

625.84

П-37

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО  
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
БССР

Белорусский технологический институт им. С. М. Кирова

630\*383.4(043.3)

На правах рукописи

Аспирант Л. Н. ПЛАКСА

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОПРОСОВ СОЗДАНИЯ  
ПОКРЫТИЙ ЛЕСНЫХ ДОРОГ  
ИЗ УПЛОТНЕННОГО СНЕГА  
С ВНЕСЕНИЕМ ТЕПЛА**

Автореферат  
диссертации на соискание  
ученой степени кандидата  
технических наук

Минск  
1966

625.84

П-37

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО  
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
БССР

Белорусский технологический институт им. С. М. Кирова

На правах рукописи

Аспирант Л. Н. ПЛАКСА



ИССЛЕДОВАНИЕ ВОПРОСОВ  
СОЗДАНИЯ ПОКРЫТИЙ ЛЕСНЫХ  
ДОРОГ ИЗ УПЛОТНЕННОГО  
СНЕГА С ВНЕСЕНИЕМ ТЕПЛА

2440 ар

Автореферат  
диссертации на соискание  
ученой степени кандидата  
технических наук

Научный руководитель  
кандидат технических наук  
доцент КИШИНСКИЙ М. И.



Минск  
1966

Настоящая работа выполнена в лаборатории механизации дорожных работ Центрального научно-исследовательского и проектно-конструкторского института механизации и энергетики лесной промышленности.

Экспериментальные работы проведены в Московской, Архангельской областях и в Коми АССР.

Защита состоится на заседании Ученого совета Белорусского технологического института имени С. М. Кирова

„\_\_\_\_\_“ \_\_\_\_\_ 1966 г.

Ваши отзывы и замечания на автореферат в 2-х экземплярах просим направлять по адресу:

г. Минск ул. Свердлова, 13, Ученому Секретарю совета.

Автореферат разослан . . . . . 1966 г.

Ученый секретарь совета БТИ . . . . .

## ВВЕДЕНИЕ

Ведущим звеном лесозаготовительного производства, определяющим успешную работу предприятий, является лесовозный транспорт. В настоящее время все большее распространение получает автомобильный транспорт леса. В 1965 году по автомобильным дорогам было вывезено свыше 250 млн. м<sup>3</sup> древесины. В лесной промышленности СССР эксплуатируется около 3000 автомобильных дорог общим протяжением свыше 60 тыс. км. Кроме того, для вывозки древесины из лесосек ежегодно дополнительно строится около 35 тыс. км временных дорог, так называемых усов, со сроком действия до 1 года. Для осуществления намеченного развития лесной промышленности и для обеспечения нормальной работы предприятий надо ежегодно строить более 9 тыс. км лесовозных дорог долговременного действия (магистралей и веток).

Поэтому вопросы механизации строительства и содержания автодорог являются актуальными и привлекают к себе все большее внимание.

Центр лесозаготовок в настоящее время переместился в многолесные районы с продолжительной зимой и устойчивым снежным покровом. В основных лесозаготовительных районах на зимний период падает 40—50% годового объема вывозки древесины по специальным зимним дорогам, так называемым зимникам.

Все лесозаготовительные предприятия в своем лесосечном фонде выделяют зону зимнего и летнего освоения. В зимнее время вырубается лесосеки с наиболее сырыми грунтами, где летом работа трелевочных тракторов и лесовозных автомобилей затруднена. Если подсчитать эту часть фонда, которая может быть вывезена в зимнее время, то она составит от 30 до 50% лесной площади.

Вывозка леса по зимним дорогам даст возможность использовать все капитальные вложения на строительство автодорог с твердым покрытием в летней зоне, и это значительно облегчит обеспечение летних лесосек дорогами.

Учитывая, что основные лесозаготовки ведутся в районах с продолжительной зимой и глубоким снежным покровом,

работам по устройству зимних автодорог необходимо уделять серьезное внимание.

Строительство зимних дорог в настоящее время в основном осуществляется методом расчистки проезжей части от снега и незначительная часть зимних дорог устраивается путем уплотнения снега с последующей поливкой водой.

Снежноуплотненное дорожное покрытие, устроенное на целинном снеге или же послойно наращенное, по мере накопления снега к периоду снежных метелей выходит на уровень со снежным покровом и не нуждается в трудоемких затратах на расчистку и ограждение. Не менее важным преимуществом снежно-уплотненных дорог перед расчищаемыми является также их срок службы в весенний период. Хорошо накатанное за зиму снежное покрытие обледеняется и весной позволяет продлить эксплуатацию автотранспорта на 1—1,5 недели, а при добавках воды или тепловой энергии при уплотнении—на 2—3 недели.

## СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Вопросами устройства снежных лесовозных дорог в лесной промышленности начали заниматься еще в двадцатые годы. Снег использовался для выравнивания санного пути конных и транспортных лесовозных дорог, а также для уменьшения сопротивления движению саней. Толщина уплотненного слоя снега не превышала 10 см. Излишки снега убирались с дорожного полотна, так как имеющимися средствами для уплотнения снега (деревянные катки и гладилки) не удавалось достигнуть необходимой плотности и прочности более толстого слоя снега.

Дальнейшее увеличение объемов вывозки и поднятие производительности труда в лесной промышленности шло по линии увеличения рейсовой нагрузки путем уменьшения сопротивления движению подвижного состава за счет обледенения пути и применения на вывозке леса однополосных саней. Для обледенения дорожного полотна создавались специальные поливщики. Формирование и обледенение колеи под сани осуществлялось с помощью стругов, парожаровых утюгов и других механизмов.

К изучению вопросов использования снега в качестве дорожно-строительного материала в нашей стране приступили в период Великой Отечественной войны. Начиная с 1941 года, этими вопросами одновременно занимались АН СССР, Научно-исследовательский аэродромный институт (НИАИ) ВВС, Центральный научно-исследовательский инженерный институт имени Карбышева (ЦНИИИ) СВ, Дорож-

ный научно-исследовательский институт (ДорНИИ) и Гидрологический институт.

В результате исследований, проведенных в Академии Наук СССР А. Н. Крагельским, была разработана теория рекристаллизации снега, позволившая предложить новый метод обработки снега, построенный на принципе перемешивания и последующего разрушения кристаллов обработанного снега. На основании этой теории уплотнение снега заключается в последовательном проведении:

а) перемешивания и разрушения естественной структуры снега на всю толщу покрова, производимых при помощи борон;

б) укатки перемешанного снега катками;

в) выдерживания уплотненного снега с целью смерзания и увеличения его твердости.

Исследования ЦНИИИ СВ и НИАИ ВВС были направлены на отработку основных параметров машин, объединяющих в себе ряд механизмов для одновременного выполнения комплекса работ по созданию высокопрочных покрытий из снега. Учеными В. Е. Харьковым, М. И. Ивановым, А. П. Ситником, А. Л. Горбуновым и другими разрабатывалась теория создания покрытий из снега, а также изучались физико-механические свойства снега и их изменение при воздействии на снег орудий перемешивания и уплотнения.

В результате исследований, проведенных ЦНИИИ и НИАИ, были отработаны параметры измельчающих и уплотняющих механизмов. Наиболее эффективное измельчение и перемешивание снежного покрова достигается с помощью приводных зубовых фрез. В качестве уплотняющего механизма предложена виброплита.

Применение вибраторов направленного действия на уплотнении перемешанной массы снега позволило довести плотность снежного покрытия до  $0,65-0,70 \text{ г/см}^3$ , одинаковой по всей толщине его в  $25-30 \text{ см}$ . Наибольшая плотность, которую удавалось получить с помощью катков и гладилок, составляла  $0,45 \text{ г/см}^3$  в верхнем слое с убыванием вглубь.

При этом было установлено, что не всегда происходила хорошая смерзаемость зерен снега между собой, которая обусловливается не только плотностью и низкой температурой снега, а и наличием связующей среды (пленок воды) между ними.

Образование водных пленок вокруг кристаллов снега наиболее целесообразно производить путем введения тепловой энергии (огречего воздуха) в воздушно-снеговой поток. Многократные попытки создания высокопрочных покрытий из снега путем поверхностной обработки его пламенем фурсунок, днищем раскаленной плиты, горячим паром и пр. не

увенчались успехом по той причине, что снег — плохой проводник тепла, поэтому упрочнялась только верхняя корка покрытия толщиной в 5—8 см, которая не выдерживала нагрузку от подвижного состава.

Зимой 1959 года НИИИ производил испытания макета снегоуплотняющей машины (в испытаниях принимал участие ЦНИИМЭ), принципиальная схема работы которого заключается в последовательном проведении следующих операций:

1. Измельчение и перемешивание снежного покрова с помощью приводной зубовой фрезы.

2. Поверхностное оплавление частиц снега в тепловой камере во взвешенном состоянии.

3. Уплотнение измельченной и обогретой массы снега виброплитой.

4. Выдерживание покрытия с целью промерзания.

В результате были получены снегоуплотненные покрытия плотностью 0,6—0,7 г/см<sup>3</sup> и твердостью свыше 30 кг/см<sup>2</sup> при толщине 25—30 см.

Преимущества ввода тепловой энергии в воздушно-снеговой поток заключается в том, что заглублием фрезы можно регулировать толщину покрытия, а временем пребывания частиц снега под воздействием тепла — количество влаги на их поверхности. Практически покрытие можно довести до плотности и прочности льда.

Эта принципиальная схема обработки снега была принята для разработки технического задания опытного образца снегоуплотняющей машины в ЦНИИМЭ и СевНИИПе. Совершенно не изученным оказался вопрос взаимодействия тепла со снегом.

Настоящая работа посвящается вопросам исследования ввода тепловой энергии в снег с целью получения высокопрочных покрытий.

## ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИИ

1. Исследование вопросов взаимодействия тепла со снегом применительно к условиям обогрева частиц во взвешенном состоянии.

2. Исследование взаимодействия потоков снега и горячего воздуха.

3. Исследование процессов, происходящих в обогреваемой частице снега.

4. Установление скорости распространения тепловой энергии в частице снега.

5. Установление закономерности распространения вещества в частице снега при плавлении ее в потоке горячего воздуха.

6. Установление затрат тепловой энергии на устройство снежных покрытий под тяжелые автопоезда.

7. Исследование процессов, происходящих в массе обогретых и уплотненных частиц снега.

8. Установление скорости промерзания покрытий из снега.

9. Исследование условий применения тепла при устройстве покрытий из снега.

## ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОПРОСОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТЕПЛА СО СНЕГОМ

Введение тепловой энергии в снег происходит при встрече потоков снега и горячего воздуха. Отсутствие тщательного анализа процесса взаимодействия потоков отражается на практическом осуществлении конструирования тепловых установок снегоуплотняющих машин.

На рис. 1 приведена схема ввода горячего воздуха в снеговой поток. Приводная фреза (2) измельчает зубьями (3) снежный покров (1) и взвешивает его в тепловой камере (4). Здесь мелкие частицы плавятся, а более крупные поверхностно оплавливаются. Затем, под действием собственного веса, горячего воздуха и вибробруса, масса частиц снега уплотняется.

В результате аналитического анализа взаимодействия потоков воздуха и снега выведено уравнение связи основных величин, от которых зависит оптимальный режим обогрева снега. Уравнение имеет следующий вид:

$$\operatorname{ctg} x = \left( \frac{P\pi R^2}{m} + g \right) \cdot \frac{l}{\cos^2 \varphi v^2} - \operatorname{tg} \varphi,$$

где

$X$  — угол наклона вектора результирующей скорости к вертикали, град.;

$P$  — аэродинамическое давление в струе воздуха,  $\text{кг/см}^2$ ;

$R$  — радиус частицы снега,  $\text{см}$ ;

$m$  — масса частицы снега,  $\text{кг.сек.}^2/\text{м}$ ;

$g$  — ускорение свободнопадающей частицы снега,  $\text{м/сек.}^2$ ;

$l$  — ширина струи горячего воздуха,  $\text{м}$ ;

$v$  — скорость частицы до встречи с потоком воздуха,  $\text{м/сек.}$ ;

$\varphi$  — угол наклона вектора скорости к горизонту, зависящий от заглубления фрезы, град.

Изменением перечисленных величин в сторону уменьшения или увеличения задают величину угла  $X$  такой, при которой траектория частиц в воздушно-тепловом потоке была

бы наиболее длинной. Наилучшим условием обогрева является встреча частиц снега с воздушно-тепловым потоком в месте выхода из коллектора с встречной стороны и приземления их в конце действия воздушно-теплого потока.

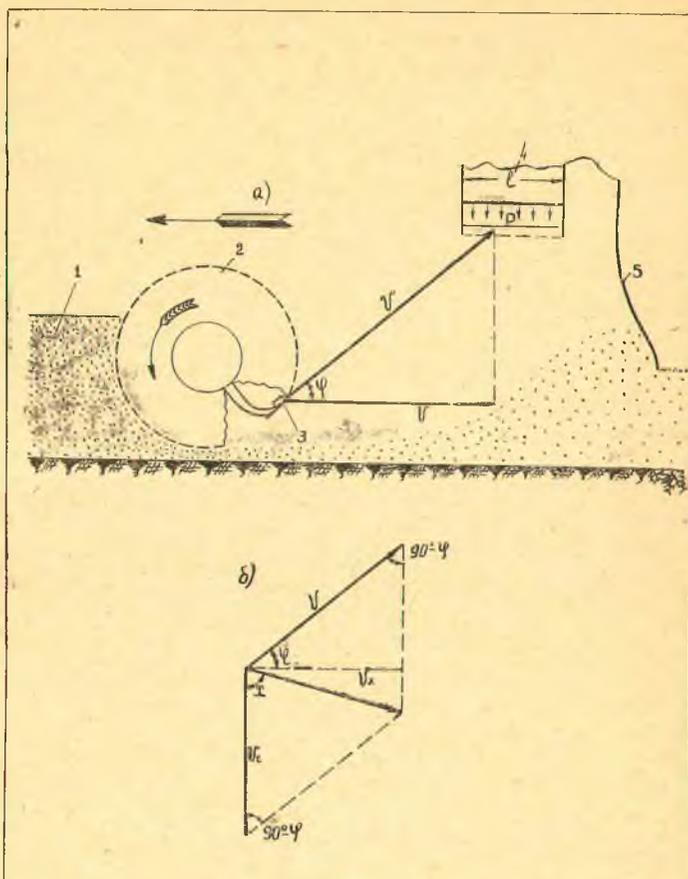


Рис. 1. Схема взаимодействия потоков горячего воздуха и снега на снегоуплотняющих машинах.

Обогрев снега связан с затруднениями установления способностей восприятия тепла и условий распространения его в частицах. Эти вопросы в настоящее время не изучены и поэтому являются предметом исследования настоящей работы. Разрешение вопросов восприятия тепла и условий распространения его в частицах снега даст возможность правильно назначать режим обогрева снега и определять затраты тепловой энергии в зависимости от физико-механических свойств снега.

Исследование тепловых процессов в дисперсных материалах осуществляется по двум направлениям:

1. На основе учета, решения и анализа единой системы уравнений тепло- и массообмена; при этом необходимо знание термических и массообменных характеристик материала. Этот путь находит все большее применение, однако практическая реализация его в настоящее время связана со значительными трудностями: необходимостью учета большого числа характеристик, меняющихся в широких пределах в зависимости от структуры материала и условий опыта. В настоящее время сложный характер этих зависимостей выявлен далеко не полно. В тех же случаях, когда установлены точные количественные связи между комплексом термических характеристик и свойствами и структурой материала, возникают осложнения при решении нелинейных задач теплопроводности. Как правило, для доведения решения до результативного конца приходится принимать термические характеристики вещества в определенных пределах постоянными.

2. На основании представления структуры материала как квазиоднородного тела. При этом задача нахождения температурного поля сводится к решению одного уравнения теплопроводности, осложненного действием внутренних источников и наличием переменных тепловых характеристик. При таком подходе необходимо учитывать лишь термические характеристики материала: коэффициент теплопроводности « $\lambda$ », коэффициент температуропроводности « $a$ », теплоусвояемость « $b$ » и объемную теплоемкость « $C$ ». В этом случае термические характеристики не принимаются постоянными — они отражают влияние всех возможных в материале процессов, помимо теплопроводности, таких, как конвекция, излучение и, в первую очередь, массообмен.

Необходимо заметить, что сужение задач, решаемых на основе этого второго принципа по сравнению с первым, безусловно, является минусом, поскольку не удается одновременно находить поле влажности и температуры. Однако другие явные преимущества второго принципа — его относительная простота, значительно меньшее количество необходимых параметров, возможность доведения решения до оперативного вида — позволяют рекомендовать его для многих задач. Этот способ особенно эффективен при совместной оценке тепло- и массообмена, если указаны и точно очерчены границы исследуемых температур, влажности и структуры.

Таким образом, считается, что для оценки тепловых свойств дисперсных материалов и для понимания основных термических процессов, протекающих в них при самых различных режимах и условиях, необходимо и достаточно зна-

ние теплопроводности, температуропроводности, теплоемкости и теплоотдачи.

Термические характеристики являются функциями следующих параметров состояния материалов: химической природы их, механического состава или ступени дисперсности, температуры, влажности и плотности.

Все существующие методы и принципы определения термических характеристик материала распределяются на две группы:

А. Группа методов, основанных на принципе стационарного теплового режима.

Б. Группа методов, основанных на принципе нестационарного теплового режима.

Методы стационарного режима в некоторых случаях, при испытании материалов при высоких температурах, являются пока незаменимыми, а в других случаях, как, например, при испытании замороженных материалов, единственно приемлемыми.

С другой стороны, процесс плавления является процессом нестационарным. Нестационарность является следствием непрерывного изменения формы плавящегося тела, которое приводит к изменению во времени условий теплоотдачи между средой и поверхностью образца и, как следствие, к изменению скорости процесса, а также перемены местонахождения границ раздела фаз в пространстве. Однако по поводу этих причин нестационарности можно сказать, что они вызывают сравнительно малые отклонения от стационарного процесса при тех скоростях их, с которыми приходится встречаться в практических задачах.

Одним из основных вопросов, имеющих важное практическое значение при изучении процесса плавления, является скорость процесса, знание которой позволяет установить время протекания плавления частиц.

Применительно к условиям плавления частиц снега в потоке горячего воздуха во взвешенном состоянии и принимая во внимание граничные условия третьего рода, составлено дифференциальное уравнение процесса плавления. Оно имеет следующий вид:

$$\frac{dv}{d\tau} = \frac{\alpha (t_c - t_n) \cdot F}{L_n \cdot \gamma}$$

где

$dv$  — объем расплавленного снега за время  $d\tau$ ;

$t_c$  — температура среды, град.;

$t_n$  — температура поверхности частицы, град.;

$F$  — поверхность частицы,  $m^2$ ;

$L_n$  — скрытая теплота плавления снега,  $к.кал./кг$ ;

$\gamma$  — объемный вес снега,  $кг/м^3$ ;

$\alpha$  — коэффициент теплоотдачи от среды к шаровой поверхности частицы снега,  $к.кал./м^2 \text{ град. час.}$

В задаче произведено допущение, что частицы имеют шарообразную форму и при попадании в зону потока горячего воздуха подхватываются им. Распределение температуры в начальный период принимается равномерным.

Из дифференциального уравнения следует, что скорость плавления частицы снега в потоке горячего газа зависит от температуры потока, коэффициента теплообмена, а также от размера и плотности частиц.

Опытами ряда исследователей установлено, что величина коэффициента теплообмена зависит от геометрической формы омываемого тела, физических свойств среды и тела, температуры среды и тела, состояния среды и пр.

Аналитический способ отыскания коэффициента теплоотдачи заключается в составлении и решении критериальных уравнений. Критерии подобия находятся из дифференциального уравнения теплопроводности снега и условий однозначности. Дифференциальное уравнение теплопроводности снега имеет следующий вид:

$$\frac{dt}{d\tau} = \lambda \frac{d^2t}{dz^2} - \frac{L}{C} \frac{de}{d\tau}.$$

Критериальную зависимость, характеризующую процесс плавления, вывел С. С. Кутателадзе. Экспериментально подтверждено предположение общих закономерностей плавления плотного и пористого льда в горячей воде. Эксперименты по плавлению плотного льда проводил С. С. Кутателадзе, а пористого — А. Г. Ткачев.

Наши эксперименты показали, что критериальное уравнение процесса плавления, выведенное С. С. Кутателадзе, справедливо для плавления частиц снега в потоке горячего воздуха.

Критериальное уравнение имеет следующий вид:

$$\frac{F_0}{\Phi \frac{\gamma'}{\gamma}} = \gamma_1 (P_u G_u \cdot \beta \cdot \Delta \cdot t)^{-n},$$

где

$F_0 = \frac{a\tau}{R^2}$  — критерий Фурье;

$P_u = \frac{\nu}{a}$  — критерий Прандля;

$\Phi = \frac{L}{c \cdot \Delta t}$  — критерий, учитывающий изменение агрегатного состояния вещества;

$G_u = \frac{g \cdot R^2 \beta \Delta t}{\sqrt{a}}$  — критерий Гросгофа;

$a$  — коэффициент температуропроводности,  $m^2/час$ ;

$\tau$  — время, час;

$R$  — радиус шаровой поверхности,  $m$ ;

$C$  — удельная теплоемкость,  $к.кал./кг.град.$ ;

$\nu$  — коэффициент кинематической вязкости,  $m^2/час$ ;

$g$  — ускорение силы тяжести,  $m/час^2$ ;

$\beta$  — коэффициент относительного объемного расширения,  $1/^\circ C$ ;

$\gamma'$  — объемный вес твердого тела,  $кг/m^3$ ;

$\Delta t = t_c - t_n$  — температурный напор;

$\eta$  и  $n$  — параметры, определяемые опытным путем.

Коэффициент теплоотдачи определяют из критериальной зависимости

$$Nu = \eta (P_u G_u)^n,$$

где

$Nu = \frac{\alpha d}{\lambda}$  — критерий Нуссельта;

$\alpha$  — коэффициент теплоотдачи снежных образцов,  $к.кал./m^2.час.град.$

$d$  — диаметр образца,  $m$ ;

$\lambda$  — коэффициент теплопроводности теплоносителя,  $к.кал./m.час.град.$

Для определения параметров  $\eta$  и  $n$  ставились опыты в лабораторных условиях на специально сконструированной для этой цели установке.

Оплавленная масса частиц снега уплотняется и выдерживается определенное время с целью промораживания и приобретения необходимой для эксплуатации автотранспорта прочности.

Процесс промерзания снежного покрытия находится в зависимости от тепловых свойств снега: теплопроводности, теплоемкости, скрытой теплоты кристаллизации воды, теплоты испарения, возгонки и десублимации.

Дифференциальное уравнение процесса распространения тепла при промерзании и протаивании грунтов в простейшем линейном случае было выведено А. Г. Колесниковым и уточнено Г. К. Мартыновым и Ф. Н. Шехтер.

Точное решение глубины промерзания грунтов произведено Стефаном. Формула расчета глубины промерзания имеет следующий вид:

$$\xi = \beta \sqrt{\tau},$$

где

$\xi$  — глубина промерзания за время  $\tau$  при поддержании постоянной температуры над поверхностью;

$\beta$  — коэффициент, определяемый опытным путем.

П. П. Кузьминым доказана справедливость этого уравнения при определении глубины промерзания влажного естественного снежного покрова, плотность которого колеблется в пределах 0,20—0,35 г/см<sup>3</sup>. Дифференциальное уравнение скорости промерзания снежного покрова имеет следующий вид:

$$\frac{d\zeta}{d\tau} = \frac{1}{2} \frac{2e_1\delta_1d_1(t_3 - t_n)}{Le\delta_2\tau} = \frac{\beta}{2\sqrt{\tau}},$$

где

$$\beta = \frac{2c_1\delta_1d_1(t_3 - t_n)}{Le\delta_2};$$

$c_1$   $\delta_1$   $a_1$  — объемная теплоемкость и коэффициент температуропроводности сухого снега;

$e$  — влажность снега;

$\delta_2$  — плотность влажного снега;

$t_3$  — температура замерзания воды;  $t_n$  — температура воздуха.

Экспериментальным путем в полевых условиях нами проведено исследование скорости промерзания уплотненных покрытий из снега в зависимости от его влажности, плотности и температуры окружающего воздуха.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОПРОСОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТЕПЛА СО СНЕГОМ

Проведено исследование влияния скорости движения потока горячего воздуха на способ распространения влаги, образующейся на поверхности частиц снега в период их плавления. Предполагались два пути распространения: проникновение влаги внутрь по порам образца и стекание ее по мере образования на поверхности. Испытаниям подвергались сферические образцы из снега плотность от 0,30 до 0,60 г/см<sup>3</sup>, размером 40—50 мм. Образец посыпался нерастворимым порошком мелкого помола и помещался в тепловую камеру, где температура горячих газов была равной 100°С и скорость потока составляла около 10 м/сек. После выдерживания в течение 40—70 сек. образец извлекался из камеры, разрезался на доли и велось наблюдение с помощью микроскопа за проникновением частиц красителя внутрь образца.

В результате этих опытов было установлено, что образовавшаяся влага на поверхности снежных образцов не проникает внутрь по порам, а стекает с его поверхности по мере накопления. В образцах малой плотности (0,30 г/см<sup>3</sup>) и значительной пористости не было отмечено кондуктивной теплопередачи при такой скорости движения теплоносителя.

Моделирование процесса плавления частиц снега во взвешенном состоянии с целью определения скорости их плавления и величины теплоотдачи проводилось на специальной лабораторной установке (рис. 2).

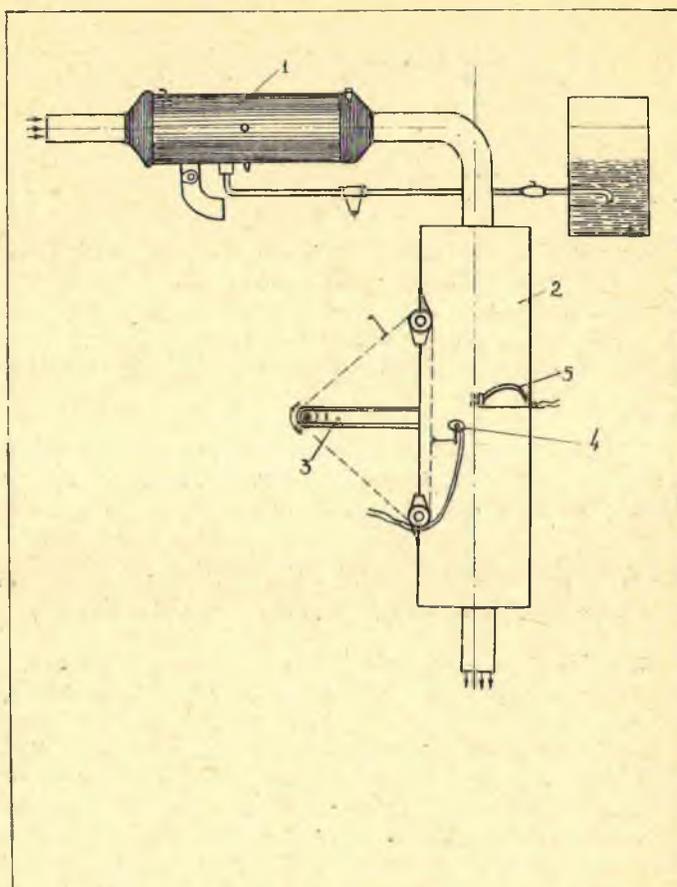


Рис. 2. Лабораторная установка для изучения процесса плавления частиц снега во взвешенном состоянии.

Состоит она из отопительного калорифера (1) и тепловой камеры (2). Горячий воздух температурой  $100-150^{\circ}$  из калорифера поступает в тепловую камеру. Сюда же с помощью гибкой нити подающего механизма помещается образец снега (3), внутри которого находится высокочувствительный термистор. Внутри тепловой камеры укреплено термосопротивление (4), с помощью которого регистрируется температура горячего воздуха. На ленту осциллографа одно-

временно записывается изменение температуры в центре образца и в тепловой камере.

Исследованию подвергались снежные образцы шарообразной формы диаметром 40—60 мм, плотностью 0,40—0,70 г/см<sup>3</sup>. В результате проведенных опытов определена скорость распространения тепловой энергии в снежных образцах в зависимости от их размера и плотности. По скорости с помощью уравнения теплообмена на поверхности образца (уравнение Ньютона, описывающее граничные условия третьего рода) определены величины теплоотдачи от образцов к среде (см. табл. 1). Данные табл. 1 статистически обработаны, и выявлена зависимость величины теплоотдачи от плотности снежных образцов и их размера. Зависимость описывается уравнением второго порядка:

$$\alpha = 43,39 - 1,23 d + 0,01046 d^2,$$

$$\alpha = 25,68 - 0,1 \delta + 0,00012 \delta^2,$$

где

$\alpha$  — коэффициент теплоотдачи, *к.кал/м<sup>2</sup> час. град.*

$d$  — диаметр образца, *м*;

$\delta$  — плотность образца, *кг/м<sup>3</sup>*.

Параллельно с этим была проведена серия аналогичных опытов по промораживанию снежных образцов в холодильной камере для подтверждения характера зависимости теплоотдачи от размера и плотности образцов. Порядок проведения опытов тот же, только вместо тепловой камеры образцы помещались в холодильную камеру, где температура воздуха поддерживалась постоянно в пределах минус 20°C с помощью электронного моста ЭМП-209М1. Характеристика исследуемых образцов и величина теплоотдачи приведены в табл. 2. Зависимость теплоотдачи от размера и плотности образцов выражается уравнениями:

$$\alpha = 127,41 - 4,405 d + 0,041 d^2,$$

$$\alpha = 5,44 - 0,00876 \delta + 0,0001369 \delta^2.$$

Из приведенных уравнений и таблиц по плавлению и промораживанию снежных образцов следует, что с уменьшением размера и увеличением плотности теплоотдача возрастает. Измельчение способствует лучшему соотношению обогреваемой поверхности к объему частиц, а увеличение плотности способствует росту теплопроводности.

Полученные в результате опытов данные по величине теплоотдачи снежных образцов при оплавлении использовались для определения критериев подобия Нуссельта ( $Nu$ ) и Фурье ( $F_0$ ). По параметрам теплоносителя и снежных образцов вычислены другие критерии, входящие в уравнение,

395	4	395	5,76	2,87	1,46	0,73	5,99	5,99	0,77	0,385	12,5	5,3
511,7	6	511,7	4,07	1,67	0,8	0,33	7,84	7,84	0,61	0,25	1,8	3,2
549	7	549	13,9	5,25	2,5	0,95	8,66	8,66	0,99	0,14	10,8	1,6
586	2	586	1,4	1,0	0,24	0,17	10,61	10,61	0,54	0,38	5,1	3,6
Диаметр образцов $d_1, \text{мм}$												
44,5	4	44,5	19	0,95	4,3	2,13	9,38	9,38	1,45	0,72	15,5	7,4
50	6	50	—	—	—	—	8,07	8,07	0,91	0,37	11,4	4,7
55,2	5	55,2	2,04	0,91	3,7	1,65	7,32	7,32	0,79	0,35	10,8	4,77

2440 ар.

Таблица 2  
Сводная ведомость осредненных данных о промораживании снежных образцов в холодильной камере

Плотность образцов, $\text{кг/м}^3$	Количество опытов $n$	Средняя плотность $M$	Среднеквдратичная ошибка $\pm a$	Ошибка средне-квдратич. $\pm m$	Вероятность наблюде-ния $\psi, \%$	Показатель точности опытов $P, \%$	Темлоотдача образцов $a, \text{ккал/м}^2 \cdot \text{час}^1$	Средняя темлоотдача $M$	Среднеквдр. ошибка $\pm a$	Ошибка среднеквдр. $\pm m$	Вероятность наблюде-ния $\psi, \%$	Показатель точности опытов $P, \%$
468,0	3	468,0	21,7	12,5	4,6	2,7	4,26	4,26	0,365	0,211	8,5	4,9
558,0	4	558,0	12,7	3,2	2,3	0,6	4,95	4,95	0,15	0,675	3,0	1,5
586,6	6	586,6	14,4	5,87	2,5	1,0	5,16	5,16	0,389	0,159	7,5	3,1
664,5	4	664,5	7,84	3,92	1,18	0,59	5,53	5,53	0,22	0,11	4,0	2,0
757,5	2	757,5	10,6	7,08	1,4	0,93	6,60	6,60	0,27	0,19	4,0	2,9
793,0	5	793,0	12,9	5,76	1,6	0,72	7,16	7,16	0,36	0,16	5,0	2,2
Диаметр образцов $d_1, \text{мм}$												
46,25	4	46,25	1,5	0,75	3,25	1,62	7,77	7,77	2,21	1,10	29,0	14,0
50,55	9	50,55	1,13	0,38	2,20	0,75	5,54	5,54	0,92	0,30	16,5	5,40
54,37	8	54,37	1,91	0,32	1,67	0,60	4,82	4,82	0,578	0,20	12,0	4,15

БМЛ  
ИЗДАНИЕ 1950

## Сводная ведомость осредненных данных по плавлению снежных образцов в воздушно-тепловом потоке

Таблица 1

Плотность образцов, кг/м <sup>3</sup>
Количество опытов $n$
Средняя плотность $M$
Среднеквадратич. ошибка $\pm \sigma$
Ошибка среднеквадратичной $\pm m$
Вероятность наблюдения $\nu$ , %
Показатель точности опытов $P$ , %
Теплоотдача образцов $a$ , ккал/м <sup>2</sup> ·час 1°
Средняя теплоотд. $M$
Среднеквадр. ошибка $\pm \sigma$
Ошибка среднеквадр. $\pm m$
Вероятность наблюдения $\nu$ , %
Показатель точности опытов $P$ , %

характеризующее процесс плавления. В результате проведенных расчетов определены коэффициенты  $\eta$  и  $n$ .

При этом подтвердилось предположение о подобии процессов плавления льда и снега. Критериальная зависимость, выведенная С. С. Кутателадзе для плавления льда, справедлива и для плавления снега в исследованных границах.

Коэффициент теплоотдачи при плавлении снежных образцов шарообразной формы в потоке горячего воздуха можно определить по следующей формуле:

$$N_{II} = 0,43 (P_u \cdot G_u)^{-1/4}.$$

Время плавления снежного образца в потоке горячего воздуха, температура которого  $100^\circ\text{C}$  и скорость не превышает  $10$  м/сек., определяется по следующей формуле:

$$\frac{F_0}{\Phi} \frac{\gamma'}{\gamma} = \eta_1 (P_u G_u)^{-1/4}.$$

Значение коэффициента  $\eta_1$  изменяется в зависимости от размера образца и его плотности (см. табл. 3).

Таблица 3

Диаметр образца в м	Значение коэффициента $\eta_1$ при плотности снега, г/см <sup>3</sup>		
	0,30	0,40	0,50
0,04	0,616	0,464	0,317
0,05	0,450	0,320	0,276
0,06	0,380	0,278	0,226

Наши исследования по плавлению образцов снега и исследования А. Г. Ткачева по плавлению шариков льда в горячей воде подтверждают идентичность процессов плавления льда и снега.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОМЕРЗАНИЯ УПЛОТНЕННОГО ПОКРЫТИЯ

Опыты по исследованию скорости промерзания уплотненных покрытий из обогретого снега ставились в лабораторных и полевых условиях. Цель опытов сводилась к отысканию зависимости скорости промерзания снежного уплотненного покрытия от его плотности и температуры воздуха. Влияние движения воздуха учитывалось постановкой опытов в холодильной камере.

Исследования проводились путем измерения температуры снежного покрытия непосредственно после его устройства на разных глубинах с помощью высокочувствительных датчиков температуры (термисторов). Время измерения температуры снежного покрытия колебалось в пределах от 10 мин. до 24 часов. Обследовались покрытия плотностью 0,40 до 0,70 г/см<sup>3</sup> с первоначальной влажностью снега около 10% при температуре воздуха минус 10 — минус 20°С.

Результаты опытов приведены в табл. 4. Установлена зависимость скорости промерзания покрытия от его плотности. Она выражается уравнением второго порядка:

$$\omega = 3,1 - 14,2 \delta + 19 \delta^2,$$

где

$\omega$  — скорость распространения температуры, град./см. час;

$\delta$  — плотность снежного покрытия, г/см<sup>3</sup>.

С увеличением плотности, при всех других одинаковых показателях, скорость промерзания увеличивается за счет увеличения теплопроводности снега.

Существенное влияние на скорость промерзания покрытия оказывала скорость движения окружающего воздуха. Чем сильнее ветер, тем быстрее промерзает покрытие.

Практически начинать эксплуатацию уплотненного покрытия из обогретого снега можно через 7—9 часов после устройства при температуре воздуха 15—20° мороза.

### ИСПЫТАНИЯ ОПЫТНЫХ ОБРАЗЦОВ СНЕГОУПЛОТНЯЮЩИХ МАШИН С ОБОГРЕВОМ СНЕГА

Испытания опытных образцов проводились в два этапа. В процессе заводских испытаний определялся режим работы тепловой камеры путем измерения скорости и температуры воздуха в разных точках и расхода горючего при различных давлениях перед форсункой.

В полевых условиях исследовано взаимодействие потоков воздуха и снега, определен коэффициент полезного действия тепловой установки и в процессе анализа результатов исследования предложены пути повышения его. Путем заложения опытных участков при различном количестве введения тепла установлены затраты горючего на 1 км дорожного покрытия в зависимости от физико-механических свойств снега.

Качество покрытий характеризовалось несущей способностью, плотностью и равномерностью распределения тепловой энергии по глубине и ширине покрытия.

В качестве тепловых камер на опытных образцах снегоуплотняющих машин использовались модернизированные



авиационные подогреватели типа МП-300 и камеры ВК-1 производительностью около 1 млн. больших калорий в час.

Скорость воздуха на выходе из коллектора замерялась с помощью пневмометрических трубок и V-образных манометров. Результаты обработаны по формуле:

$$W = \sqrt{\frac{\Delta P \cdot 2g}{\gamma}},$$

где

$\Delta P$  — показание дифференциального V-образного манометра в мм в.ст.;

$\gamma$  — удельный вес воздуха, кг/м<sup>3</sup>;

$g$  — ускорение, равное 9,8 м/сек<sup>2</sup>;

$w$  — скорость потока воздуха, м/сек.

На оптимальном режиме работы камер скорость потока горячего воздуха на выходе из коллектора составляла 40—50 м/сек. Температура потока горячего воздуха регулировалась давлением топлива перед форсункой рабочего режима в пределах от 400 до 950°C. Расход горючего при этом составлял 80—110 кг в час.

Производственные испытания опытных образцов снегоуплотняющих машин с обогревом снега и без обогрева проводились зимой 1962—63 гг. в Плесецком леспромхозе Архангельской области. Испытывались опытные образцы конструкции СевНИИП и Горьковского политехнического института с обогревом снега и образец ЦНИИМЭ — без обогрева снега перед уплотнением. Исследование взаимодействия потоков воздуха и снега проводилось на целинном и ранее уплотненном снеге при различных скоростях вращения и надвигания фрезы, а также при различных заглублениях ее. Опытные данные показали, что первоначальная плотность снега и заглубление фрезы не оказывают влияния на степень измельчения. Существенное влияние оказывает поступательная скорость фрезы и скорость вращения. При обработке снега плотностью 0,40 г/см<sup>3</sup> и выше при скорости надвигания фрезы 0,5—0,6 м/сек. (оптимальный режим уплотнения снега) и вращения ее со скоростью 300—400 об/мин. (диаметр фрезы 700—800 мм) образуется 60—70% фракций размером 7—10 мм. Такие параметры фрезерования обеспечивают начальную скорость потока снега в 10—15 м/сек.

Сравнивая расчетные величины сил потоков снега и воздуха, приходим к выводу, что наилучшее их взаимодействие происходит при незначительном превышении силы потока горячего воздуха над потоком снега. В этом случае частицы снега встречаются с горячим воздухом у коллектора и приземляются под действием силы тяжести и действия потока воздуха в конце действия его. При значительном превышении силы потока горячего воздуха над потоком снега части-

цы не в состоянии пересекать струю и приземляются в начале ее действия, пройдя самый короткий путь в зоне обогрева.

Поэтому целесообразно за счет расширения тепловой камеры (выходного коллектора) понизить скорость горячего воздуха в зоне взаимодействия со снегом до 15—20 м/сек., а параметры фрезерования оставить прежними.

Коэффициент полезного действия тепловой установки определялся путем установления общего количества расхода тепла и полезно затраченного на устройство уплотненного покрытия. Общий расход тепловой энергии установлен путем измерения расхода горючего на единицу площади покрытия. Полезно затраченное количество тепла определялось двумя способами: калориметрическим и термическим. Сущность калориметрического способа заключается в определении разности влажности снега до обогрева и после обогрева его. Зная удельную теплоту плавления снега и количество образовавшейся влаги, определяют расход тепловой энергии непосредственно на плавление снега. При этом учитывают затраты тепла на подогрев снега до температуры плавления.

Термический способ определения полезно затрачиваемого тепла основан на определении разности температуры снега до обогрева и после него. При наличии разности температуры по теплоемкости и массе снега определяют затрату тепловой энергии. Температура снега замерялась с помощью высокочувствительных термисторов с записью на осциллограф в течение 30—40 минут после ввода тепла.

Для полевых условий более простым и удобным является термический метод определения полезно затраченного тепла. Величина к. п. д. тепловых установок опытных образцов составляла 30—56%.

В результате проведения опытов по определению полезно затраченного тепла калориметрическим методом установлено количество снега, которое нужно расплавлять, чтобы получить снежноуплотненное покрытие под тяжелые автопоезда. Из фрезеруемой массы необходимо расплавить около 5% снега. В зависимости от физико-механических свойств снега на устройство 1 км покрытия толщиной в 18—20 см и шириной 2,8 м необходимо затратить 1,43—1,48 млн. ккал. В переводе на дизельное топливо это составит около 200 кг на 1 км. Плотность покрытия достигает 0,58—0,65 г/см<sup>3</sup> и твердость превышает 25—30 кг/см<sup>2</sup>.

Плотность снежноуплотненных покрытий определялась выпиливанием кубиков, которые тщательно обмерялись и взвешивались с точностью до 1 г. Твердость покрытий определялась зондом — ударником типа иглы Проктора. Характеристика покрытий из обогретого снега приведена в табл. 5.

Таблица 5

Характеристика покрытий из уплотненного снега с обогревом

Дата	Опытный образец конструкции	Целинный снег		Расход на 1 м <sup>2</sup> дизтоплива в граммах	Характеристика уплотненного покрытия			
		плотность, г/см <sup>3</sup>	толщина, см		толщина, см	плотность, г/см <sup>3</sup>	верх	низ
1.III-63 г.	ГПИ	0,23	65	60—70	35	0,507	0,397	13—17
9.III-63 г.	«	0,23	68	60—70	29	0,527	—	8—10
11.III-63 г.	«	0,215	72	50—60	29	0,539	—	15—28
19.III-63 г.	«	0,23	68	40—50	35	0,520	0,495	24—30
25.II-63 г.	СевНИИП	0,215	72	70—80	32	0,55	0,52	28—32
7.III-63 г.	«	0,23	72	70—80	30	0,655	0,55	70—80

Сравнительные испытания снегоуплотняющих машин с обогревом снега и без обогрева зимой 1962—63 гг., а также результаты последующих испытаний позволили установить границы применения этих машин.

Опытные данные показывают, что в слое целинного снега толщиной 40—50 см и выше, пролежавшего значительное время, создаются условия, благоприятные для образования достаточного количества связующей среды, чтобы обеспечить надежное схватывание кристаллов между собой после перемешивания и уплотнения их.

Для устройства покрытий из целинного снега плотностью до  $0,40 \text{ г/см}^3$  и толщиной 50—60 см и выше может использоваться снегоуплотняющая машина без обогрева.

Устройство покрытий из целинного снега плотностью свыше  $0,40 \text{ г/см}^3$ , наращивание его тонкими слоями из сухого снега, а также выправление ранее эксплуатируемых покрытий целесообразно производить снегоуплотняющими машинами с обогревом снега путем фрезерования его, взвешивания в тепловом потоке для образования связующей среды и последующего виброуплотнения.

По результатам испытаний зимой 1965 года государственная комиссия рекомендовала изготовление промышленной партии снегоуплотняющих машин с обогревом снега типа СевНИИП.

## ВЫВОДЫ

В данной работе снег рассматривался как квазиоднородное тело. В этом случае задача нахождения температурного поля упрощается и сводится к решению одного уравнения теплопроводности, осложненного действием внутренних источников и наличием переменных тепловых характеристик. Правильность такого подхода подтвердилась опытами.

Результаты исследований дают возможность установить необходимый режим обогрева снега при устройстве покрытий для тяжелых автопоездов.

Кроме того, результаты исследований помогут решить ряд вопросов при конструировании новых тепловых установок к снегоуплотняющим машинам.

Теоретические и экспериментальные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. На скорость плавления частиц снега в потоке горячего воздуха самое существенное влияние оказывает коэффициент теплоотдачи этих частиц. Величина коэффициента теплоотдачи зависит в основном от плотности и размера частиц.

Для снежных частиц шарообразной формы диаметром 45—55 мм и плотностью 0,40—0,60 г/см<sup>3</sup> коэффициент теплоотдачи получился равным 5—10 ккал/м<sup>2</sup>.час. град. При этом установлено, что с увеличением плотности и уменьшением размера частиц теплоотдача возрастает.

2. Критериальная зависимость процесса плавления частиц льда в воде справедлива для плавления частиц снега в потоке горячего воздуха при соответствующих условиях движения среды. Экспериментальные исследования позволили довести эту зависимость до удобных для практического применения формул, с помощью которых можно определить величину теплоотдачи снежных частиц.

$$N_u = 0,43 (P_u G_u)^{1/4},$$

и время плавления частиц в потоке горячего воздуха

$$\frac{F_0}{\Phi \frac{\gamma'}{\gamma}} = \eta (P_u \cdot G_u)^{-1/4}.$$

Значение  $\eta$  колеблется в пределах 0,6—0,7 в зависимости от размера и плотности частиц.

3. Сила потока горячего воздуха должна превышать силу потока снега настолько, чтобы при взаимодействии частицы снега могли пересекать струю воздуха по наклонной к горизонту и призмляющей в конце действия потока. Угол наклона вектора призмляющей частицы зависит от ее размера и начальной скорости полета (до встречи с потоком), а также от аэродинамического давления в струе потока. Эта зависимость выражается следующим уравнением:

$$\operatorname{ctg} x = \left( \frac{P \pi R^2}{m} + g \right) \frac{l}{v^2 \cdot \cos^2 \varphi} - \operatorname{tg} \varphi.$$

4. Скорость промерзания обогретого уплотненного снежного покрытия зависит от плотности и влажности его, а также от температуры и скорости движения воздуха. Исследовались покрытия из снега плотностью от 0,40 до 0,60 г/см<sup>3</sup> в полевых условиях при наличии движения воздуха и в лабораторных условиях— без движения воздуха. Влажность исследуемых покрытий колебалась в пределах 8—10%. Скорость промерзания обогретого и уплотненного снежного покрытия можно определять по уравнению

$$\omega = 3,1 - 14,2 \delta + 19 \delta^2.$$

5. Опытами по устройству покрытий из снега машинами, работающими с обогревом снега и без обогрева, установлено, что применение обогрева целесообразно при устройстве покрытий из целинного снега плотностью свыше 0,40 г/см<sup>3</sup>,

при выправлении ранее эксплуатированных снежных дорог, а также при послойном наращивании покрытий из сухого снега. При этих опытах обследованию подвергался снежный покров для выяснения возможности устройства покрытий нужной прочности без ввода тепла. Оказалось, что такие возможности имеются в целинном снеге толщиной свыше 40—50 см, подвергавшемся в течение некоторого времени процессам перекристаллизации. Резкое охлаждение такого снега перемешиванием способствует дополнительному образованию жидких пленок. В результате обработки опытных данных по изучению свойств снежного покрова получена зависимость влажности от температуры:

$$\omega = 14,11 - 1,715 t, \%$$

6. Коэффициент полезного действия тепловой установки снегоуплотняющей машины можно довести до 75—80% при устройстве покрытий взвешиванием снега фрезой в воздушно-тепловом потоке путем реконструкции существующих тепловых установок: а) снижения скорости потока горячего воздуха в зоне взаимодействия со снегом до 20 м/сек. за счет уширения пасажки выходного коллектора до 50—60 см (в испытываемых образцах ширина насадки равна 20—25 см и скорость потока составляет 40—50 м/сек.);

б) снижения разности температур горячего воздуха и окружающей среды за счет понижения температуры горячих газов на выходе до 400—600°C против 800—1000°C.

Параметры фрезерования снега остаются прежними, так как они обусловлены резанием и параметрами виброуплотнения снега.

7. Расход тепловой энергии на устройство 1 кв. м покрытия толщиной 18—20 см составляет 500—600 больших калорий. В переводе на дизельное топливо расход составит около 200 кг/км при к.п.д. установки 75%. При таких условиях обогрева плавится около 5% взвешиваемой массы снега, и покрытие получается прочностью свыше 30 кг/см<sup>2</sup> и плотностью 0,60—0,65 г/см<sup>3</sup>.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

Плакса Л. Н., О расчете теплового воздействия на снежное покрытие. Труды ЦНИИМЭ, № 44, 1963.

2. Плакса Л. Н., О выборе параметров тепловой установки снегоуплотняющей машины. Труды ЦНИИМЭ, № 50, 1964.

3. Плакса Л. Н., Методы определения и пути повышения к.п.д. тепловых установок снегоуплотняющих машин. Труды ЦНИИМЭ, № 59, 1965.

4. Плакса Л. Н., Снегоуплотняющая машина СУМ-2 Журн. «Техника в сельском хозяйстве», № 3, 1965.

---

Бумага 60×92	Подписано к печати 9/IX—66 г.	Л-88070
Тираж 150	Печ. л. 1,75	Зак. 173
	Бесплатно	

---

Типография ЦНИИМЭ