МО-10, и резко улучшились условия труда.

За создание и внедрение ЭТМ ручного инструмента (рис. 1) институт в 1969 г. был отмечен дипломом, а авторы изобретения — серебряной и бронзовыми медалями ВДНХ СССР.

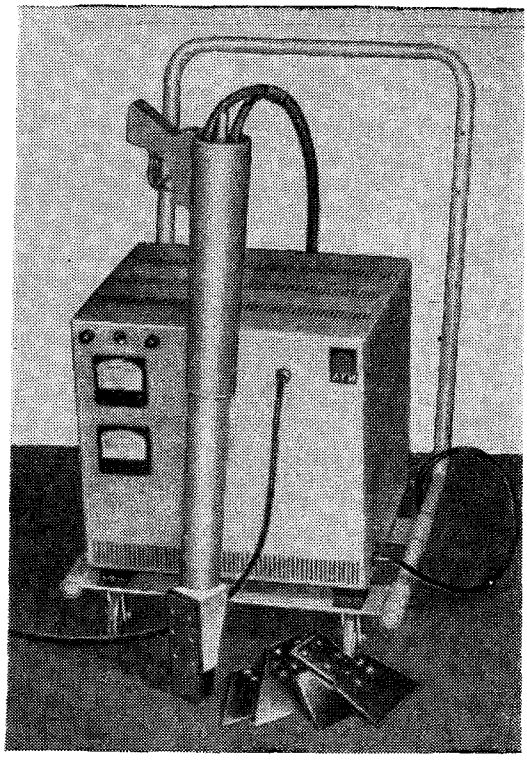


Рис. 1. Электротермомеханическая установка с ручным инструментом

Ручной ЭТМ инструмент наиболее простейший и, пожалуй, наименее совершенный из возможных вариантов технической реализации разрушения мерзлых пород комбинированным действием электромагнитной и механической энергии. Но именно созданием этого простейшего устройства была доказана практическая целесообразность такого способа разрушения мерзлых пород. Вместе с тем анализ выявленных недостатков, обусловленных выбором конструктивного решения ЭТМ инструмента, позволил наметить пути дальнейшего совершенствования электротермомеханических рабочих органов.

Так, примененный в ЭТМ инструменте в качестве средства ввода электромагнитной энергии в породу конденсатор, вследствие известных законов электродинамики, ограничивал диапазон использования частот несколькими десятками мегагерц, что в конечном счете ограничивало верхний предел уровня вводимой в породу электромагнитной мощности. Использование в инструменте мускульного усилия для окончательного разрушения мерзлой породы не позволяло получать технологический эффект от комбинированного воздействия на породу электромагнитной и механической энергии в полной мере.

Тем не менее создание такого инструмента положило начало новому этапу в развитии исследований по применению МБЭП для разрушения мерзлых пород.

В результате производственных испытаний ЭТМ инструмента было обнаружено несоответствие между его фактической и расчетной производительностями. Последняя определялась по затратам энергии на переход содержащегося в мерзлой породе льда в воду.

Это несоответствие побудило начать теоретические и экспериментальные исследования поведения мерзлых пород в мощных электромагнитных полях. В результате был открыт эффект резкого снижения мерзлыми породами и льдом своей первоначальной прочности под действием мощных электромагнитных полей [4].

Как показали дальнейшие исследования, этот эффект сопровождается чрезвычайно низкими энергетическими затратами, так как МБЭП диапазона высоких и сверхвысоких частот в основном воздействуют лишь на межкристаллические связи мерзлых горных пород и льда. Эффект разупрочнения мерзлых пород и льда в МБЭП явился физической основой для электротермомеханического способа разрушения мерзлых пород, который в самом общем виде можно сформулировать так: электротермомеханический способ разрушения заключается в том, что направленным воздействием МБЭП мерзлые горные породы разупрочняются ровно настолько, насколько это необходимо для последующей эффективной разработки пород механическими средствами.

В 1969 г. были начаты систематические исследования, направленные на выяснение природы взаимодействия мерзлых пород со слабыми и мощными электромагнитными полями.

Поскольку в научной литературе отсутствовали систематические данные по электрическим характеристикам мерзлых пород, а измерение их существующей аппаратурой крайне трудоемко, был создан полуавтоматический измерительный комплекс [3], на котором измерены диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь в диапазоне высоких и сверхвысоких частот. Проведенные измерения дали не только цифровой материал, который может быть положен в основу расчета и проектирования ЭТМ машин, но и позволили выяснить, как на диэлектрические характеристики влияют: минералогический состав породы, температура, влажность, макроструктура и т. д.

Измерения показали, что в диапазоне от —10 до 0° С электрические характеристики мерзлых пород заметно изменяются. Тангенс угла диэлектрических потерь в этом диапазоне может также меняться. Это, с одной стороны, приводит к более быстрому поглощению энергии электромагнитного поля вблизи излучателя, а с другой — к экранированию потока энергии, поступающего в среду. Для оценки этого эффекта были проведены теоретические исследования [8], которые дали возможность оценить это явление количественно.

Теоретические и экспериментальные исследования показали, что в полупроводящих средах, к которым относятся и мерзлые породы, электромагнитная энергия в основном поглощается на расстояниях, сравнимых с размерами излучателя и с длиной излучаемой им волны, т. е. в так называемой ближней зоне.

Поэтому принципы расчета и конструирования излучающих элементов ЭТМ рабочих органов должны отличаться от применяемых при расчете и конструировании традиционных антенно-фидерных систем (АФС). Последние должны обеспечить направленную передачу энергии электромагнитного поля в дальнюю зону, т. е. на расстояния, значительно превышающие размеры излучателя и длину волны (параметры среды можно считать неизменными во времени).

Расчет электромагнитного поля в ближней зоне связан с большими математическими трудностями даже при излучении в воздух. Традиционные приближенные вычисления полей в дальней зоне здесь неприменимы, так как приводят к недопустимым ошибкам. Поэтому в лаборатории были начаты работы по точному решению уравнений электродинамики в ближней зоне и по созданию приближенных методов расчета электромагнитного поля в ней [14].

Вследствие воздействия МБЭП на мерзлую породу заметно изменяются ее электрические характеристики, в результате чего в ближней зоне породы нагреваются быстрее. Расчетные работы позволили установить закономерности этого процесса, оценить его влияние на энергоемкость разупрочняющего действия МБЭП [8].

Создание подобных излучателей представляет собой совершенно новую научную область, не имеющую прецедентов в мировой научно-технической мысли.

Таким образом, можно констатировать, что излучающие элементы ЭТМ рабочих органов функционируют в принципиально иных (в электрическом отношении) условиях, когда подавляющая доля излучаемой ими электромагнитной энергии поглощается в ближней зоне, где вследствие появления эффекта трехмерного растекания плотность поглощения энергии резко убывает с удалением от излучателя. Причем плотность поглощения энергии в ближней зоне зависит от электрических свойств среды.

По сравнению с обычными АФС излучающие элементы могут испытывать значительные дополнительные механические нагрузки (в десятки и сотни g), вызванные их участием в породоразрушающем процессе.

Особенности функционирования излучающих элементов ЭТМ рабочих органов позволяют сформулировать основные требования, предъявляемые к ним.

1. Излучатели должны обеспечить работу на составляющей поля, которая имеет максимальную амплитуду вблизи излучателя и быстро затухает с расстоянием. Эта составляющая не дает вклада в поле дальней зоны и считается в традиционной антенной технике паразитной.

2. Излучающие элементы ЭТМ рабочих органов должны обеспечивать максимальную передачу электромагнитной энергии от генератора в породу независимо от изменения ее параметров.

3. Поскольку в некоторых конструкциях ЭТМ рабочих органов излучающие элементы одновременно выполняют функции породоразрушающего инструмента, они должны обладать высокой механической прочностью.

В разработке научных основ проектирования ЭТМ устройств для разрушения мерзлых пород большое значение имеют вопросы энергоемкости разупрочняющего действия МБЭП, их генерирования и подвода к излучателям ЭТМ рабочих органов, а также ввода электромагнитной энергии в мерзлую породу с помощью излучателей. Решение всех этих вопросов зависит от технологической направленности указанных ЭТМ устройств.

Так, при разработке ручного ЭТМ инструмента в качестве средства генерирования и передачи электромагнитного поля соответственно применялись специально разработанные автогенератор и коаксиальная линия [6].

При решении другой технологической задачи, связанной с бурением скважин в многолетнемерзлых породах, оказалось возможным разработать ЭТМ машину в варианте скважинного бурового снаряда (рис. 2) [5, 9, 10]. При этом с учетом обеспечения биологической безопасности в качестве породоразрушающего фактора применили исключительную по эффективности воздействия на мерзлую породу электромагнитную энергию сверхвысоких частот, а для окончательного разрушения и отделения породы от забоя — породоразрушающий инструмент (разбурники) вращательно-режущего типа.

Трудность создания (по существу впервые в мировой практике) механизированного ЭТМ бурового комплекса заключалась и в том, что при его разработке пришлось использовать стандартный сверхвысокочастотный генератор магнетронного типа, выпускаемый отечественной

электронной промышленностью для других целей. Впервые была сделана попытка применить мощный магнетронный генератор непрерывного действия при высоком уровне вибрации и ударных нагрузок, а также при автономной системе охлаждения. Помимо этого, в процессе создания электротермомеханического бурового снаряда пришлось решить ряд сложных инженерно-технических задач, связанных с необходимостью миниатюризации вспомогательных узлов магнетрона: электромагнита, накальных трансформаторов и др., и выполнить серию теплотехнических расчетов, так как ЭТМ буровая машина имеет несколько источников выделения тепла (система охлаждения магнетрона, электродвигатели привода породоразрушающего инструмента, механическая передача) и должна быть энергетически сбалансирована. При собственном весе 650 *кг* указанная машина обеспечивает проходку скважины диаметром 800 *мм* со скоростью, недоступной для бурового оборудования традиционного типа.

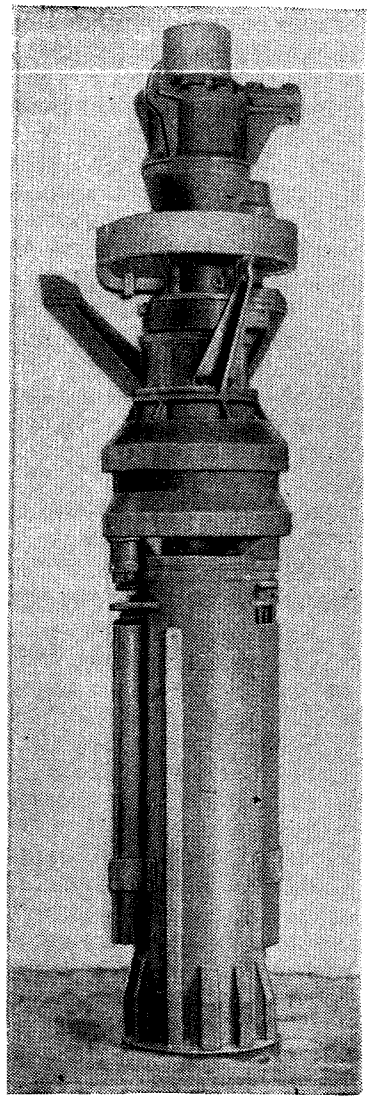


Рис. 2. Буровой электротермомеханический снаряд

Вопрос энергоемкости разупрочняющего действия МБЭП на горные породы вообще и мерзлые породы в частности является одним из важнейших, так как без знания этого параметра невозможно определить технико-экономическую эффективность и конкурентоспособность различных способов разрушения горных пород с применением электромагнитной энергии.

Известный способ калориметрических измерений, применяемый при определении энергоемкости термического разрушения горных пород, оказался при воздействии на них МБЭП непригодным, так как калориметрирование предусматривает длительную выдержку образца в калориметре для уравнивания его температуры с температурой рабочего тела. Но главная причина, из-за которой нельзя воспользоваться калориметрированием при определении энергоемкости воздействия на горную породу мощным сверхвысокочастотным полем, заключается в том, что оно не позволяет определить энергоемкость в динамике, т. е. в любой момент времени, не извлекая образец из сверхвысокочастотного поля. А это означает, что калориметрирование непригодно при изучении энергоемкости на начальных стадиях разрушения.

В этой связи был предложен способ экспериментального определения энергоемкости процесса разупрочнения и разрушения горных пород и мерзлых грунтов, подвергнутых воздействию мощного сверхвысокочастотного поля. Сущность этого способа состоит в том, что образец мерзлой горной породы помещают в мощное сверхвысокочастотное поле бегущей волны. При этом величину электромагнитной энергии, погло-

щаемой образцом горной породы, определяют по реакции (возмущающему действию) образца на параметры поля бегущей электромагнитной волны, а результаты его воздействия на образец, выражающиеся в снижении механической прочности горной породы, — по изменению времени прохождения в образце маломощных ультразвуковых продольных колебаний. Это позволяет определять поглощаемую мощность практически мгновенно, причем с погрешностью, не превышающей 8—9%.

Безынерционность и высокая точность определения поглощенной образцом мощности позволили обнаружить интересную закономерность: зависимость энергоемкости разупрочнения от уровня вводимой в породу мощности.

Предварительные результаты экспериментального определения энергоемкости процесса разупрочнения мерзлых пород в поле частотой 2375 *МГц*, полученные на уникальной установке, созданной в Проблемной лаборатории разрушения горных пород МБЭП, показали, что с увеличением удельной мощности, вводимой в породу, наблюдается снижение энергоемкости разупрочнения единицы объема мерзлой породы в равномерном поле — удельной энергоемкости.

Теоретические оценки показали, что энергоемкость разупрочнения мерзлых пород с увеличением уровня вводимой мощности может снижаться вплоть до взрывного разрушения мерзлых пород.

Удельная энергоемкость разупрочнения породы является физической характеристикой процесса взаимодействия МБЭП с веществом и зависит только от параметров поля и взаимодействующей с ним МБЭП. Реальная технологическая энергоемкость, с которой имеют дело при ЭТМ разрушении, отличается от физической энергоемкости качественно и количественно. Несмотря на то что в технологическую энергоемкость входят энергозатраты на механическое породоразрушение, она, как показали испытания ручного ЭТМ инструмента и ЭТМ буровой машины, значительно ниже физической. Это обусловлено тем, что в подавляющем большинстве технологических процессов разработки мерзлых пород разрушающему действию подвергается только незначительная часть объема породы. Поэтому дальнейшие исследования энергоемкости ЭТМ разрушения должны быть направлены на разработку методики и средств, позволяющих определить энергоемкость процесса ЭТМ разрушения мерзлых пород в конкретных технологических процессах.

С этой целью в Проблемной лаборатории разрушения горных пород МБЭП создается специальный исследовательский стенд, который позволит получить исчерпывающую информацию по всем технологическим параметрам ЭТМ рабочих органов в условиях, максимально приближающихся к производственным.

Таким образом, важнейшими вопросами, от которых прежде всего зависит, насколько успешно будут развиваться работы по созданию нового класса технических средств, являются вопросы, связанные с созданием совершенных ЭТМ рабочих органов. Наиболее перспективным типом ЭТМ рабочих органов представляются комбинированные, излучающие элементы которых совмещают функции механического породоразрушающего инструмента. ЭТМ рабочие органы такого типа являются наиболее целесообразными с точки зрения наилучших условий ввода электромагнитной энергии в породу, снижения энергоемкости процесса породоразрушения, компоновки узлов машин, уменьшения их габаритов и т. п. Первые шаги на пути создания совмещенных ЭТМ рабочих органов сделаны в Проблемной лаборатории разрушения горных пород МБЭП. Уже разработаны и исследуются ЭТМ рабочие органы активного ковша экскаватора, рыхлителя и сваи для погружения в мерзлый грунт [11—13].

ЛИТЕРАТУРА

1. Варзин А. В. Способ разрушения горных пород. Авт. свид. № 109349. Бюлл. № 10, 1957.

2. Добрецов В. Б., Некрасов Л. Б., Фатеев В. И. Устройство для высокочастотного электротермомеханического разрушения мерзлых горных пород. Авт. свид. № 246437. Бюлл. № 21, 1969.

3. Кончаковский Е. Р., Некрасов Л. Б., Килькеев Р. Ш. Устройство для измерения ослабления СВЧ сигналов. Авт. свид. № 375589. Бюлл. № 16, 1973.

4. Мисник Ю. М., Некрасов Л. Б. О механической прочности мерзлых пород, обработанных полем токов высокой частоты. В сб. «Новые исследования в горном деле». Изд. ЛГИ, 1969.

5. Мисник Ю. М., Некрасов Л. Б., Лейбин Ю. В. Устройство для разрушения горных пород. Авт. свид. № 281357. Бюлл. № 29, 1970.

6. Мисник Ю. М., Некрасов Л. Б., Корчаков В. Ф. К расчету ВЧ генератора для электротермомеханического разрушения мерзлых пород. Зап. ЛГИ, т. 62, вып. 1, 1972.

7. Некрасов Л. Б. и др. Устройство для разрушения мерзлых пород. Авт. свид. № 309195.

8. Некрасов Л. Б., Рикенглаз Л. Э. Отражение энергии электромагнитного поля от полубесконечной диэлектрической среды при наличии фазового перехода. Журн. техн. физ., т. 42, вып. 7, 1972.

9. Мисник Ю. М. и др. Машины электротермомеханического действия. «Колыма», 1973, № 12.

10. Некрасов Л. Б., Мисник Ю. М., Цукерник З. С. Устройство для расширения скважин. Авт. свид. № 325371. Бюлл. № 3, 1972.

11. Некрасов Л. Б. и др. Землеройная машина. Авт. свид. № 386085. Бюлл. № 26, 1973.

12. Некрасов Л. Б. и др. Ковш экскаватора. Авт. свид. № 378598. Бюлл. № 19, 1973.

13. Некрасов Л. Б. и др. Землеройная машина. Авт. свид. № 399592. Бюлл. № 39, 1973.

14. Некрасов Л. Б., Рикенглаз Л. Э. К теории адиабатического нагрева СВЧ полем диэлектриков с глубиной проникновения, зависящей от температуры. Журн. техн. физ., т. 43, № 4, 1973.