

Министерство образования и науки РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ)»
Кафедра «Проектирование дорог»

О.В. Якименко, В.В. Сиротюк

**УСИЛЕНИЕ ЛЕДОВЫХ ПЕРЕПРАВ
ГЕОСИНТЕТИЧЕСКИМИ
МАТЕРИАЛАМИ**



Монография

Омск ■ 2015

← НАЗАД

ВПЕРЁД →

УДК 625.711:630*383.2

ББК 39.311.6

Я45

Рецензенты:

д-р техн. наук, проф. А.В. Смирнов (СибАДИ);
директор ООО «Проектный институт Омскдорпроект»,
канд. техн. наук, доц. А.В. Грико

Работа утверждена редакционно-издательским советом СибАДИ в качестве монографии.

Якименко, О.В.

Я45 Усиление ледовых переправ геосинтетическими материалами : монография / О.В. Якименко, В.В. Сиротюк. – Омск : СибАДИ, 2015. – Режим доступа: <http://bek.sibadi.org/fulltext/ESD56.pdf>, свободный после авторизации. – Загл. с экрана.

ISBN 978-5-93204-777-4

Рассматриваются вопросы проектирования и строительства ледовых автозимников – переправ. Представлены свойства некоторых геосинтетических материалов, традиционно используемых для армирования дорожных конструкций. Приведены результаты теоретических исследований напряжённого состояния и расчёт несущей способности армированного ледового покрытия; экспериментальных исследований геосинтетических материалов и армированного льда. Содержатся результаты строительства и испытаний ледового покрова, армированного разными геосинтетическими материалами по различным конструктивно-технологическим решениям.

Может быть полезной для научных работников, магистрантов, аспирантов, специалистов дорожной области, занимающихся проектированием и строительством ледовых переправ и аэродромов.

Текстовое (символьное) издание (28,0 МБ)

Системные требования : Intel, 3,4 GHz ; 150 МБ ; Windows XP/Vista/7 ; DVD-ROM ;

1 ГБ свободного места на жестком диске ; программа для чтения pdf-файлов Adobe Acrobat Reader ; Internet Explorer

Редактор Т.И. Калинина

Техническая подготовка – Т.И. Кукина

Издание первое

Дата подписания к использованию 03.08.2015

Издательско-полиграфический центр СибАДИ. 644080, г. Омск, пр. Мира, 5
РИО ИПЦ СибАДИ. 644080, г. Омск, ул. 2-я Поселковая, 1

← НАЗАД

© ФГБОУ ВПО «СибАДИ», 2015

ВПЕРЁД →

ВВЕДЕНИЕ

Значительная часть территории нашей страны расположена в северных районах, лишённых развитой дорожной сети. В зимний период для доставки грузов, пассажиров и техники в этих районах широко используются автозимники и ледовые переправы. Так, например, по данным МЧС ежегодно в России официально действует от 400 до 500 ледовых переправ. Только на территории Ямало-Ненецкого автономного округа зимой вводится в эксплуатацию более 60 ледовых переправ общей протяжённостью более 110 км. В большинстве случаев эти временные дороги являются единственно возможным способом пересечения многочисленных рек, озёр и болот. По данным Комитета Совета Федерации по делам Севера и малочисленных народов 65 % населённых пунктов в ХМАО, 56 % – в Якутии и 81 % населённых пунктов в Чукотском АО не имеют круглогодичного выхода на дороги с твёрдым покрытием [1]. При этом длина переправ колеблется от сотен метров до сотен километров (оз. Байкал, р. Енисей и т.п.).

Отличительной особенностью ледовых переправ и автозимников является сравнительно малая интенсивность и скорость движения транспортных средств, но значительная грузоподъёмность большинства автомобилей, осуществляющих грузоперевозки по этим временным дорогам. Для безопасного пропуска большегрузных транспортных средств (общей массой 30÷40 т и более) требуется толстый прочный ледовый покров (70÷90 см и более) с минимумом трещин.

В настоящее время ледовые автозимники усиливают намораживанием дополнительных слоёв льда сверху. Иногда вмораживают в верхнюю часть ледового покрова деревянные брусья (примерный расход древесины – 1,5 м³/пог. м для одной полосы движения). Этот способ усиления очень трудоёмок, дорог и в основном помогает при ослаблении ледового покрытия сквозными трещинами.

Армирование строительных конструкций является общепризнанным способом увеличения их несущей способности. За историю строительства ледовых автозимников для их армирования использовали всевозможные материалы: рисовую солому, ветки, стекловолокно, целлюлозу, пластмассовые прутья, стальные тросы, пульпу из газетной бумаги, листы пергамента и т.п. Во многих публикациях, посвящённых армированию льда, отмечается положительный эффект.

Нормативно-методическая база по рассматриваемому вопросу крайне ограничена. В некоторых документах указывают, что одним из

способов увеличения грузоподъёмности ледовых переправ является армирование ледового покрова, но отсутствуют рекомендации по выбору армирующих материалов, методов расчёта и технологии производства работ.

Анализ результатов отечественных и зарубежных исследований свидетельствует, что за последние годы большое распространение в дорожном строительстве получили различные геосинтетические материалы (ГМ). Армирование дорожных конструкций ГМ позволяет повысить их сопротивление растягивающим напряжениям от силовых и температурных воздействий, уменьшить трещинообразование и увеличить срок службы автомобильных дорог. Эти исследования и сорокалетняя практика применения ГМ касаются усиления слабых грунтовых оснований, земляного полотна, дискретных оснований и асфальтобетонных покрытий.

В российских и зарубежных публикациях имеются лишь отрывочные сведения о результатах экспериментального применения ГМ при строительстве ледовых автозимников.

До настоящего времени нет единого мнения в вопросах конструирования и расчёта армированных ледовых автозимников, в выборе эффективных геосинтетических материалов, требованиях к прочности, долговечности и деформативности этих материалов. Далеко не всё ясно в вопросах технологии строительства конструкций, армированных ГМ.

Таким образом, актуальность данной монографии заключается в развитии научных положений и практических рекомендаций по усилению ледового покрова автозимников геосинтетическими материалами.

Значительную помощь в написании второй главы оказал д-р техн. наук, проф. С.А. Матвеев. Экспериментальные исследования в лаборатории и при опытно-производственном строительстве выполнялись при помощи сотрудников кафедры «Проектирование дорог» (Е. Крашенинин, Г. Левашов, Е. Иванов, А. Захаренко), Омского танкового института (А. Щербо) и студентов факультета АДМ.

Оформление работы выполнено с помощью Р.Г. Сиротюк.

Авторы выражают благодарность всем вышеперечисленным коллегам, без участия которых написание данной монографии было невозможно.

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1. Классификация зимних автомобильных дорог

К зимним автомобильным дорогам – *автозимникам* – относятся сезонные дороги с полотном и дорожной одеждой из снега, льда и мёрзлого грунта.

Автозимники классифицируются [2, 3]:

а) *по продолжительности эксплуатации*:

– регулярные, возобновляемые каждую зиму в течение ряда лет по одной и той же трассе;

– временные, используемые в течение одного или двух зимних сезонов;

– разового пользования, служащие для разового пропуска колонн автомобилей;

б) *расположению на местности*:

– сухопутные, прокладываемые по суше;

– ледовые, прокладываемые по льду рек, озёр и морей;

– ледовые переправы через водотоки на сухопутных автозимниках и автомобильных дорогах постоянного действия;

в) *продолжительности использования сезона*:

– обычные, предназначенные для эксплуатации только в период с устойчивыми отрицательными температурами воздуха;

– автозимники с продлёнными сроками эксплуатации, обеспечивающие проезд в течение зимнего и части летнего периодов года.

Регулярные и временные автозимники в зависимости от расчётной годовой грузонапряжённости или расчётной интенсивности движения делятся на *три категории*:

I – с перспективной (на 3÷5 лет) грузонапряжённостью свыше 100 тыс.т нетто в год или с расчётной интенсивностью движения, приведённой к автомобилю грузоподъёмностью 5 т, свыше 500 авт./сут;

II – с перспективной грузонапряжённостью от 50 до 100 тыс.т нетто в год или с расчётной интенсивностью движения от 150 до 500 авт./сут;

III – с перспективной грузонапряжённостью до 50 тыс.т нетто в год или с расчётной интенсивностью движения до 150 авт./сут.

Автозимники проектируют с учётом типов транспортных средств и организации перевозок во времени по мере изменения несущей способности полотна автозимника.

В данной монографии рассматриваются только ледовые автозимники и переправы.

Деление временных зимних дорог на ледовые переправы и ледовые автозимники условно. Тем не менее можно дать следующее определение этим разновидностям зимних временных дорог:

– **ледовый автозимник** – это временная зимняя автомобильная дорога значительной протяжённости (километры), проложенная по ледовому покрову рек, озёр или морей;

– **ледовая переправа** – это разновидность ледового автозимника относительно малой протяжённости (десятки или сотни метров), проложенного между берегами реки, залива или пролива вместо моста или паромной переправы и являющегося частью сухопутного автозимника или постоянной автомобильной дороги.

Ледовые переправы классифицируют [2]:

– **по продолжительности эксплуатации** – регулярные (возобновляемые на одной и той же трассе каждую зиму в течение ряда лет), временные (возводимые на одну зиму), разовые (возводимые для одного пропуска колонны автомобилей или другого агрегата);

– **расчётной интенсивности движения** – переправы I категории с интенсивностью движения свыше 150 авт./сут (приведённых к автомобилю грузоподъёмностью 5 т) и переправы II категории с интенсивностью движения 150 авт./сут и менее;

– **типу водоёма** – переправы речные, озёрные, по водохранилищам и морские;

– **солёности водоёма** – переправы через пресные, солёные или водоёмы промежуточной солёности;

– **характеру ледового покрова**, используемого для движения транспортных средств: естественный покров (с очисткой и без очистки его от снега); покров, утолщаемый намораживанием сверху; покров, утолщаемый намораживанием снизу; покров, утолщаемый одновременно с обеих сторон;

– **крутизне берегов водоёма**;

– **длительности зимнего периода** с устойчивыми отрицательными температурами;

– **наличию усиления или армирования** ледового покрова и его характеру и конструкции.

И.С. Песчанский [4] делит ледовые переправы на три основных типа:

- ледовые переправы без усиления;
- ледовые переправы с усилением;
- железнодорожные переправы на льду.

В ледовых переправах первого типа движение осуществляется непосредственно по естественной поверхности льда. Этот тип переправ требует минимальных затрат, так как не связан с какими-либо строительными работами, за исключением съездов с берега на лёд и обратно. Подготовка трассы заключается в заблаговременной расчистке поверхности льда вдоль намеченного пути от снега для ускорения нарастания льда.

1.2. Конструкции, методы проектирования и строительства ледовых переправ и автозимников

Конструкции и методы строительства ледовых переправ и автозимников складывались столетиями, по мере жизненной необходимости в освоении северных территорий и увеличения грузоподъёмности транспортных средств.

В простейшем случае применяли «пассивные» методы. На базе многолетних наблюдений выделялся участок реки (озера) с наиболее устойчивым ледяным покровом и относительно пологими берегами. Этот участок обозначали вехами, периодически проверяли толщину льда, иногда расчищали от снега, заливали возникающие трещины.

Постепенно, по мере необходимости увеличения несущей способности и безопасности ледовых переправ, для более раннего начала эксплуатации сухопутного автозимника, на них стали выполнять специальные работы по усилению ледового покрова, перешли к «активным методам» строительства.

В большинстве случаев усиление осуществляют послойным намораживанием льда (рис. 1.1) или устройством деревянных настилов и дереволедяных элементов (ледовые переправы с верхним строением) [5 – 11].

Изданная в 1970 г. Инструкция по устройству переправ [12] предлагает усиливать ледовый покров* дощатыми щитами, которые укладывают на лёд с последующим вмораживанием в него (рис. 1.2 и 1.3).

* Термин «ледовый покров» в работе приведен в авторской редакции.

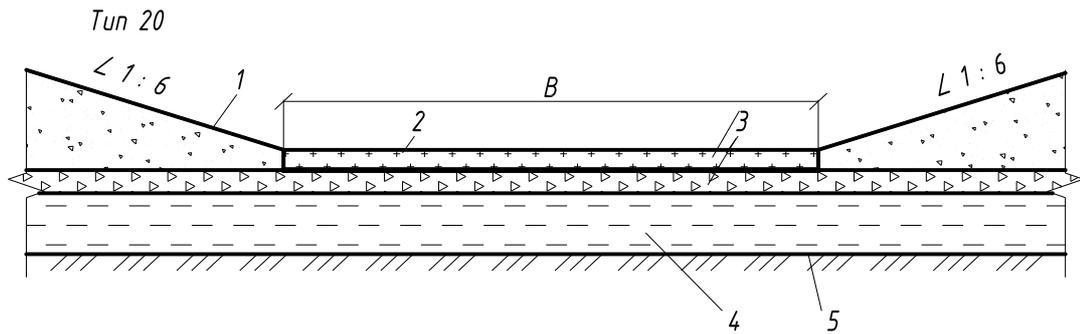


Рис. 1.1. Поперечный профиль автозимника на ледовом покрове рек и озёр (морей): 1 – снежный покров; 2 – уплотнённый слой снега толщиной 3÷5 см на полотне; 3 – ледовый покров; 4 – вода; 5 – дно водоёма

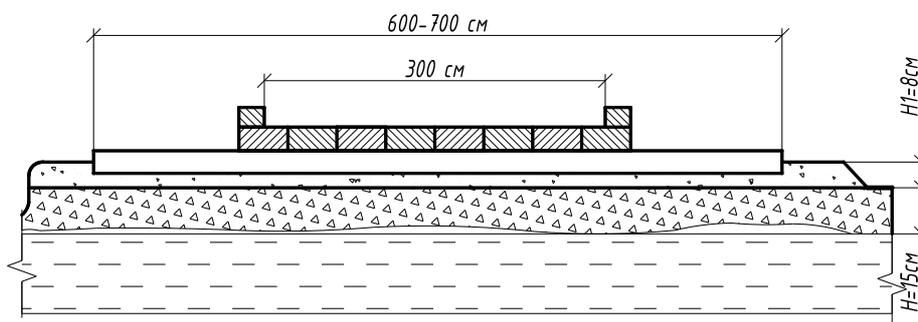


Рис. 1.2. Усиление льда верхним строением из досок

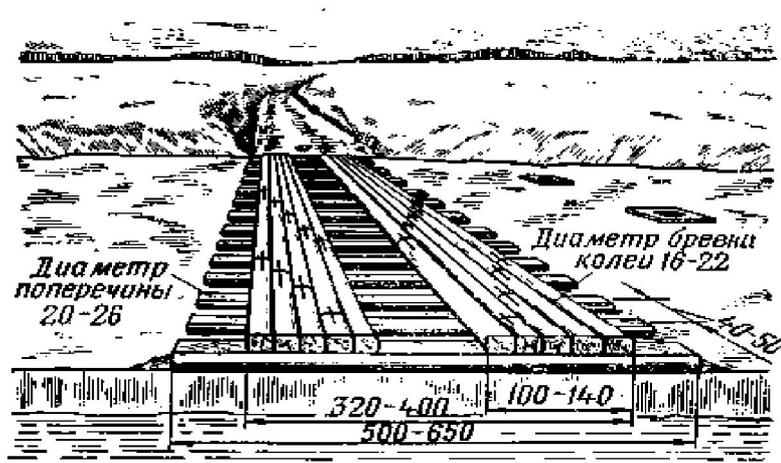


Рис. 1.3. Усиление льда верхним строением из брёвен

В этой Инструкции было сказано, что усиление льда щитами и брёвнами при толщине льда до 20 см даёт увеличение несущей способности до 50÷70 %, при толщине льда около 40 см – только до 10 %, а при большей толщине льда этот вид усиления ледового покрова не эффективен.

При возведении верхнего строения на переправе необходимо иметь в виду следующие соображения, проверенные многолетней практикой:

- верхнее строение увеличивает несущую способность льда толщиной меньше 0,5 м;
- наибольший эффект от применения верхнего строения достигается при толщинах льда от 0,05 до 0,15 м;
- при толщине льда больше 0,4 м верхнее строение обычного типа (нежесткие рамы) практически не увеличивает несущую способность ледового покрова, а только способствует сохранению верхнего слоя льда от износа;
- длина поперечин больше 5 м при обычных сечениях практически не даёт эффекта и является излишней;
- для повышения несущей способности следует прибегать к повышению жёсткости конструкции путём применения ферм;
- конструкции (особенно из круглого леса), не связанные штырями в одну систему, не обеспечивают надлежащей жёсткости;
- не следует применять конструкцию с поперечниками, уложенными вразбежку, концы которой заканчиваются на оси; в конструкциях вес груза следует относить дальше от оси пути;
- необходимо стремиться к совместной работе конструкции верхнего строения и ледового покрова. Для этого нужно прибегать к их смораживанию в одну сплошную плиту.

В действующих нормативно-методических документах [2, 3] способ усиления ледовой переправы рекомендуется выбирать в каждом конкретном случае в зависимости от климатических условий периода строительства, толщины и состояния ледового покрова, режима реки, наличия материалов и механизмов, сроков ввода автозимника в эксплуатацию, интенсивности и вида нагрузок в соответствии с поперечными профилями, приведёнными на рис. 1.4 – 1.7.

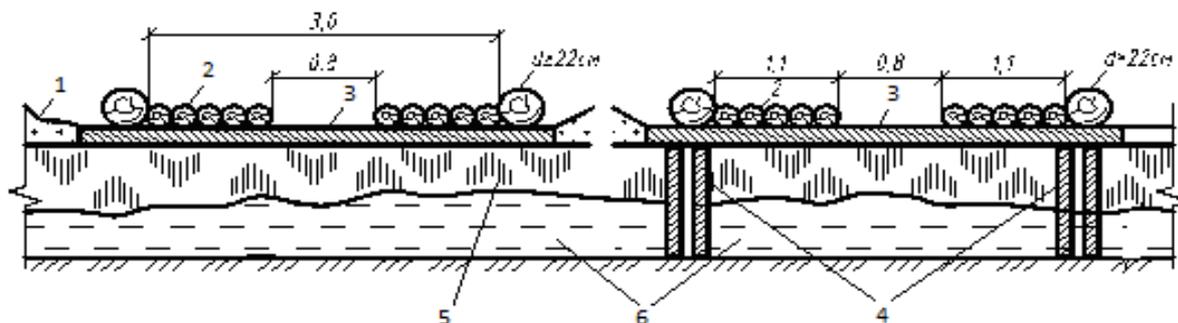


Рис. 1.4. Усиление ледовых переправ деревянным настилом: 1 – снежный покров; 2 – колесопроводы; 3 – поперечины; 4 – стойки; 5 – естественный ледовый покров; 6 – вода

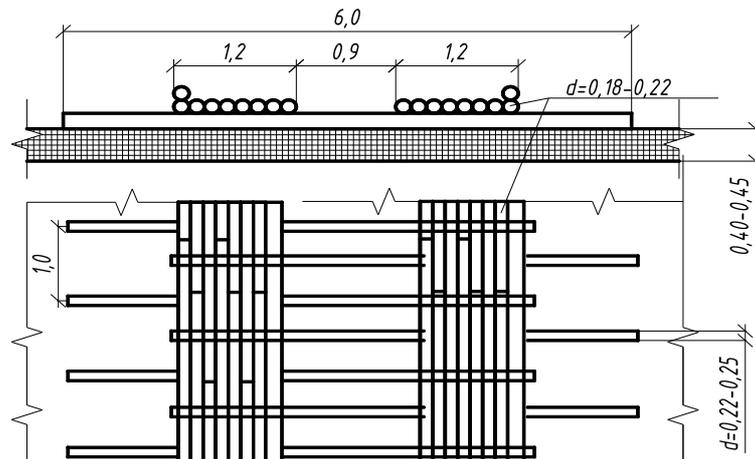


Рис. 1.5. Усиление ледового покрова деревянным
колейным настилом

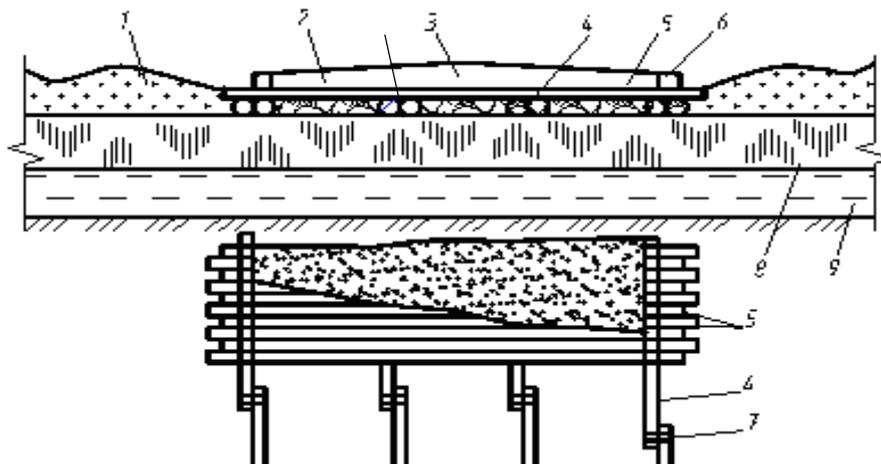


Рис. 1.6. Конструкция «плавающей» древоледовой пере-
правы: 1 – снег; 2 – замороженный лёд; 3 – снежно-ледовое
полотно; 4 – продольные лежни; 5 – сланевый настил; 6 –
колесоотбой; 7 – проволочная скрутка; 8 – естественный
ледовый покров; 9 – вода

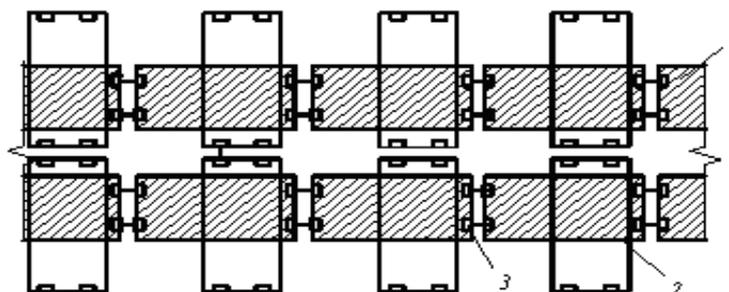


Рис. 1.7. Усиление ледовой переправы клеёфа-
нерным покрытием: 1 – плита основного пути;
2 – поперечно-уложенные плиты;
3 – монтажные стыки

Следует обратить внимание, что древесину, использованную для усиления ледовых переправ, необходимо всегда извлекать из льда перед ледоходом, чтобы не допустить загрязнения водоёма.

Усиление ледовых переправ с использованием древесины требует значительного расхода ценных материалов (лес, металл), связано с большой трудоёмкостью при строительстве и извлечении древесины из льда и характеризуется относительно малым повышением несущей способности естественного льда. Поэтому считается, что усиление ледовых переправ с использованием древесины следует максимально ограничивать, ориентируясь на широкое применение способа намораживания льда, как наиболее технически и экономически целесообразного и экологически «чистого» (рис. 1.8, 1.9).

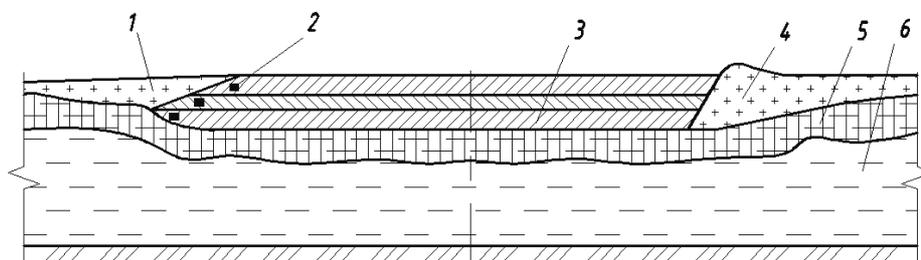


Рис. 1.8. Усиление ледового покрова методом послойного намораживания льда: 1 – притрамбованный снег; 2 – жерди; 3 – намораживаемые слои; 4 – валик из снега; 5 – естественный ледовый покров; 6 – вода

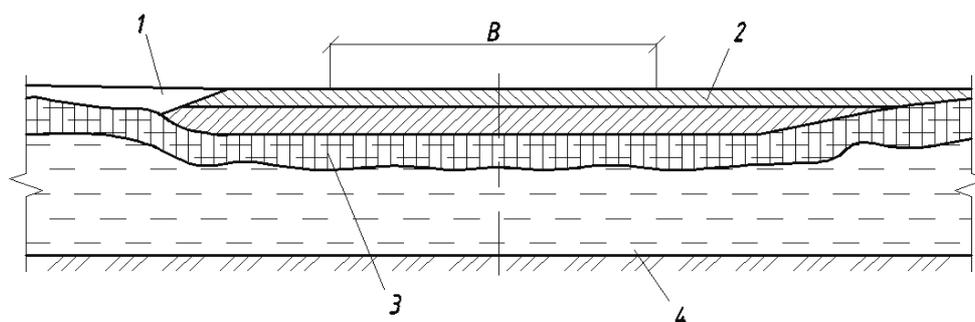


Рис. 1.9. Поперечный профиль ледовой переправы, усиленной дождеванием: В – проезжая часть; 1 – снежный покров; 2 – намораживаемый слой льда; 3 – естественный ледовый покров; 4 – вода

Усиление ледовых переправ послойным намораживанием льда рекомендуется на реках с медленным течением воды, при достаточно большой толщине естественного ледового покрова и при устойчивых отрицательных температурах воздуха (ниже минус 10 °С) в период строительства.

Несущая способность ледовых автозимников непостоянна во времени и определяется толщиной и температурой естественного ледового покрова, которая

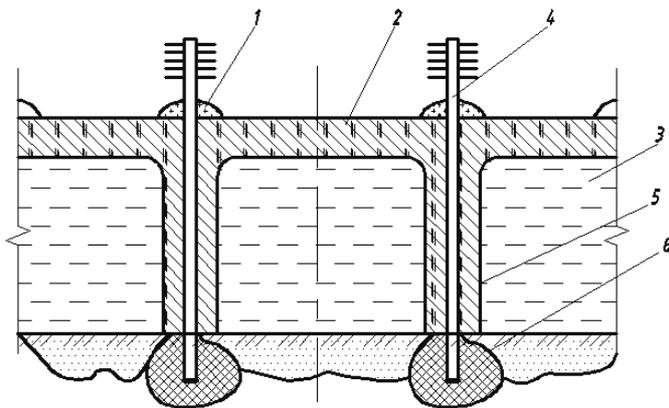


Рис. 1.10. Конструкция переправы с усилением замороженными стойками:
1 – снеговой покров; 2 – ледовый покров; 3 – вода; 4 – термосифон;
5 – ледяная стойка; 6 – промороженное основание

изменяется в течение зимнего периода. Обычно для пропуска автотранспорта общей массой 25÷30 т необходима толщина ледового покрова не менее 50÷70 см. Усиление ледового покрова на автозимниках предусматривают, как правило, на отдельных участках небольшой протяжённости из-за наличия проталин, торогов, многослойного тонкого льда, широких сквозных трещин.

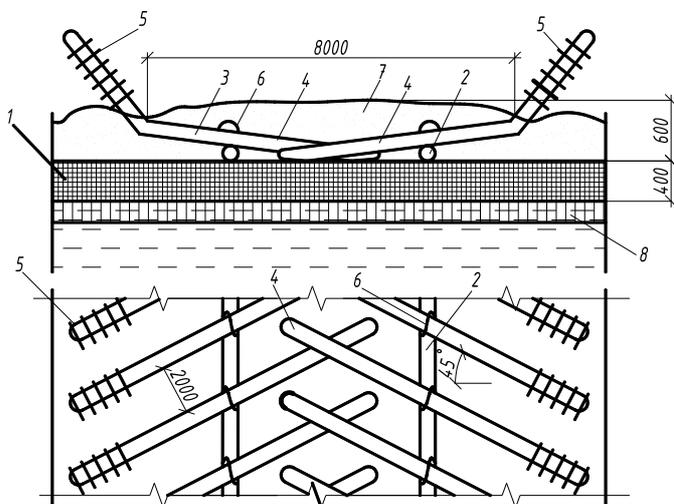


Рис. 1.11. Ледовая переправа с теплоотводящими элементами: 1 – естественный лёд; 2 – продольные лежни; 3 – наклонные термосифоны; 4 – испарители термосифонов; 5 – конденсаторы термосифонов; 6 – металлические скобы; 7 – лёд, замороженный сверху; 8 – то же, снизу

В литературе можно встретить разные способы интенсификации промораживания льда, например в виде конструкции, представленной на рис. 1.10 [13]. Эта конструкция включает естественный ледовый покров и опорные ледяные стойки, которые намораживают с помощью двухфазных термосифонов [14]. Расстояние между рядами и стойками в ряду от 5 до 7 м. Испарители термосифонов погружают в воду через пробуренные во льду лунки и частично заглубляют в донный грунт.

Намораживание ледового покрова снизу предлагается с помощью наклонных термосифонов

(рис. 1.11), состоящих из гладкой трубы и ребристого конденсатора, внутри которых циркулирует фреон [4]. Возможно также применение керосиновых свай либо термосифонов, внутри которых циркулирует керосин.

Применение этих устройств допускается только при условии обеспечения их герметичности и после согласования с территориальными органами рыбоохраны.

Практика показала, что *намораживание льда сверху любыми способами целесообразно производить на величину не более 0,3 толщины основного льда*, чтобы не нарушить тепловое равновесие между температурой воды и воздуха.

За последние годы запатентованы десятки предложений по увеличению несущей способности ледовых переправ. В 1999 г. было предложено увеличивать несущую способность ледовых переправ при помощи специальной компрессорной установки, которая нагнетает холодный воздух под лёд, ускоряя процесс намораживания льда снизу (рис. 1.12) [15].

Известен ряд изобретений, направленных на увеличение несущей способности ледовой переправы за счёт установки подо льдом демпферов различной конструкции, гасящих колебания льда [16 – 18].

Для создания ледовой переправы на акваториях без подлёдного течения было создано изобретение, суть которого заключается в намораживании ледяных опор, заключённых в замкнутые объёмы (рис. 1.13) [19].

Для этого во льду вдоль и поперек оси переправы сверлят ряды сквозных отверстий на равном расстоянии друг от друга. В отверстия вертикально опускают трубы с заваренным нижним торцом, который упирают в дно бассейна. Верхний торец трубы оставляют выше ледового покрова. Трубы в рядах устанавливают друг от друга на расстоянии, достаточном для смерзания между собой слоёв льда, намерзаю-

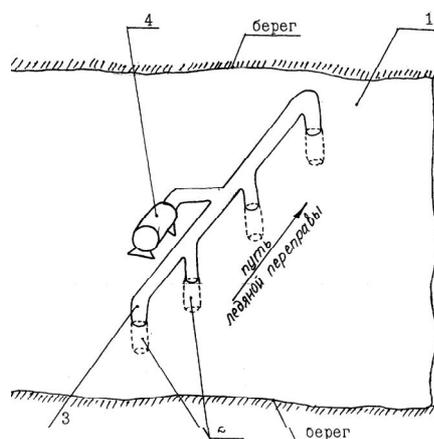


Рис. 1.12 Способ ускорения намораживания льда: 1 – естественный ледовый покров; 2 – подлёдная часть компрессорной установки; 3 – компрессорная установка; 4 – насос

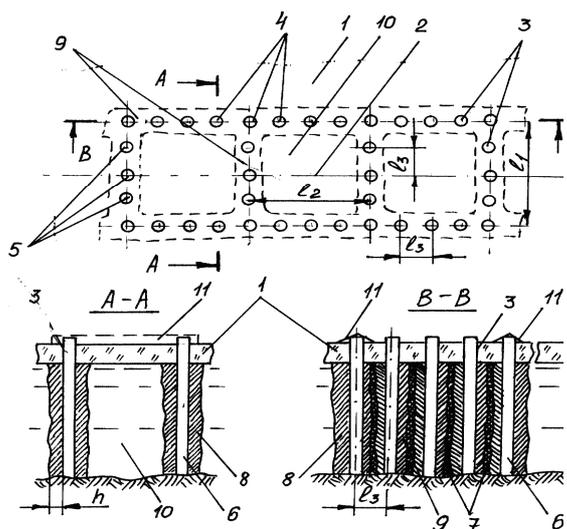


Рис. 1.13. Способ создания ледяных опор: 1 – естественный ледовый покров; 2 – ось переправы; 3 – отверстия в ледовом покрове; 4 – трубы вдоль переправы; 5 – труба поперёк переправы; 6 – опора; 7 – пространства незамерзшей воды; 8 и 9 – лёд вокруг труб; 10 – вода; 11 – крышка

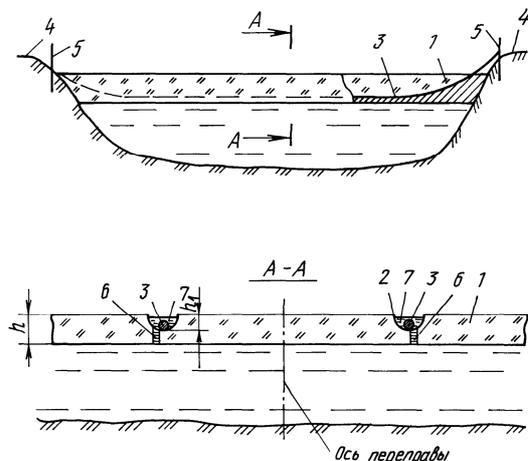


Рис. 1.14. Армирование ледового покрова стальными тросами: 1 – естественный ледовый покров; 2 – канавка; 3 – стальной трос; 4 – берег; 5 – крепление троса к берегу; 6 – сквозное отверстие во льду; 7 – вода

никающих в ледовом покрове при действии на него внешних нагрузок.

щих на поверхностях труб от поступления в них холодного ($T < 0$ °С) атмосферного воздуха.

Интересным решением является устройство ледяного покрова, армированного стальными тросами (рис. 1.14) [20].

В ледовом покрове по обеим сторонам от оси переправы устраивают канавки глубиной меньше толщины льда, в которые укладывают стальные тросы. Затем в канавках сверлят сквозные отверстия, через которые канавки заполняются водой. После их заполнения и полного замерзания воды ледовая переправа готова к эксплуатации.

Заслуживает внимания способ увеличения несущей способности ледовой переправы, суть которого заключается в образовании подо льдом рёбер жёсткости (рис. 1.15) [21, 22]. На верхней поверхности льда делают канавки и под воздействием на низкой температуры воздуха подо льдом в местах выработки канавок образуются наросты льда.

Далее на верхней части ледовой плиты в ледовый покров вмораживались стальные трубы с заваренными концами.

Образуются рёбра жёсткости в толще и на поверхности льда. Результат изобретения – уменьшение прогибов льда, воз-

Для снижения скорости подлёдного течения и увеличения толщины льда и скорости его образования было предложено устройство, представляющее набор пластин, типа «жалюзи», погруженный под лёд через прорезь, выполненную в ледовой поверхности перпендикулярно течению реки, при этом пластины набора поворачивают на угол, обеспечивающий снижение скорости потока [23].

Еще один способ, предложенный для уменьшения скорости подлёдного течения, – установить наклонно пластину. Она имеет на верхней кромке фланец для закрепления на поверхности льда посредством вмержания в ледовый покров, а на нижней – прикреплённую по всей длине пластины полосу из водонепроницаемой ткани. Пластина устанавливается под ледовым покровом через сквозную прорезь, подготовленную в последнем и ориентированную перпендикулярно направлению подлёдного течения [24].

Достигнуть увеличения несущей способности ледового покрова также можно за счёт помещения под лёд по пути ледовой переправы теплоизоляционного материала [25].

Для ввода ледовой переправы в эксплуатацию можно ускорять приrost толщины льда вдоль намеченного пути. Для этого поверхность льда очищают от снега и накрывают воздухонепроницаемой плёнкой. Вентилятором продувают холодным атмосферным воздухом пространство между поверхностью льда и плёнкой. Поток холодного воздуха интенсифицирует теплообмен на поверхности льда и обеспечивает его ускоренное охлаждение и увеличение толщины [26].

В результате патентного поиска по исследуемому вопросу собран обширный материал по вопросам ускорения ввода ледовых переправ в эксплуатацию и повышению их несущей способности [27 – 31].

В данном разделе монографии помещена только часть из имеющихся предложений, при этом следует отметить, что некоторые из этих предложений крайне далеки от возможностей реального внедрения.

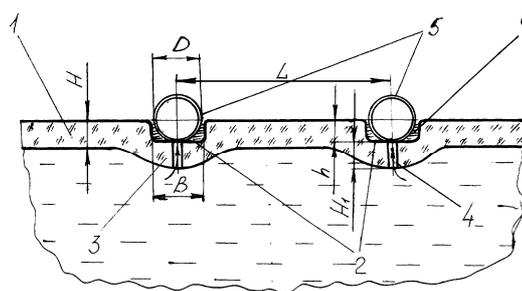


Рис. 1.15. Способ уменьшения прогибов льда за счёт образования рёбер жёсткости: 1 – естественный ледовый покров; 2 – канавка; 3 – рёбра жёсткости; 4 – сквозное отверстие; 5 – трубы; 6 – вода

После изучения существующих способов увеличения несущей способности ледовых переправ, их достоинств и недостатков нами предложены новые способы их усиления с использованием геосинтетических материалов.

До образования льда на водоёме (рис. 1.16) вдоль намеченного пути будущей ледовой переправы в грунте дна закрепляют термосифоны. На проектной глубине, которая определяется по предполагаемому уровню промерзания водоёма, к средней части полотна геосинтетического материала крепят поплавки. При замерзании воды вокруг термосифонов образуются ледяные опоры, увеличивающие несущую способность переправы, а вмороженный геосинтетический материал будет армировать растянутую зону ледяного полотна [29].

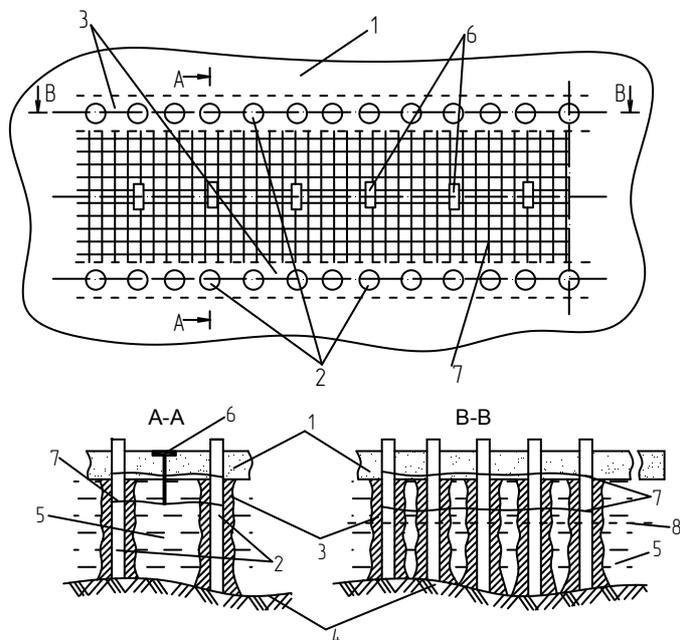


Рис. 1.16. Способ усиления ледовой переправы: 1 – естественный ледовый покров; 2 – термосифоны; 3 – ледяные опоры; 4 – дно; 5 – вода; 6 – поплавки; 7 – геосинтетический материал; 8 – предполагаемый уровень промерзания водоёма

Можно использовать несколько слоёв армирующего материала.

Перед образованием льда на водоёме (рис. 1.17) вдоль намеченного пути будущей ледовой переправы на проектной глубине в нескольких слоях по глубине закрепляют армирующий материал.

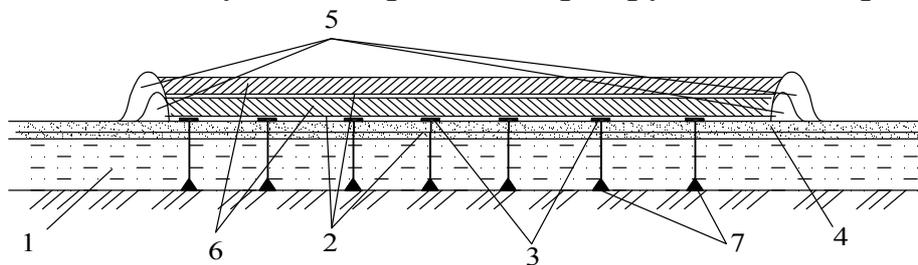


Рис. 1.17. Схема, иллюстрирующая способ уменьшения прогибов льда за счёт образования рёбер жёсткости: 1 – вода; 2 – геосинтетический материал; 3 – поплавки; 4 – естественный ледовый покров; 5 – валики из снега; 6 – намороженные слои льда; 7 – грузы

При этом если армирующий материал имеет плотность больше плотности воды (тонет), то его удерживают поплавки, которые поддерживают его в горизонтальном положении. Если армирующий материал имеет плотность меньше плотности воды (всплывает), то его удерживают грузы.

При образовании льда достаточной толщины поверхность водоёма очищают от снега. Далее на поверхность ледового покрова вдоль намеченного пути ледовой переправы укладывают армирующий материал. Затем создают бордюр для удержания поливной воды и намораживают дополнительные слои до необходимого числа слоёв льда. При расположении материала в проектной растянутой зоне при промерзании он будет армировать ледяное полотно [29].

Встречаются предложения, достаточно близкие к сути нашей монографии, например, авторы [32] предлагают использовать упругие высокопрочные сетчатые материалы для армирования ледовых переправ. Для этого вдоль намеченного пути переправы на поверхности льда укладывается предлагаемый материал, создаётся бордюр для поддержания поливной воды, и намораживаются дополнительные слои льда. Каждый дополнительный слой льда будет содержать армирующий материал. Намораживание производится методом полива или дождевания. При этом последний поверхностный слой укладывается из износостойких теплоизоляционных материалов (дорнита, древесных волокон и др.). Результат – повышение несущей способности и продление срока службы переправы.

В работе [33] описан способ усиления льда деревянной целлюлозой. Её добавляли в морской лёд, создавая таким образом ледовую поверхность для посадки самолётов во время Второй мировой войны. При таянии льда, армированного деревянной целлюлозой, формировалась «пушистая» поверхность, которая изолировала нижний слой льда и замедляла процесс его таяния.

В 1960 г. были проведены опыты по укреплению морского льда стекловолокном. Результаты исследования показали, что при добавлении в воду 15 % стекловолокна (по объёму) прочность морского льда увеличилась приблизительно в 10 раз. По данным [34] вмораживание стекловолокон увеличивает прочность льда в 5 раз, в зависимости от количества стекловолокон, а также от расположения волокон (ориентации волокон в пространстве). Однако полученные данные в дальнейшем не подтверждались и не нашли отражения в нормативных документах. Следует отметить, что, несмотря на столь впечат-

ляющий эффект, предлагаемая технология очень дорога, т.к. для усиления одной полосы переправы шириной 100 м потребуется примерно 14 т стекловолокна. Возникают проблемы с равномерным распределением стекловолокна в замерзающей воде, затруднён вопрос извлечения армирующего материала из льда весной.

Для армирования ледовой переправы на реке Имджин (Корея) применялась рисовая солома. В 1964 г. такая переправа была использована для пропуска танка М-41 [33].

В 1973 г. был предложен способ армирования ледового покрова при помощи металлической арматуры, погружённой в лёд на проектную глубину. Погружать арматуру в проектное положение предлагалось при нагревании арматуры электрическим током [35].

В 1975 – 76 гг. были проведены исследования по армированию ледовых переправ с использованием травы, хвороста, стальных кабелей, деревянного шпона. Армирование производилось при послойном намораживании дополнительных слоёв льда. Опубликованные результаты показывают, что ветки (хворост), стальные кабели и деревянный шпон увеличивают прочность льда на изгиб. Несмотря на то, что стальные кабели имели самую высокую прочность, они показали не самый лучший результат из-за плохого сцепления со льдом [33].

В 1970-х годах в США начали применять нетканый полипропиленовый материал в дорожном строительстве. Первые испытания льда, армированного геотекстилем, проведены в 1979 г. Было установлено, что укрепление геотекстилем увеличивает прочность льда на изгиб до 31 % (наши данные не подтверждают столь существенных результатов при использовании геотекстиля).

Испытания на ползучесть, проводимые на ледяных балках с замороженными маленькими стекловолоконными прутами, показали, что армирование в верхних слоях и в основании (нижних слоях) значительно уменьшило деформацию и скорость деформации армированного льда.

В 1989 г. в США были проведены испытания льда, армированного полимерными георешётками. Испытания показали увеличение прочности армированного материала на изгиб до 16 % [33].

Анализируя значительный объём публикаций, касающихся способов усиления ледового покрова на автозимниках, мы убедились, что до настоящего времени нет полной классификации этих способов. Кроме того, следует обратить внимание, что многие авторы считают понятия «армирование» и «усиление» материалов и конструкций синонимами. С нашей точки зрения понятие «усиление» (материалов

или конструкций) является более общим. Усиление может быть достигнуто разными способами (изменением свойств материалов, увеличением стойкости деструктивным внешним воздействием, увеличением площади несущего сечения и т.п.).

Армирование (от лат. *armo* – вооружаю, снабжаю) является одним из способов усиления материала или частей конструкций элементами (арматурой) из другого, более прочного, материала (например, усиление бетона стальной арматурой при изготовлении железобетона; усиление льда арматурой из геосинтетики и т.п.).

Исходя из вышесказанного, нами впервые была разработана классификация способов усиления ледового покрова (рис. 1.18) [36].

Все способы увеличения несущей способности и продления сроков эксплуатации мы разделили на прямые, косвенные и комбинированные. К прямым способам следует отнести:

- намораживание дополнительных слоёв льда;
- вмораживание в ледяную плиту армирующих материалов;
- укрепление отдельных элементов переправы.

К косвенным способам мы относим:

- изменение физических свойств воды;
- защита поверхности льда от солнечной радиации;
- изменение гидрологических характеристик водоёма;
- регулирование температурного режима воды и льда.

Комбинированные способы увеличения несущей способности и продления сроков эксплуатации переправ включают сочетание прямых и косвенных способов (что обычно даёт наилучший эффект).

Изменение физических свойств воды. К данной группе способов мы отнесли, например, такой способ, как омагничивание воды. Недостатком данной группы способов является то, что в реальных полевых условиях осуществить их не представляется возможным.

Защита поверхности льда от солнечной радиации. Как известно, в весенний период с наступлением таяния плотность льда и соответственно количество воздуха в нём увеличиваются. Такой лёд встречается весной и называется «гнилым» вследствие своей малой прочности.



Рис. 1.18. Классификация способов увеличения несущей способности ледового покрова и продления сроков эксплуатации переправ

Одним из способов увеличения несущей способности и продления сроков эксплуатации ледовой переправы в весенний период является защита поверхности льда от таяния. Для этого на поверхность льда наносят слой теплоизоляционного материала (опилки, торф и т.д.) [33].

Способы, входящие в эту группу, максимально эффективно «работают» только в весенний период, поэтому в основной период эксплуатации ледовой переправы их не применяют.

Изменение гидрологических характеристик водоёма. К данной группе были отнесены способы, обеспечивающие снижение скорости потока и соответственно увеличение толщины слоя льда и скорости его образования [16 – 18, 23, 28].

Также сюда был отнесён ряд изобретений, направленных на увеличение несущей способности ледовой переправы за счёт установки подо льдом демпферов, различные конструкции которых были описаны выше. Недостатком предлагаемых способов является то, что устройство демпферов и пластин требует дополнительных затрат: на приобретение или изготовление, а также на установку. Поскольку установка предлагаемых устройств осуществляется вручную, это влечёт за собой дополнительные затраты.

Намораживание дополнительных слоёв льда может выполняться как сверху, так и снизу. Разница заключается в качестве намораживаемого льда: при намораживании льда сверху образуется мутный лёд, прочность которого в два раза меньше прозрачного. Лёд, намороженный снизу, получается, как правило, прозрачным и с высокой прочностью. При намораживании льда снизу используют термосифоны или просто расчищают намораживаемую полосу от снега.

Недостатком способов намораживания является то, что намораживать можно небольшими слоями и до определённой величины, так как после происходит подтаивание льда снизу. Так, например, при толщине льда 30 см и температуре воздуха ниже минус 10 °С для пропуска колёсной нагрузки весом 40 т требуется наморозить 47 см [2, 3].

Как правило, при намораживании дополнительных слоёв применяют *вмораживание в ледяную плиту армирующих материалов*. Армирование может быть выполнено в нижних растянутых слоях льда, в верхних сжатых слоях льда, либо комбинированно (верхнее и нижнее армирование одновременно). В качестве армирующего мате-

риала могут использоваться как естественные природные, так и искусственные материалы [20, 21, 33]. Выбор материала зависит от требуемой прочности ледового покрова, но при выборе материала необходимо помнить о критериях, которым обязан соответствовать армирующий материал [28].

Среди множества армирующих материалов, применяемых для вмораживания в ледовое полотно, наиболее часто применяют древесину. Расход древесины составляет примерно $1,5 \text{ м}^3/\text{пог.м}$, значит, усиление ледового покрытия протяжённостью всего 100 м деревянным брусом обойдётся свыше 2 млн руб. [37].

Проведённые нами исследования подтвердили эффективность использования геосинтетических материалов (геосетки и плоские георешётки) [38, 39]. Использование геосеток для армирования льда примерно на порядок дешевле, чем деревянного бруса, меньше трудоёмкость выполнения работ и больше производительность.

Движение по переправе (даже при достаточном запасе прочности льда) может быть приостановлено из-за местных разрушений (съезд, сквозная трещина на проезжей части). В таких случаях проводят мероприятия, которые мы отнесли к шестой группе – **укрепление отдельных элементов переправы**. Для повышения прочности съездов ледовой переправы предложены разные способы их укрепления [4, 40].

Сквозные трещины на переправах без верхнего строения *представляют опасность при достижении ширины 5÷6 см*. В этом случае необходимо устраивать переходы через трещины или замораживать их. В качестве переходов применяются временные мостики или щиты. Деревянные щиты используются при переходах через узкие небольшие трещины, сверху они засыпаются снегом и поливаются водой.

Также, как и способы защиты поверхности льда от солнечной радиации, укрепление элементов переправы чаще всего применяют совместно с «намораживанием» и «вмораживанием».

В литературе можно встретить разнообразные способы интенсификации промораживания льда, которые мы отнесли к последней группе способов армирования ледовых переправ – **регулирование температурного режима воды и льда**. Способы армирования ледовых переправ, отнесённые к этой группе, очень трудоёмкие и дорогостоящие. Поэтому их применение может быть обусловлено чрезвы-

чайными ситуациями (спасательные операции, военные операции) [15, 26 – 28, 30, 32].

Таким образом, можно сказать, что среди множества существующих способов армирования ледовых переправ наиболее приемлемыми являются следующие – усиление намораживанием дополнительных слоёв льда с вмораживанием армирующих материалов [36 – 39].

1.3. Свойства геосинтетических материалов, применяемых для армирования дорожных конструкций

Геосинтетическими материалами (ГМ) называют материалы из синтетических или природных полимеров, неорганических веществ, контактирующие с грунтом или другими средами, применяемые в строительстве [41].

Использование ГМ в дорожном строительстве уже имеет свою историю, хотя и не очень продолжительную. За рубежом ГМ применяют с конца 60-х годов XX века. Транспортное строительство, в частности дорожное, стало одной из самых перспективных областей с точки зрения использования ГМ, так как именно в этой области сочетаются интересы производителей материалов и строителей дорог, у которых в силу специфики дорог как линейных инженерных сооружений, имеющих большую протяжённость, возникает потребность в больших объёмах ГМ.

Производство геосинтетики в мире развивалось стремительно, и в настоящее время на мировом рынке предлагается большое количество различных материалов (рис. 1.19) [42] в виде геотекстилей, геосеток, плоских и объёмных георешёток (геосот, как их иногда называют), геонитей, а также геоплит, используемых в качестве термоизоляторов.

Предлагаемые материалы различаются по исходному сырью (рис. 1.20), технологии получения, расходу полимера, физико-механическим характеристикам, ширине полотен и т.п. [41, 43]. Геотекстиль изготавливают из полиэфира, полипропилена, полиамида; геосетки – на основе полиэфира, базальта, полипропилена, полиэстера, стекловолокна; геоплиты – на основе полистирола и т.п.

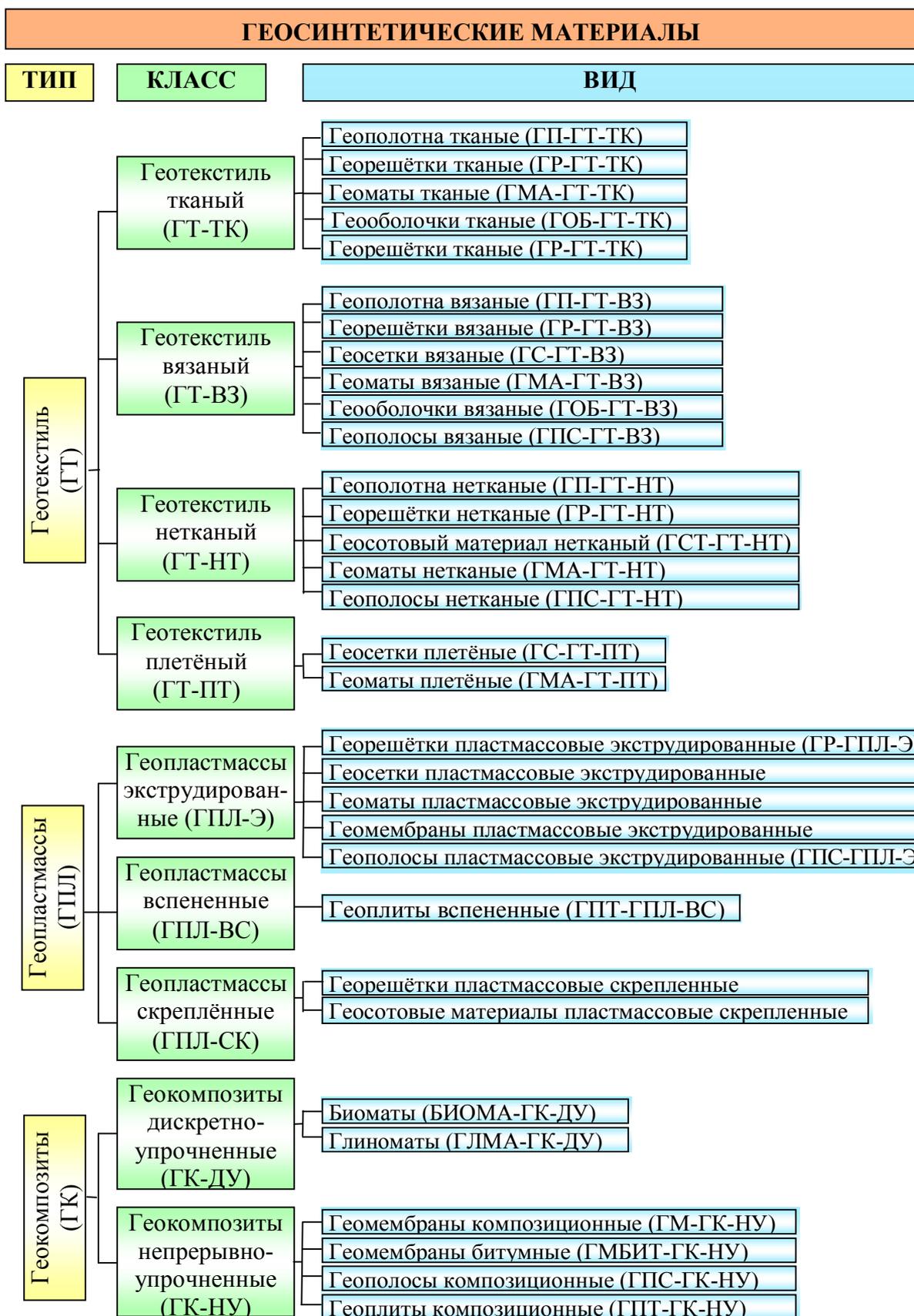


Рис. 1.19. Строительная классификация геосинтетических материалов

Проблемами геосинтетике занимается специальный технический комитет № 9 Международного общества по механике грунтов и геотехнике. По инициативе американских специалистов создано и функционирует Международное общество по геотекстилю.

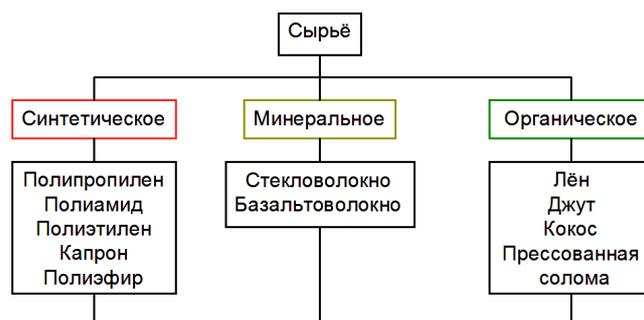


Рис. 1.20. Виды сырья для получения ГМ

Динамика роста объёма производства геосинтетике в мире следующая: 1980 г. – 113 млн м²; 1983 г. – 220 млн м²; 1984 г. – 390 млн м²; 2000 г. – 1000 млн м²; 2005 г. – 1500 млн м². В настоящее время выпускается примерно 380 различных видов геосинтетических материалов. Применение геосинтетике предусматривается в проектах более 100 тысяч различных сооружений ежегодно во всем мире [43].

Основная цель применения ГМ – обеспечение надёжного функционирования автомобильной дороги или отдельных её элементов в сложных условиях строительства и эксплуатации.

Устройство дополнительных слоёв из ГМ позволяет повысить эксплуатационную надёжность и сроки службы дорожной конструкции или отдельных её элементов, качество работ, упростить технологию строительства, сократить сроки строительства, уменьшить расход традиционных дорожно-строительных материалов, объёмы земляных работ, материалоемкость дорожной конструкции.

Геосинтетические материалы необходимы для выполнения избирательно или в комплексе следующих функций:

1) армирование – усиление дорожных конструкций насыпей (в том числе откосов), оснований в результате перераспределения напряжений, возникающих в грунтовом массиве, дорожной одежде при действии нагрузок от транспортных средств и собственного веса;

2) защита – предотвращение или замедление процесса эрозии грунтов, предотвращение взаимопроникновения материалов контактирующих слоёв;

3) фильтрование – предотвращение (замедление) процесса проникания грунтовых частиц в дренажи (фильтр) или их выноса (обратный фильтр);

4) дренирование – ускорение отвода воды;

5) гидроизоляция – уменьшение или исключение притока воды в грунты рабочего слоя земляного полотна.

На базе собственных исследований и публикаций мы определили десять принципиальных условий, при выполнении которых армирующий материал может эффективно выполнять свои функции [37, 44]:

1) необходимо прочное сцепление арматуры с армируемым материалом для обеспечения перераспределения возникающих напряжений;

2) коэффициенты температурного расширения армируемого и армирующего материалов должны иметь близкие значения для более эффективного выполнения первого условия;

3) арматура должна располагаться в слое армируемого материала с наибольшими растягивающими напряжениями;

4) прочность арматуры на растяжение должна быть значительно выше прочности армируемого материала с учётом усталостных явлений от многократных кратковременных силовых воздействий. В противном случае теряется смысл армирования материала;

5) модуль упругости арматуры должен быть значительно выше, чем у армируемого материала. Иначе армируемый материал может получить избыточные горизонтальные деформации раньше, чем арматура воспримет и перераспределит растягивающие напряжения;

6) прочность и деформативность армирующего материала должны быть стабильны во времени как при высоких, так и при низких отрицательных температурах и высокой влажности. Только в этом случае можно гарантировать длительную несущую способность армированного покрытия;

7) арматура не должна обладать чрезмерной ползучестью для восприятия длительных температурных напряжений. Иначе она может либо не выдержать значительных длительных температурных напряжений, возникающих при низких отрицательных температурах, либо релаксировать эти напряжения, утратив своё предназначение;

8) армирующий материал должен обладать минимальной повреждаемостью рёбер в процессе его укладки в армируемый материал. В противном случае высокие исходные прочностные свойства армирующего материала не могут быть реализованы в полной мере;

9) желательно, чтобы армирующий материал не вызывал технологических и экологических осложнений;

10) стоимость армирующего материала должна обеспечивать экономическую эффективность его применения в армированных дорожных конструкциях.

Далее рассматриваются только геосинтетические материалы, выпускаемые ведущими отечественными и зарубежными производителями, в той или иной мере отвечающие вышеперечисленным требованиям [37, 45].

Зарубежные производители геосинтетических материалов

Одним из старейших производителей геосинтетических материалов для дорожного строительства является компания **TENSAR Group Limited**, которая была основана в Блэкберне, Великобритания, в 1952 году и носила имя Netlon Group [46]. Компания выпускает различные материалы для армирования асфальтобетона, стабилизации грунта, укрепления откосов и т.д.

Для армирования материалов были специально разработаны изделия Tensar AR. Материалы AR 1 (рис. 1.21) и AR-G представляют собой георешётки, изготовленные из полипропилена. Материал AR-G отличается от AR 1 наличием подложки.

Свойства материалов фирмы Tensar, которые могут быть использованы для усиления ледового покрова, отображены в табл. 1.1.



Рис. 1.21. Материал AR 1 фирмы Tensar

Таблица 1.1. Физико-механические свойства георешёток

Характеристика	Сырьё	Прочность при растяжении, кН/м (прод./попер.)	Удлинение при разрыве, %	Устойчивость к высоким температурам, °С	Размер ячейки, мм	Плотность, г/м ²	Ширина рулона, м	Длина рулона, м	Вес рулона, кг
SS 20	Полипропилен	20/20	10	До 165	39x39	—	4,0 и 3,8	50	46 и 44
SS 30		30/30				—			67 и 64
SS 40		40/40				—			65 и 62
AR 1	Полипропилен + полиэстер	Более 20/20	10	До 165	65x65	360	3,8	50	69
AR-G									
Гласстек P50	Стекловолокно + полипропилен, полиэстер	Более 50/50	3	3	40x40	317	1,0-3,0	100	32/48/96
Гласстек P100		Более 100/100	3			433			43/65/130

Для стабилизации грунта и армирования слабых оснований разработаны материалы серии SS. Материал AR-G представляет собой комбинацию георешётки AR 1 и специально изготовленного нетканого геотекстиля. Оба материала термическим способом соединены друг с другом.

Немецкая фирма *HUESKER Synthetic GmbH & Co* (г. Гешер, Германия) является разработчиком и производителем армирующей геосетки HaTelit [47] из полиэстера с большими размерами ячеек, пропитанная битумом. Некоторые характеристики материалов HaTelit приведены в табл. 1.2. Фирма выпускает несколько типов геосеток, из которых наибольшее распространение получили геосетки HaTelit 40/17 и HaTelit C40/17. Геосетка HaTelit C40/17 имеет с одной стороны прикреплённое нетканое полотно.

Таблица 1.2. Характеристики материалов HaTelit

Характеристика	HaTelit 20/5	HaTelit 20/9	HaTelit 30/13	HaTelit 30/19	HaTelit 40/17	HaTelit C40/17
Сырье	Полиэстер					
Покрытие	Битум					
Размер ячейки, мм	20x20		30x30		40x40	
Прочность при растяжении (прод./попер.), кН/м	30/30	50/50	50/50	90/90	50/50	
Удлинение при разрыве (прод./попер.), %	12/14					12/12
Прочность при 3 %-ном удлинении (прод./попер.), кН/м	7/5	12/10		22/18	12/10	12/12
Устойчивость к высоким температурам	До 190 °С					
Усадка	Около 1 % при 190°С после 15 мин					
Размеры рулона:						
– длина	150	150	150	150	150	150
– ширина	3,6/1,0	3,6/1,7	3,6/3,0/2,2/1,7/1,0	3,6	3,6/2,2/1,7/1,1	5,0

Также компания выпускает такие материалы, как Stablenka и Fortrac. Stablenka – высококачественная, водопроницаемая ткань, которая служит для армирования грунта. Материал выпускается в девяти стандартных видах с показателями прочности при растяжении до 1000 кН/м в основном направлении воздействия усилий.

Fortrac – гибкая, устойчивая к высоким нагрузкам, хорошо зарекомендовавшая себя геосетка для армирования грунтов. Изготавлива-

ется из высокомодульных синтетических волокон с низкой ползучестью и покрывается полимерным защитным слоем.

Австрийская компания *TenCate GEOSYNTHETICS Austria* [48] разрабатывает и производит различные ГМ. Для армирования асфальтобетонного покрытия компания предлагает материалы TenCate Polyfelt PGM и TenCate Polyfelt PGM-G. TenCate Polyfelt PGM – нетканый материал, состоящий из механически упрочненных полипропиленовых нитей (рис. 1.22, А).

Материал был разработан для замедления возникновения отражённых трещин на отремонтированных дорожных покрытиях. TenCate Polyfelt PGM-G состоит из вышеописанного TenCate Polyfelt PGM, усиленного высокопрочным стекловолокном (рис. 1.22, Б).

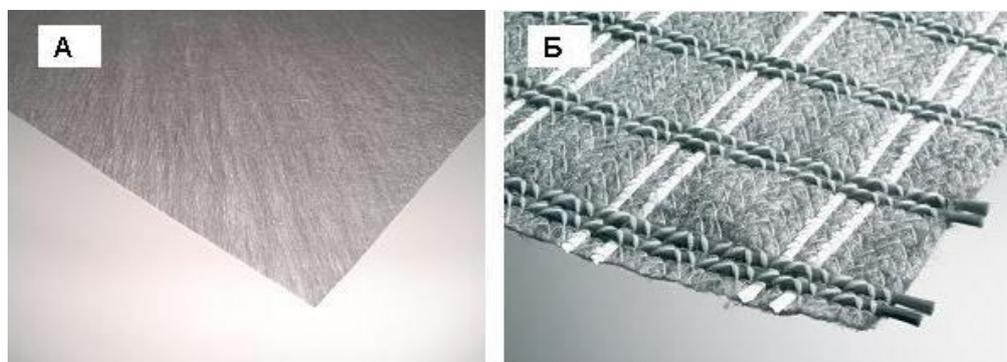


Рис. 1.22. Геосинтетические материалы TenCate Polyfelt PGM (А) и PGM-G (Б)

Некоторые свойства геосинтетических материалов TenCate Polyfelt, применяемых для армирования, представлены в табл. 1.3.

Таблица 1.3. Свойства материалов TenCate Polyfelt

Характеристика	PGM 14	PGM-G 50/50	PGM-G 100/100	PGM-G 200/200
Сырье	Полипропилен	Полипропилен + стекловолокно		
Битумная пропитка, кг/м ²	1,1	1,1	1,1	1,1
Прочность при растяжении (прод./попер.), кН/м	9	50/50	100/100	200/200
Удлинение при разрыве, %	> 50	3	3	3
Растягивающее усилие при 2 %-ном удлинении, Н/м	–	34/34	68/68	136/136
Размер ячейки, мм	–	40 x 40	40 x 40	40 x 40
Плотность, г/м ²	140	300	430	495

Геосинтетические материалы TenCate применяются для армирования слоёв основания дорожной одежды. Их укладывают как на естественное основание, так и между конструктивными слоями дорожной одежды. Основные области применения армирующих геосинтетических материалов – дороги, места стоянок, складские площадки.

Российские производители

Группа предприятий компании «*Стекло–Прогресс*» производит геосетки «АРМДОР» (Россия) [49], предназначенные для армирования асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог и аэродромов (рис. 1.23). «АРМДОР» – это геосетка клееная (ГСК) из ориентированного стеклопластика, получаемого на основе алюмоборосиликатного стекловолокна.

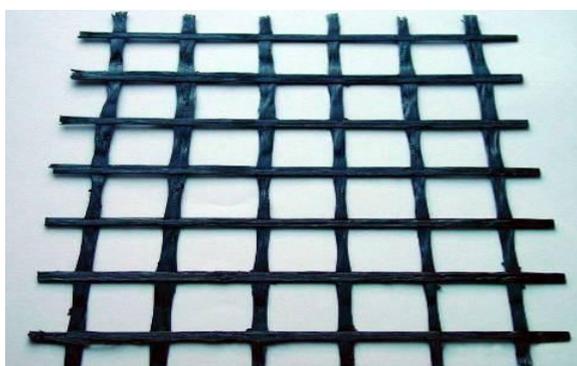


Рис. 1.23. Геосетка «АРМДОР»

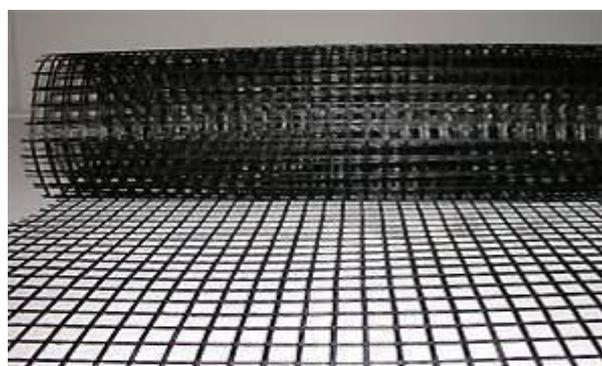


Рис. 1.24. Геосетка «СНП – ХАЙВЕЙ»

Выпускается широкий диапазон геосеток «АРМДОР», характеристики которых представлены в табл. 1.4.

Таблица 1.4. Характеристики геосеток «АРМДОР»

Показатели	Нормы для геосеток			
	ГСК-50	ГСК-70	ГСК-100	ГСК-200
Масса на единицу площади, г/м ²	225±30	320±40	450±50	540±60
Прочность при растяжении, (прод./попер.), кН/м	50/48	70/65	100/95	120/115
Удлинение при разрыве (прод./попер.), %, не более	4/4	4/4	4/4	4/4
Потеря прочности при проверке морозостойкости (50 циклов заморозания-оттаивания), %, не более	25	25	25	25
Размеры ячеек, мм	25x25; 37,5x37,5; 50x50			
Ширина, см	240; 120			

ОАО «СТЕКЛОНИТ» создано на базе государственного предприятия «Уфимский завод текстильного стекловолокна» [50]. Компания «СТЕКЛОНИТ» выпускает геосетки под торговой маркой «ССНП-ХАЙВЕЙ» (рис. 1.24), изготавливаемые из стекловолокна с пропиткой комплексными полимерными составами.

Характеристики геосеток «ССНП-ХАЙВЕЙ» приведены в табл. 1.5.

Таблица 1.5. Характеристики геосеток «ССНП-ХАЙВЕЙ»

Показатели	ССНП 50/50-25(400)-ХАЙВЕЙ	ССНП 100/100-25(400)-ХАЙВЕЙ
Прочность при растяжении (прод./попер.), кН/м	50/50	100/100
Относительное удлинение при разрыве, %, не более	3	
Температурный диапазон применения	-20 ... +350 °С	
Размеры ячеек, мм	25x25; 12x12, 42x42, 50x50	
Ширина, м	1, 2, 4	
Длина, м	100	

ООО «Славрос геосинтетика» входит в группу компаний «Славрос», которое было основано в 2001 году на территории города Переславль-Залесский [51]. Компания выпускает различные геосинтетические материалы, изготавливаемые из полипропилена и полиэтилена, применяемых для армирования оснований дорожных конструкций.



Рис. 1.25. Георешётка «Славрос СД»

Плоские георешётки марок «Славрос СД» представляют собой плоскую полипропиленовую двухосно-ориентированную георешётку с прямоугольной ячейкой (рис. 1.25). Характеристики георешёток «Славрос СД» приведены в табл. 1.6.

Группа компаний ООО «МИАКОМ» [52] выпускает следующие виды геосинтетических материалов.

СТЕКЛОСЕТКА «ГЕО СТ» представляет нитепрошивную сетку из стекловолоконных нитей (рис. 1.26), применяется для армирования асфальтобетонных покрытий. Сетка изготавливается с определённым размером ячеек и пропитывается полимерно-битумным составом. Характеристики геосетки приведены в табл. 1.7.

Таблица 1.6. Характеристики георешётки «Славрос СД»

Условное обозначение геосетки	Прочность при растяжении, кН/м						Относительное удлинение при разрыве, %, не более	
	вдоль	поперёк	при относительном удлинении				вдоль	поперёк
			вдоль	поперёк	вдоль	поперёк		
			2 %		5 %			
СД-20	20	20	7	7	15	15	11,5	10,5
СД-30	30	30	10	10	20,5	20,5	11,5	10,5
СД-40	40	40	13	13	26	26	11,5	10,5
СД-45	45	45	14	14	28	28	11,5	10,5

«ПолиЭф» – геосетка из полиэстерных волокон выпускается одноосная и двухосная (рис. 1.27). Её характеристики приведены в табл. 1.8.

Таблица 1.7. Характеристики стеклосетки «ГЕО СТ»

Показатель	«ГЕО СТ»	«ГЕО СТ»	«ГЕО СТ»
	50/50	80/80	100/100
Длина рулона, м	100		
Ширина рулона, м	4		
Размер ячейки, мм	25x25		
Прочность при растяжении (прод./попер.), кН/м	50/50	80/80	100/100
Относительное удлинение при разрыве, %	≤ 3		
Допустимая потеря прочности после 25 циклов промораживания – оттаивания, %, не более	10		
Температурный диапазон применения	От – 100°С до +280°С		
Содержание связующего вещества, %	≤ 20		
Пропитка	Полимерно-битумная эмульсия		
Материал	Стекловолокно		



Рис. 1.26. Стеклосетка «ГЕО СТ»



Рис. 1.27. Двухосная стеклосетка

Таблица 1.8. Характеристики двухосной геосетки «ПолиЭф»

Показатель	«ПолиЭф» 20/20	«ПолиЭф» 30/30	«ПолиЭф» 40/40	«ПолиЭф» 60/60	«ПолиЭф» 100/100
Длина рулона, м	50/100				
Ширина рулона, м	4÷6				
Размер ячейки, мм	37x37				
Прочность при растяжении (прод./попер.), кН/м	20/20	30/30	40/40	60/60	100/100
Относительное удлинение при разрыве, %	12,5				
Материал	Полиэтилен				

«Гео ДС» – двухосная георешётка, применяемая при строительстве дорог, аэродромов и т.д. на слабых и неоднородных грунтах (рис. 1.28). Характеристики георешётки приведены в табл. 1.9.



Рис. 1.28. Георешётка «Гео ДС»

Таблица 1.9. Характеристики георешётки «Гео ДС»

Показатель	«Гео ДС 20/20»	«Гео ДС 30/30»	«Гео ДС 40/40»
Длина рулона, м	50		
Ширина рулона, м	4	4	4
Размер ячейки, мм	42x42	40x40	38x38
Прочность при растяжении (прод./попер.), кН/м	20/20	30/30	40/40
Прочность при 2 % -ном удлинении (прод./ попер.), кН/м	7/7	11/11	13/13
Прочность при 5 % -ном удлинении (прод./ попер.), кН/м	10/12	15/15	17/20
Материал	Полипропилен		

Компания Маккаферри создана в 1879 году в Гессо, около Лавино (Италия) [53]. С 1994 г. ООО «Габионы Маккаферри СНГ» является представительством Officine Massaferrì на территории России и стран СНГ. Компания выпускает следующие геосинтетические материалы. **Композитные сетки «PARAGRID»** представляют собой плоскую двухосную структуру, состоящую из совокупности композитных синтетических лент (рис. 1.29).



Рис. 1.29. Геосетка «PARAGRID»

Каждая отдельная лента имеет ядро, изготовленное из высокопрочных полиэфирных нитей, заключённых в стабилизированную карбоном полиэтиленовую оболочку. На конечном этапе производства композита полиэтиленовой оболочке задают текстуру для лучшего сцепления материала с армируемым материалом. Характеристики геосетки приведены в табл. 1.10.

Таблица 1.10. Характеристики геосетки «PARAGRID»

Показатели	30/05		50/05		80/05		100/05		150/05		200/05		30/15		50/15		80/15		100/15		150/15		200/15	
	30	50	80	100	150	200	30	50	80	100	150	200	30	50	80	100	150	200	30	50	80	100	150	200
Прочность на разрыв в продольном направлении, кН/м	30	50	80	100	150	200	30	50	80	100	150	200	30	50	80	100	150	200	30	50	80	100	150	200
Прочность при растяжении в поперечном направлении, кН/м	5						15																	
Относительное удлинение, %	12																							
Полимер ядра лент	PES (полиэфирсульфон)																							
Полимер покрытия	PE (полиэтилен)																							
Размер ячейки, мм	426x51			426x42			201x51			201x42														
Вес рулона, кг	64	70	84	95	122	148	73	79	93	103	130	156												

«PARALINK» – высокопрочный композитный геосинтетический материал (рис. 1.30), представляет собой плоскую структуру, состоящую из одноосной совокупности композитных синтетических лент.

Каждая отдельная продольная лента имеет ядро, изготовленное из высокопрочных полиэфирных нитей, заключённых в полиэтиленовую оболочку. Продольные ленты соединяются с помощью нерезистентных полиэтиленовых лент. Характеристики геосетки приведены в табл. 1.11.

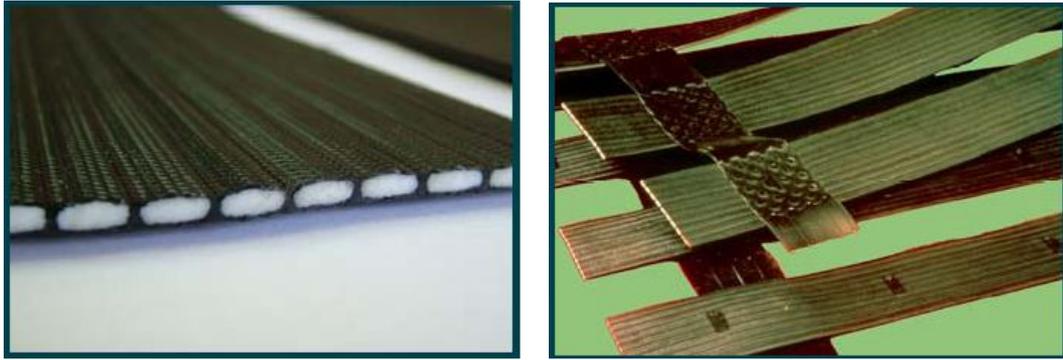


Рис. 1.30. Геосетка «PARALINK»

Таблица 1.11. Характеристики геосетки «PARALINK»

Наименование	Прочность при растяжении в продольном направлении, кН/м	Относительное удлинение, %	Полимер ядра лент	Полимер покрытия	Ширина одной ленты, мм	Ширина рулона, м	Длина рулона, м	Вес рулона, кг
100	100	12	Полиэфирсульфон	Полиэтилен	82	4,5	100	250
200	200				85		100	330
300	300				88		100	410
400	400				90		100	510
500	500				90		100	630
600	600				90		100	770
700	700				91		50	470
800	800				91		50	530
900	900				91		50	590
1000	1000				91		50	650
1100	1100				91		50	710
1200	1200				91		50	760
1300	1300				91		50	860
1350	1350				91		50	890

«РОДМЕШ» – сетка из стальной проволоки двойного кручения с цинковым покрытием, укрепленная армирующим прутком, расположенным в поперечном направлении (рис. 1.31).

Сетка изготовлена из стальной проволоки двойного кручения с размером ячейки 8x10 см. Поперечный пруток вплетен в сетку через каждые 16 см. «РОДМЕШ» поставляется в рулонах длиной 50 м, шириной 3 или 4 м. Характеристики геосетки приведены в табл. 1.12.

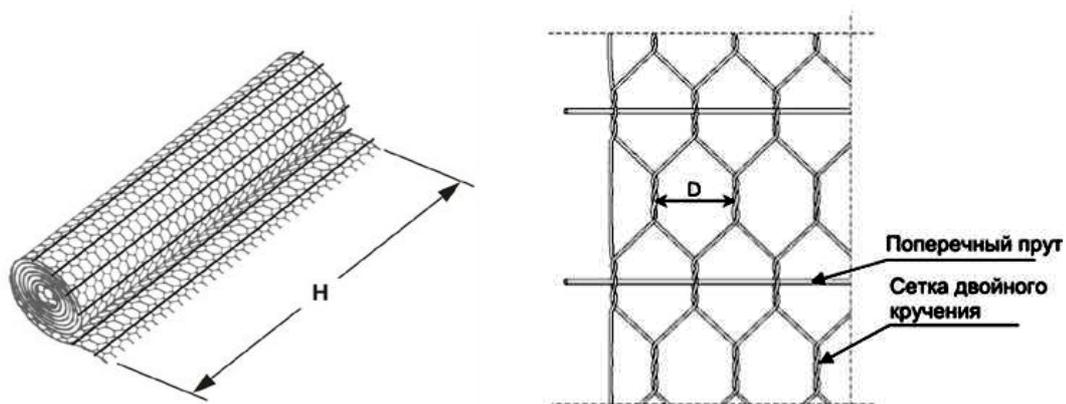


Рис. 1.31. Стальная сетка «РОДМЕШ»

Таблица 1.12. Характеристики геосетки «РОДМЕШ»

Диаметр проволоки, мм	Диаметр поперечного прута, мм	Прочность при растяжении, кН/м	
		в продольном направлении	в поперечном направлении
2,4	4,4	39	50

Из приведённого краткого обзора следует, что основными видами геосинтетических материалов, используемых для армирования, являются различные геосетки (георешётки) и геокомпозиты, включающие геосетки (георешётки), объединённые с тонким нетканым геотекстильным полотном.

Прочность на разрыв геосинтетических материалов изменяется в широких пределах – 20÷1300 кН/м. Большинство фирм предлагает геосетки с прочностью 50 и 100 кН/м. Важным показателем для армирующих материалов является величина относительного удлинения при разрыве. Для большинства стеклосеток удлинение при разрыве не превышает 2÷4 %. Для георешёток, изготовленных из полимерных материалов, относительное удлинение достигает 10÷14 % и более.

Производители геосеток предлагают изделия с различными геометрическими размерами: размер ячеек – от 12 до 65 мм; ширина рулона – от 0,9 до 5,0 м; длина геосетки в рулоне – от 50 до 150 м.

Выводы по первой главе

1. Зимние дороги, в частности ледовые переправы, необходимы в обеспечении транспортной доступности как объектов нефтегазового и лесного комплексов, так и множества поселений в различных областях России. Отличительной особенностью эксплуатации ледовых переправ является малые интенсивность и скорость движения транспортных средств, но значительные масса большинства автомобилей, осуществляющих грузоперевозки по этим дорогам, и требуемая несущая способность самой переправы.

2. Для повышения несущей способности ледовых переправ существует множество способов, которые, однако, зачастую являются очень трудоёмкими, дорогими и не всегда эффективными. Положительный результат от их применения часто достигается только при соблюдении обязательного ряда условий, не выполнимых в реальности. Нормативными документами [2, 3] рекомендуется три основных способа увеличения несущей способности ледовых переправ: намораживанием дополнительных слоёв льда сверху (при помощи полива водой), снизу (при помощи наклонных термосифонов) и устройством деревянных настилов.

3. Выполненный анализ существующих способов армирования льда позволил составить классификацию существующих способов увеличения несущей способности ледовых переправ и рекомендовать наиболее эффективные и экономически целесообразные способы усиления ледовых переправ.

4. Исследования, проведённые Н.К. Васильевым и Корпусом Военных Инженеров США, содержат единственные и далеко не полные данные для использования некоторых видов геосинтетики при строительстве ледовых переправ.

5. Представленные на отечественном и зарубежном рынках геосинтетические материалы значительно отличаются как по виду сырья, используемого для их производства, так и по физико-механическим характеристикам. Ни один геосинтетический материал ранее не исследовался в полном объёме для усиления ледовых переправ.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЁННОГО СОСТОЯНИЯ И РАСЧЁТ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ АРМИРОВАННОГО ЛЕДОВОГО ПОКРЫТИЯ

2.1. Особенности свойств льда, как материала дорожного покрытия, его физико-механические свойства

Наибольший научный вклад в исследование свойств льда, как материала дорожного покрытия, его физико-механических свойств внесли Б.А. Савельев, С.А. Бернштейн, И.П. Бутягин, Б.П. Вейнберг, К.Н. Коржавин, С.С. Вялов, С.С. Голушкевич, Н.Н. Зубов, К.Е. Иванов, П.П. Кобеко, Н.В. Черепанов, А.Р. Шульман, В.В. Лавров, Б.Д. Карташкин, А.Н. Комаровский, И.С. Песчанский, В.Н. Пинегин, Н.К. Снитко, Н.Д. Шишов, В.В. Богородский, Н.Х. Флетчер, З.В. Глен, М. Ивинг, А. Крэри, А. Торн и др. Ряд учёных предлагали разные способы усиления и расчёта ледового полотна: Н.К. Васильев, М.М. Коруннов, И.С. Песчанский, В.П. Симаков, В.М. Козин, В.С. Морозов, Н.Н. Бычковский, Д.Е. Хейсин, К.Ф. Войтковский, Д.Ф. Панфилов и др.

Лёд представляет собой мономинеральную криогидратную породу с особыми физико-механическими свойствами, которые полностью зависят от термодинамических условий среды (температуры, давления и пр.).

Лёд имеет кристаллическое строение. Внешняя форма кристаллов разнообразна и зависит от условий их образования и роста. Они непрерывно изменяются в результате процессов рекристаллизации, заключающихся в росте одних кристаллов за счёт других. Кристаллы льда характеризуются резко выраженной анизотропностью механических свойств в зависимости от направления действия усилия относительно базисной плоскости (плоскость, перпендикулярная к оптической оси кристалла) [54].

Структура льда. Прочностные свойства материалов, имеющих кристаллическое строение, помимо их зависимости от химического состава, определяющего ту или иную молекулярную структуру, зависят от их строения, размера, формы, взаимной ориентировки кристаллов и наличия посторонних включений [55, 56].

Структура льда чувствительна к изменениям климатических условий и гидрологического режима водоёма. Температурные изменения, как правило, приводят к нарушению нормального роста кристаллов, способствуют образованию слоистого льда. Ветер и волнение в

начальный период льдообразования приводят к развитию мелкозернистой или очень сложной структуры с большим количеством включений [55].

В природе встречаются различные виды льда, отличающиеся друг от друга по своей структуре и по другим свойствам [57]. Различают следующие основные виды структуры льда (в зависимости от способа образования):

- сплошная кристаллическая структура, образуется при спокойном замерзании воды;

- игольчатая структура, часто с наличием пузырьков воздуха, образуется в местах соприкосновения воды и льда;

- слоистая структура, образуется при периодических замерзаниях отдельных слоёв воды или при уплотнении отдельных мокрых слоёв снега;

- фирновая (зернистая) образуется при смерзании снега;

- мелкоагрегатная неправильная структура образуется при перемешивании при перемешивании (наблюдается в верхнем слое больших водоёмов);

- рыхло-чешуйчатая структура, наблюдается в свежеснеговом покрове, а также при замерзании воды, конденсирующейся из пара [54].

По размерам кристаллов в разных направлениях формы их могут быть разделены на следующие группы:

- изотермические – кристаллы, более или менее равномерно развитые по всем направлениям (шарообразные, эллипсоидальные и т.п.);

- плоские или таблитчатые – кристаллы, хорошо развитые только по двум направлениям (дискообразные, листоватые, лопастевидные и т.п.);

- призматические – кристаллы, хорошо развитые в одном направлении; они дают образования в виде призм, столбиков, брусков, игл и т.п.

Текстура льда. Под текстурой льда подразумевается совокупность внешних признаков, обусловленных наличием во льду воздушных, солевых, органических и минеральных включений, характером их распределения, формой и количеством включений, определяющих такие характеристики льда, как цвет, прозрачность, пористость, слоистость и волокнистость [55].

В отличие от текстуры горных пород, текстура льда обозначает

более узкое понятие, исключая такие основные характеристики, как минералогический состав пород, размеры и пространственное размещение составляющих породу минералов, их кристаллическую структуру.

Роль включений во льду различна. Воздушные включения во льду по условиям своего происхождения могут быть разделены на два основных типа.

Первичные – возникают одновременно со льдом в результате вмержания пузырьков воздуха, выделяющегося из воды при её замерзании, и при выделении газов со дна водоёма в результате биохимических процессов, а также при частичном захвате атмосферного воздуха.

Вторичные – возникают во льду после его образования вследствие внедрения атмосферного воздуха по трещинам и сообщающимся порам, или заполнения талой водой пористой породы (снега, фирна, разрушенного льда).

Замедленное замерзание обычно способствует образованию более прозрачного льда с небольшими, но более крупными включениями. Наоборот, интенсивное замерзание сопровождается обильным захватом мелких воздушных включений, с образованием менее прозрачного льда [55].

В начальный период льдообразования на количество включений во льду большое влияние оказывает волнение поверхности водоёма. При интенсивном перемешивании происходит обогащение поверхностных слоёв воды воздухом не только в растворённом, но и во взвешенном виде. Как правило, при льдообразовании, сопровождающемся волнением, образующийся лёд содержит большое количество воздушных включений, имеет ярко выраженную пузырчатую текстуру.

Воздушные включения уменьшают удельный вес льда, оказывая влияние на его прочностные свойства. Они также оказывают влияние на термические свойства льда, поскольку воздух имеет чрезвычайно низкий коэффициент теплопроводности. Включения уменьшают проницаемость льда для лучистой энергии, способствуя её рассеиванию и отражению. Примеси во льду не вступают с ним в химические соединения.

Пористость и плотность льда. Пористостью льда называется отношение общего объёма пузырьков и полостей к общему объёму чистого льда, лишённого пузырьков, выраженное в процентах. Плотность чистого пресного льда лишённого пузырьков, составляет 0,9176

г/см³ при температуре 0 °С и 0,9377 г/см³ – при минус 2 °С. Эта величина уменьшается за счёт пузырьков воздуха во льду, поэтому плотность льда всегда меньше плотности воды (табл. 2.1). С наступлением таяния количество воздуха во льду увеличивается.

Таблица 2.1. Зависимость плотности льда от его пористости

Пористость льда, %	89	78	67	56	46	35	24	13	2
Плотность льда, г/см ³	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9

Существует классификация льдов в зависимости от формы и количества пор [55]:

- монолитный, прозрачный, лишённый микропор лёд;
- плотный лёд с малым количеством воздушных включений (их суммарный объём не более 1 см³/кг);
- лёд средней пористости (суммарный объём газовых включений составляет не более 50 см³/кг);
- прозрачный лёд, содержащий кроме пор трещины термического и динамического происхождения (суммарное содержание газовых включений составляет от 50 до 100 см³/кг);
- пористый лёд, содержащий большое количество различных по размерам и форме пор (объём газовых включений составляет от 100 до 400 см³/кг; такой лёд похож на уплотнённый снег).

Приведённая классификация является условной, но она всё же позволяет определять изменение механических и оптических свойств льда в зависимости от объёма газовых включений на единицу массы.

Условия льдообразования (гидрологические особенности водоёма, состояние погоды, наличие растворённых солей в водоёме, таяние и повторное замерзание, нарушение его сплошности при дроблении (торошении) и повторная цементация) также влияют на плотность льда. Вначале за счёт таяния плотность такого льда несколько больше, но по мере вытекания рассола и освобождения пор и полос-тей она уменьшается. Именно такой лёд встречается весной и называется «гнилым» вследствие своей малой прочности [55].

Из-за небольшой разницы в плотностях воды и льда верхняя поверхность льда незначительно возвышается над поверхностью воды. Однако в связи с различной плотностью и неоднородностью льда возвышение его над поверхностью воды оказывается различным, что

имеет очень большое значение, так как этим обуславливается характер и интенсивность таяния льдов.

Следует также отметить и такое свойство, как зависимость между плотностью и модулем упругости. По данным У. Накая [58] модуль упругости льда с плотностью от 910 до 914 кг/м³ равен 9000 МПа, при плотности 900 кг/м³ он изменяется от 7000 до 8000 МПа, а при плотности 700 кг/м³ снижается до 4000 МПа.

В табл. 2.2 приведены некоторые усреднённые характерные физические свойства льда [55, 59 – 62].

Таблица 2.2. Физические свойства льда

Показатель	Значение
Плотность	0,90÷0,92 г/см ³
Коэффициент объёмного расширения	(115÷125)·10 ⁻⁶ см ³ /(г·°С)
Коэффициент линейного расширения	(50÷55)·10 ⁻⁶ °С ⁻¹
Теплоёмкость	2,0÷2,2 Дж/(г·°С)

К основным свойствам льда, имеющим большое практическое значение, относится солёность. Количество солей в морской воде обычно составляет от 3,0 до 3,5 %. Однако, несмотря на незначительное количество солей, влияние их на свойства как самой воды, так и образующегося льда очень велико. Температура замерзания пресной воды является одновременно температурой замерзания и пресного льда. Для морского же льда существуют температура замерзания морской воды и температура замерзания морского льда [55].

Лёд, образовавшийся из морской воды, состоит из трёх частей: пресного льда, твёрдых солей и рассола, содержащего растворённые соли. Смерзаясь между собой, кристаллы льда образуют замкнутые ячейки, полости и капилляры, заполненные рассолом и воздухом. Дальнейшее понижение температуры вызывает в морском льду два противоположных процесса: ранее образовавшийся лёд сжимается, а из рассола выделяется новый лёд, образование которого связано с увеличением объёма. Эти процессы протекают до тех пор, пока все соли не выпадут в твёрдое состояние и не образуется криогидрат. Температура криогидрата и есть температура замерзания морского льда (по данным Н. Н. Зубова она равна минус 35 °С, а по данным В. Рингера – минус 55 °С). Поэтому при практических расчётах прочности ледяного покрова вносятся дополнительные понижающие коэффициенты, учитывающие солёность воды. В среднем принято считать, что прочность морского льда на 20 % меньше пресного.

Температура льда является основным фактором, от которого зависят его механические и физико-химические свойства. При различной температуре прочность льда при одноосном сжатии изменяется в 6÷7 раз. Примерно в этих же пределах изменяется и величина сопротивления льда изгибу, растяжению и срезу [34, 63 – 65].

На рис. 2.1 представлены типовые кривые нарастания абсолютной величины прогиба при разных температурах у образцов льда монокристаллического строения [55, 66].

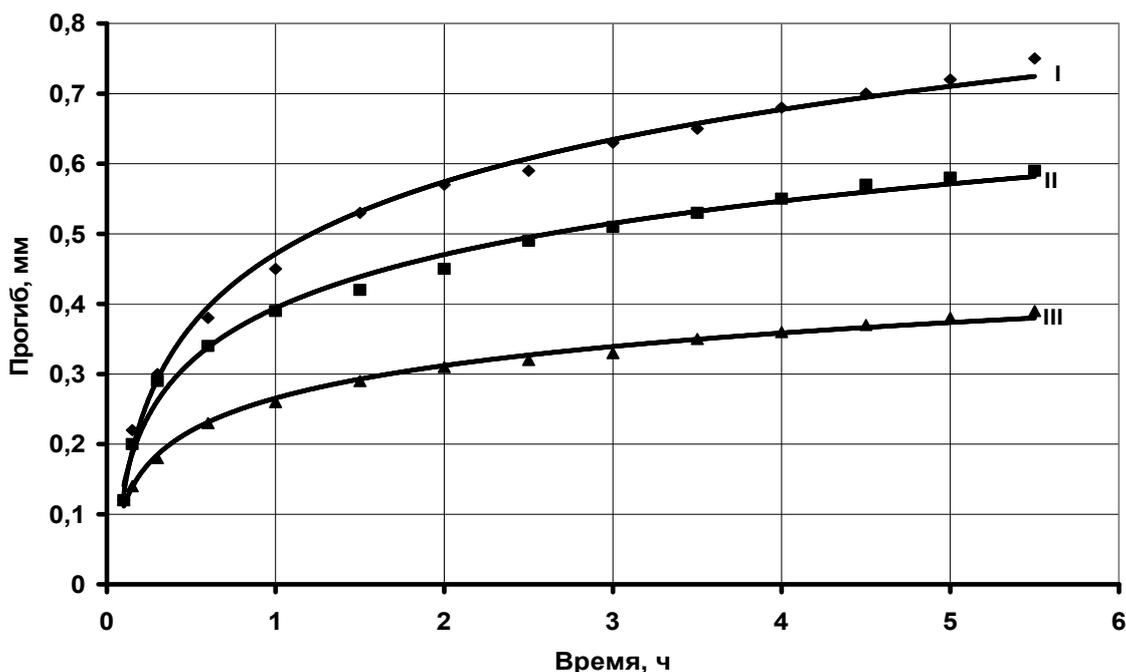


Рис. 2.1. Кривые нарастания абсолютной величины прогиба образца льда: I – при температуре минус 3 °C; II – при минус 13 °C; III – при минус 23 °C

Прочность льда. Анализ существующей информации позволяет сделать вывод о том, что величина внутренних напряжений льда зависит от скорости приложения нагрузки [63, 67, 68]. Так, по данным К.Н. Коржавина [68] увеличение скорости деформирования сопровождается некоторым понижением пределов прочности льда, причём влияние скорости деформирования особенно сильно сказывается при низких температурах, а по мере приближения к 0 °C это влияние уменьшается [58, 69].

Подобные результаты (средние значения пределов прочности уменьшаются при увеличении скорости деформирования образцов) получали и ранее [67].

Прочность льда является функцией многих величин (пористость, солёность и др.), однако все авторы, исследовавшие свойства

льда, отмечают, что механическая прочность льда зависит от температуры и возрастает при её понижении. Это объясняется наличием у льда очень слабой водородной связи атомов, их подвижность резко уменьшается с понижением температуры, что и объясняет упрочнение структуры льда [58].

П.А. Шумский объясняет увеличение прочности льда при понижении температуры тем, что лёд в природе находится при температурах, близких к точке его плавления. Чем ниже температура льда, тем более затрудняется перегруппировка атомов в пространственной решётке, тем она становится прочнее, тем сильнее проявляются упругие и хрупкие свойства льда.

Были получены различные виды таких зависимостей [58, 68, 70,

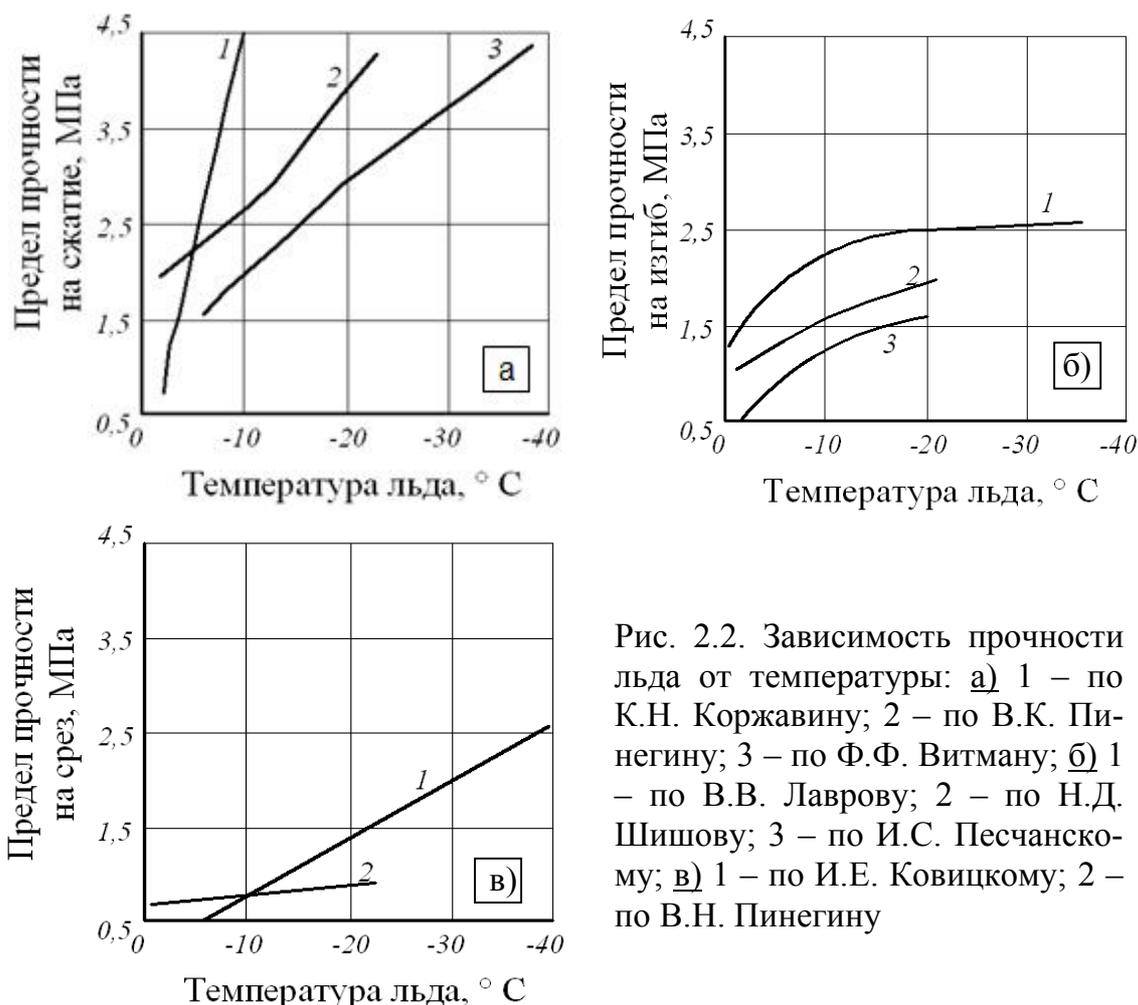


Рис. 2.2. Зависимость прочности льда от температуры: а) 1 – по К.Н. Коржавину; 2 – по В.К. Пинегину; 3 – по Ф.Ф. Витману; б) 1 – по В.В. Лаврову; 2 – по Н.Д. Шишову; 3 – по И.С. Песчанскому; в) 1 – по И.Е. Ковицкому; 2 – по В.Н. Пинегину

71] – рис. 2.2. Разброс данных, на наш взгляд, объясняется разными условиями проведения опытов и разными размерами образцов.

Применительно ко льду масштабный эффект был обнаружен В.В. Лавровым [72]. Он объяснил природу масштабного эффекта ме-

ханизмом разрушения льда. Однако также можно согласиться с объяснением масштабного эффекта с точки зрения наличия во льду структурных дефектов (в частности, микротрещин). С увеличением размеров образцов возрастает вероятность появления всё более опасных дефектов, служащих причиной разрушения льда.

И.П. Бутягин отмечает, что у льда всегда имеется большое количество местных ослаблений (пустоты, трещины, посторонние включения и др.), которые являются наиболее вероятными местами концентрации напряжений и становятся начальными очагами разрушения. Чем больше размеры образца льда, тем соответственно больше количество местных ослаблений он имеет. Кроме того, линейные размеры сечения кристаллов льда нередко достигают 5÷6 см, поэтому малый образец льда может оказаться изготовленным целиком из одного кристалла и, безусловно, окажется прочнее более крупного образца [58].

В Канаде проводились опыты с загрузкой ледового покрова по схеме полубесконечной и бесконечной плит. Эти исследования проводились в резервуаре в холодном помещении и в натуральных условиях на водоёме. В последнем случае для загрузки льда использовались грузовики с лесом.

В США ледовый покров нагружали движущимся по льду SUSV M. 937A1. Исследования проводились в гравийном карьере в одном из портов Аляски. Для анализа результатов испытаний использовалась теория упругости. Применялось дифференциальное уравнение прогиба бесконечной однородной упругой пластины на упругом основании [33].

Опыты по подобной схеме были проведены также Д.Ф. Панфиловым [73], экспериментировавшим в открытом бассейне и на ледовом покрове реки. Большинство опытов проделано им при малой толщине льда (до 8 см). Автором разработан ряд расчётных зависимостей для оценки несущей способности ледового покрова при различных схемах нагружения [74, 75].

Данные натуральных экспериментальных исследований позволили установить обратную зависимость между размерами испытываемого образца и величиной предела прочности. Это явление, свойственное и другим материалам, проявляется у льда весьма резко и, вероятно, служит одной из главных причин завышения расчётных значений предельных нагрузок в сравнении с фактическими данными.

И.П. Бутягин [67] считает, оценивать прочность ледового покрова по результатам испытаний малых образцов льда нельзя. т.к. результаты бывают завышенными. Он ставит под сомнение применимость большинства справочных данных о прочности льда для расчёта ледовых нагрузок и несущей способности ледового покрова. Кроме того, прочность льда зависит от его строения, схемы приложения нагрузки, её режима, температурных и других внешних условий.

Таким образом, в большинстве опубликованных работ рассматривали вопросы изучения физико-механических свойств льда на малых образцах при простейших видах напряжённого состояния – сжатия и изгиба. Основное внимание уделялось экспериментальному исследованию зависимости прочности и деформативности льда от его температуры. Почти не рассматривались критерии прочности льда для случая сложного (трёхосного) напряжённого состояния. Только в работе Г.А. Гениева [76] этому вопросу уделено внимание. Большинство работ не всегда могут дать надёжные и достоверные ответы на многие практические вопросы по расчётам ледовых переправ.

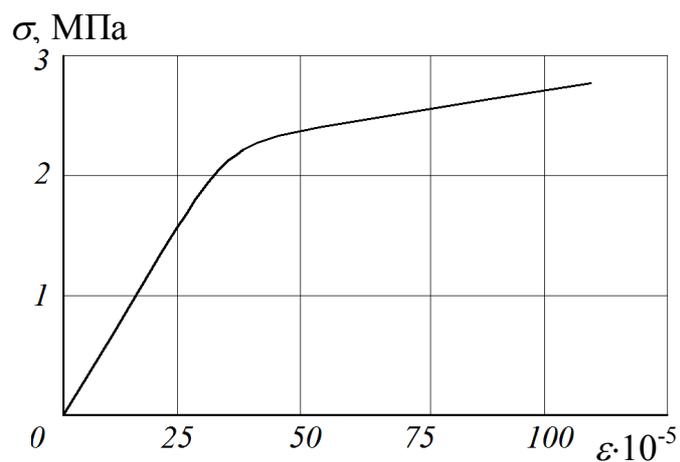


Рис. 2.3. Изменение напряжений льда на сжатие в упругопластической зоне при температуре минус 23 °С

Упругость льда. Величина напряжения, соответствующая моменту перехода тела от упругого состояния к пластическому, носит название *предел текучести*. Для льда переход от стадии упругого состояния в стадию пластического состояния совершается не резко, а постепенно (рис. 2.3) [55].

Установление предела упругости для льда является достаточно сложной задачей. Естественный лёд, имеющий в большинстве случаев неоднородное строение, имеет значения предела упругости, отличные от монокристаллического льда.

Согласно работам Б.П. Вейнберга [77], предел упругости для льда практически является очень небольшой величиной. Как для случая сдвига, так и для случая растяжения предел упругости составляет менее 0,1 МПа. В практических задачах, как правило, встречаются с напряжениями и нагрузками, значительно превосходящими эту вели-

чину. Следовательно, в большинстве практических случаев работа льда под нагрузкой протекает за пределом упругости [55].

Исследования, проведённые И.С. Песчанским, показали, что предел упругости повышается с понижением температуры. Результаты опытов показали, что при минус 5 °С предел упругости изменяется в пределах от 0,4 до 0,8 МПа, а при минус 23 °С он изменяется в пределах от 1,3 до 2,5 МПа. Повышение предела упругости расширяет и упругую зону работы ледового покрова. Но для ледового покрова, благодаря большому градиенту температур между верхней и нижней поверхностями льда, расчёт значительно осложняется, так как предел упругости по толщине льда является переменным [55].

Некоторые исследователи считают, что область проявления чисто упругих свойств льда настолько мала, что она не имеет практического значения.

Однако более справедливо то, что при непродолжительном действии нагрузок сохраняется линейный характер зависимости напряжений от деформации [78]. Например, Б.А. Савельев считает, что в течение 5÷10 с после приложения нагрузки во льду не успевают развиться пластические деформации, а только упругие. Э. Паундер доказал, что при воздействии периодической силы с периодом менее 1 с или постоянной силы, время действия которой не превышает этой величины, во льду возникают только упругие деформации. Это значит, что упругие свойства льда проявляются лишь при кратковременных нагрузках – ударе, прохождении подвижной нагрузки и т.д. С.А. Бернштейн на основании своих наблюдений за поведением ледового покрова под воздействием движущейся нагрузки считает вполне допустимым в этих условиях характеризовать ледовый покров как мнимоупругое тело. Присоединяясь к мнению С.А. Бернштейна, С.С. Голушкевич вводит понятие «фиктивной» упругости, возникающей благодаря возвратной реакции поверхности воды. Таким образом, при кратковременном действии нагрузки ледовый покров ведёт себя как упругое тело, и к нему применимы классические дифференциальные уравнения теории упругости.

Модуль упругости. В поликристаллических телах, каким является лёд, свойства самих кристаллов и массы льда, составленной из множества кристаллов, различны и их следует рассматривать отдельно. По всей массе льда рассеяны пузырьки воздуха. Поэтому величина модулей упругости для ледового покрова меньше значения упругих постоянных монокристалла и изменяется с изменением строения льда. На рис. 2.4 представлены графики, характеризующие модуль упругости E и модуль сдвига G пресного льда.

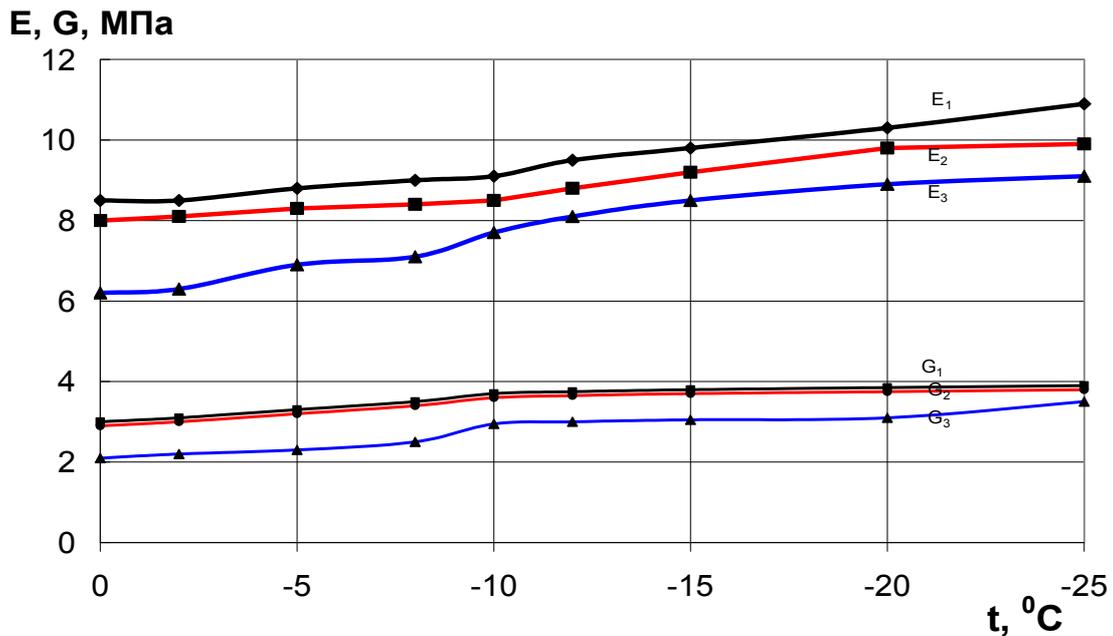


Рис. 2.4. Модуль упругости E и модуль сдвига G льда при разной температуре

Измерения были выполнены В.В. Богородским [72] импульсным ультразвуковым методом на частоте 500 кГц. Значения E_1 и G_1 соответствуют прозрачному крупнокристаллическому льду почти без пузырьков воздуха плотностью $0,90 \text{ г/см}^3$. Значения E_2 и G_2 соответствуют свойствам того же льда, но вместе с верхним мутным слоем толщиной 15 см, а E_3 и G_3 характеризуют лёд наполовину мутный с большим количеством пузырьков воздуха, его плотность равна $0,89 \text{ г/см}^3$.

Снижение значений E и G по мере ухудшения качества льда происходит за счёт уменьшения скорости продольных и сдвиговых волн, а не вследствие малого изменения плотности [75].

Модуль упругости E для пресного льда, определявшийся различными методами разными исследователями [79], имеет значения, которые изменяются в широких пределах. Причиной являются как различия в свойствах льда, имеющего разную структуру и неоднородное строение, так и различия в методах определения модуля упругости [55].

Наиболее строгим следует считать метод определения модуля упругости с помощью измерения упругих колебаний во льду (резонансные методы исследования). Но на практике чаще пользуются статическими методами исследований. Так называемые статические методы определения модуля упругости льда, заключающиеся в измерении величины деформации после приложения статической нагрузки, в большинстве случаев дают меньшие значения модуля упругости.

Модуль упругости E зависит не только от величины деформации ε и напряжения σ , но и от скорости деформации и времени релаксации t . По мнению И.С. Песчанского [55] большинство статических измерений модуля упругости для льда производилось при напряжении σ , превосходившем предел упругости, а величина деформации ε зависела от скорости деформации и времени релаксации, т.е. от величин, которые не учитывались в ходе экспериментов.

Таким образом, при статическом методе определения модуля упругости результаты эксперимента будут зависеть от условий опыта.

На практике лёд работает за пределом упругости, а расчёт несущей способности ледового покрова для движущейся нагрузки ведётся по формулам теории упругого изгиба, в основе которых лежит предположение о прямой пропорциональности между напряжениями и деформациями. Так как при кратковременных нагрузках и больших скоростях деформации влияние релаксации мало, то между напряжениями и деформациями в этом случае устанавливается зависимость, близкая к линейной. Это подтверждает возможность применения для расчёта формул теории упругости. Но при этом в качестве расчётных значений модуля упругости правильнее брать те значения, которые измеряются в аналогичных условиях. Также следует отдать предпочтение полевым измерениям, при которых модуль упругости определяется на основании величины прогибов при изгибе ледяного покрова от заданной нагрузки [55].

Коэффициент Пуассона. Для пресного льда значение коэффициента Пуассона, определённое В.Н. Пинегиным, равно $0,36 \pm 0,13$. Другие авторы предлагают для практических расчётов принимать значение коэффициента Пуассона от 0,3 до 0,35 [80, 81]. В данной работе коэффициент Пуассона был принят равным 0,35.

Таким образом, с учётом рассмотренных свойств, для использования льда в качестве дорожного покрытия должны быть обеспечены следующие условия:

- деформации, происходящие в период работы ледового покрова, должны быть допустимыми и установлены экспериментально до начала работы ледового автозимника;
- части сооружения, в которых возможно возникновение предельных состояний конструкции, должны быть армированы;
- поддержание стабильного термического режима;
- строительство и эксплуатация сооружений с использованием ледового покрова должны осуществляться под ежедневным надзором.

2.2. Особенности поведения льда под нагрузкой

Исследование напряжённого состояния ледового покрова является одним из важнейших вопросов, в котором заинтересована практика. Ледовый покров – это пластина с разными пределами упругости и разными свойствами по толщине, значительно меняющимися под воздействием внешних условий. Состояние напряжения ледяной пластины также зависит от внешних условий. Причины, вызывающие напряжения в ледовом покрове, можно разделить на две группы.

К первой группе относятся изменения температуры и колебания уровня воды. Эти причины вызывают напряжения и деформации в ледовом покрове и могут приводить к его разрушению без приложения внешних нагрузок. Вторая группа причин – внешние нагрузки: действие ветра, торошение и сжатие льдов, воздействие ледокола, статические и динамические нагрузки от транспорта и т.д. [55].

Чаша прогиба. Измерения размеров чаши прогиба льда с разной толщиной при разных нагрузках показали, что радиус чаши прогиба зависит, главным образом, от толщины льда и в меньшей степени от величины груза [55].

Пластическая деформация льда растёт непрерывно до момента разрушения. Между деформацией и временем существует линейная зависимость, указывающая на постоянство скорости деформации во времени, зависящей для льда данной структуры от его толщины, величины нагрузки и температуры. Радиус чаши прогибов при упругой деформации оказывается значительно больше (до пяти раз), чем при пластической деформации [55, 82].

При длительно действующих нагрузках равномерно возрастающая пластическая деформация с течением времени сопровождается проломом льда. При этом опытами установлено, что пролом льда при разных нагрузках и одной и той же толщине льда происходит при одинаковых прогибах. Изменение величины нагрузки, определяющее скорость деформации, влияет на время от момента приложения нагрузки до момента разрушения. Изменение толщины льда влияет на величину разрушающего прогиба (рис. 2.5) [55].

Пролом ледового покрова под действием нагрузки. Большое количество работ было посвящено исследованию пролома льда при разной площади распределения нагрузок. Исследования показали, что увеличение площади распределения нагрузки на лёд в указанных пределах при одной и той же его толщине позволяет лишь незначительно

увеличивать груз. Увеличение площади в 200 раз позволило увеличить груз всего в два раза.

Этот вывод подтверждает теоретические положения, основанные на рассмотрении работы ледового покрова как упругой пластинки на упругом основании. Согласно теоретическим данным площадь распределения нагрузки в известных пределах толщины льда мало влияет на величину несущей способности. На рис. 2.6 и 2.7 приведены результаты этих исследований [55].

По экспериментальным данным [55] была получена эмпирическая зависимость

$$P = ah^2,$$

где P – проломный груз, кг; a – коэффициент (по данным опыта принят 20); h – толщина льда, см.

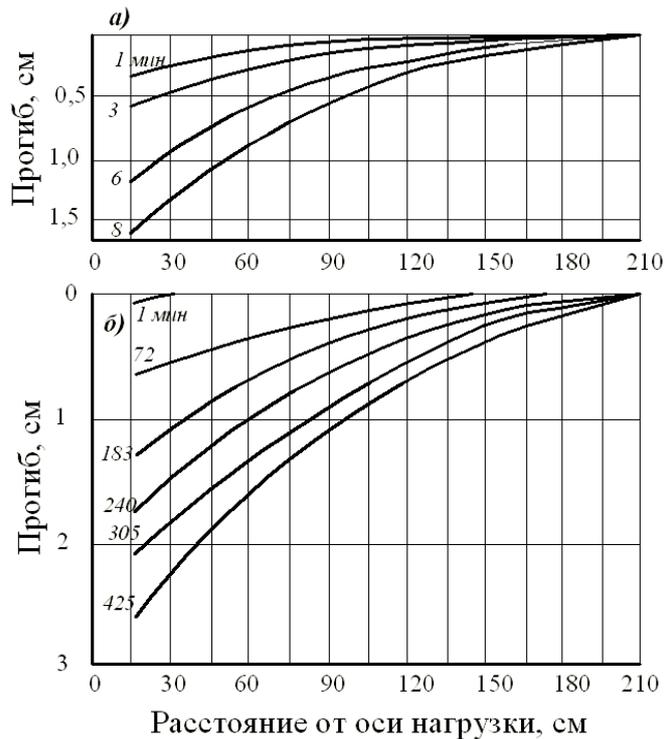


Рис. 2.5. Прогибы при пластической деформации для различных расстояний от оси нагрузки: а – груз 3,2 кг, толщина льда 1,5 см; б – груз 7,2 кг, толщина льда 1,0 см

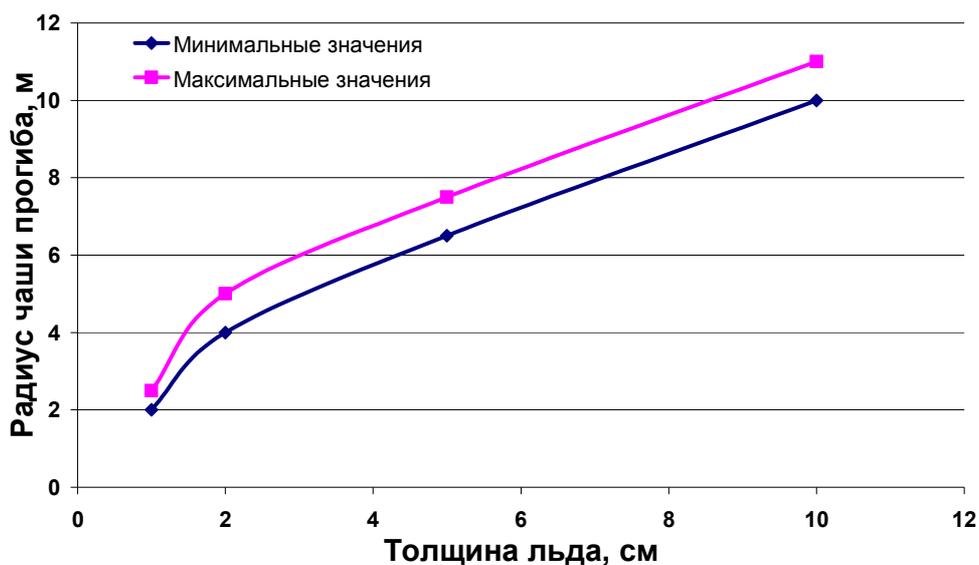


Рис. 2.6. Зависимость радиуса чаши прогиба от толщины льда

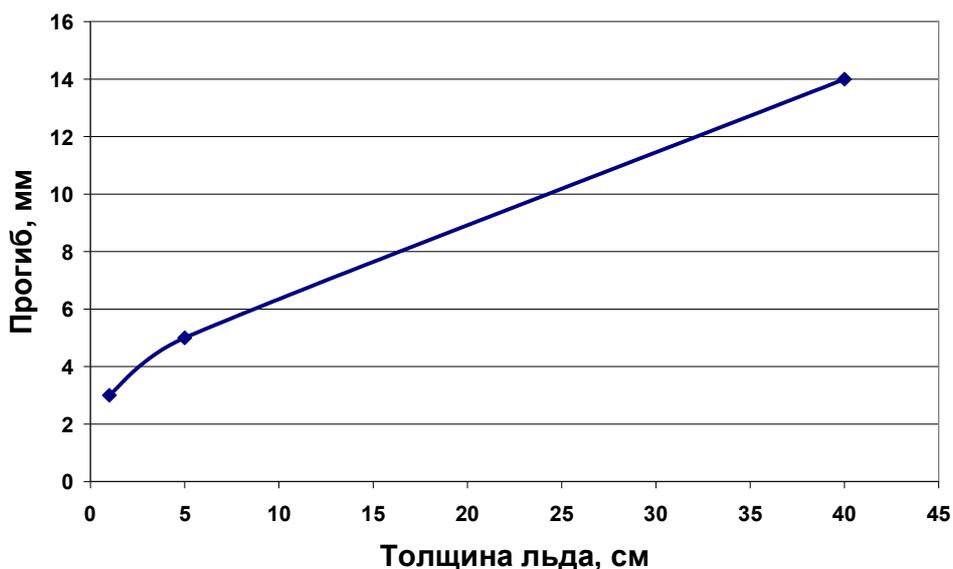


Рис. 2.7. Зависимость прогиба при проломе от толщины льда

В результате анализа полученных материалов установлено (П.П. Кобеко [83], Н.И. Шишкиным и др.), что несущая способность льда определяется суммарным эффектом упругой и пластической деформаций и провал наступает при достижении предела пластичности. При больших нагрузках пролом будет определяться большей упругой и малой пластической, но идущей с большой скоростью, деформациями. При малых нагрузках, наоборот, пролом происходит при малой упругой и большой пластической деформациях, но с малой скоростью.

Представляют интерес экспериментальные данные о чаше прогиба при движении грузов. Чаша прогиба имеет форму, несколько напоминающую ромб, вытянутый вдоль пути. Степень его вытянутости зависит от скорости движения. При скорости порядка 5 км/ч форма чаши прогиба приближается к кругу [55]. На рис. 2.8 приведен план чаши прогиба для груза массой 23,5 т,двигающегося со скоростью 18 км/ч.

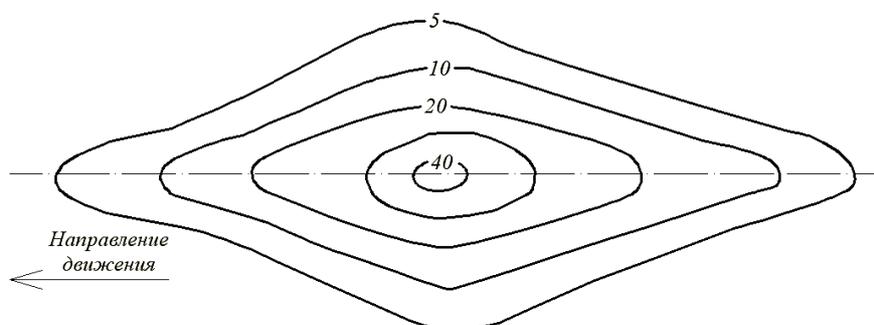


Рис. 2.8. План чаши прогиба (мм) при движении груза 23,5 т со скоростью 18 км/ч

Также были проведены исследования [55] прогиба льда в направлении, параллельном оси пути. В табл. 2.3 приведены результаты измерений прогибов для разных нагрузок.

Таблица 2.3. Прогибы льда в направлении, параллельном оси пути

Толщина льда, м	Масса груза, т	Прогиб под грузом, мм	Прогиб (мм) на расстоянии от груза, м	
			15	30
0,46	8,7	11,8	3,9	–
	11,8	15,1	6,3	0,41
	13,1	17,6	6,1	–
	18,0	25,6	6,9	0,1
	20,3	25,5	–	0,1
1,38	46,2	28,0	13,1	3,4
	39,7	22,8	10,2	2,8

Исследование воздействия на ледовый покров нагрузки, движущейся с разными скоростями. Опыты по изучению изгиба ледового покрова при движении грузов с различными скоростями были поставлены на пресноводном льду К.Е. Ивановым [84], П.П. Кобеко и др. Полученные результаты свидетельствуют о том, что скорость передвижения груза влияет на форму кривой и на величину прогиба (см. табл. 2.3).

При малых скоростях (до 10 км/ч) кривая имеет форму, почти симметричную относительно положения груза. По мере увеличения скорости движения вначале появляется более крутой уклон в той части кривой, которая обращена в сторону направления движения, и более пологий – позади движущегося груза. При дальнейшем увеличении скорости перед грузом возникает «волна вспучивания», и лёд получает в этой зоне отрицательный прогиб (вверх). Наряду с этим резко возрастает максимальный прогиб под грузом, а также общая длина деформирующейся поверхности ледового покрова в направлении движения груза [55, 85]. При этом возрастание прогиба с увеличением скорости движения груза наблюдается до известного предела.

Исходя из этого, в нормативах [3] рекомендуется устанавливать скорость движения на ледовых переправах через малые реки глубиной не более 4 м (и на всех переправах длиной до 200 м):

- до 10 км/ч, при глубине водоёма не более 6 м;
- до 15 км/ч, а на более глубоких – до 20 км/ч.

2.3. Анализ напряжённого состояния армированных ледяных образцов-балок в процессе разрушения

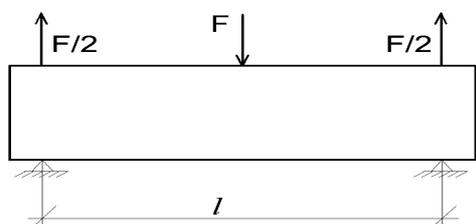


Рис. 2.9. Расчётная схема действия нагрузок: F – сила, приложенная к образцу; l – расстояние между опорами

Для оценки эффективности применения геосинтетических материалов в качестве арматуры для льда был выполнен расчёт на прочность ледяных образцов балок. На рис. 2.9 представлена схема действия нагрузок на образец-балку. Поперечное сечение балки – прямоугольник (рис. 2.10).

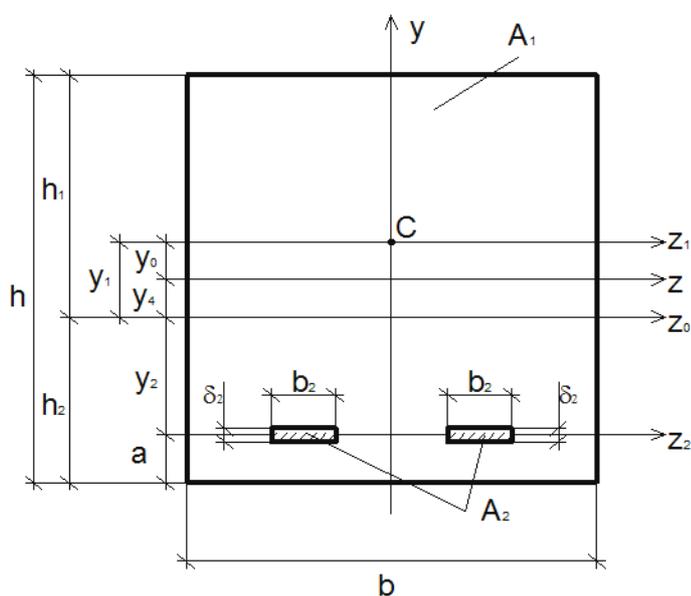


Рис. 2.10. Поперечное сечение образца: Y , Z – главные центральные оси площади A ; Z_1 – главная центральная ось площади A_1 ; C – центр тяжести площади A_1

Данная схема испытаний моделирует наиболее опасный случай работы льда под нагрузкой: участки, где лёд завис над водой (а не плавает в ней).

Площадь поперечного сечения образца, m^2 ,

$$A = bh, \quad (2.1)$$

где b – ширина поперечного сечения образца, м; h – высота поперечного сечения образца, м.

Площадь основного поперечного сечения образца без учёта арматуры, m^2 ,

$$A_1 = A - A_2, \quad (2.2)$$

где A_2 – площадь поперечного сечения арматуры, м^2 , определяемая по формуле

$$A_2 = 2\delta_2 b_2, \quad (2.3)$$

где b_2 – ширина поперечного сечения арматуры, м; δ_2 – высота поперечного сечения арматуры, м.

При действии нагрузки балка испытывает две стадии напряжённого состояния.

Первая стадия продолжается от момента нагружения до момента образования первой трещины, нормальной к его продольной оси. Первая трещина образуется в опасном сечении под нагрузкой при достижении растягивающими напряжениями значений, равных расчётному сопротивлению льда на растяжение ($\sigma_0 = R_{\text{раст}}$). Рассмотрим данную стадию более подробно.

Определим положение нейтральной оси Z_0 поперечного сечения армированного образца.

Статический момент сечения льда (S_1) и арматуры (S_2) относительно нейтральной оси

$$S_1 = A_1 y_1, \quad (2.4)$$

где y_1 – расстояние от нейтральной оси Z_0 до оси Z_1 , м.

$$S_2 = A_2 y_2, \quad (2.5)$$

где y_2 – расстояние от нейтральной оси Z_0 до центра тяжести поперечного сечения арматуры, м.

$$y_2 = \frac{h}{2} - a - y_1 + y_0, \quad (2.6)$$

где a – расстояние от центра тяжести поперечного сечения арматуры до нижней грани образца, м.

$$y_0 = \frac{A_2}{A_1} \left(\frac{h}{2} - a \right). \quad (2.7)$$

Если учесть, что $\sum \int \sigma dA = \sum_{A_{\text{сж}}} \int \sigma dA + \sum_{A_{\text{раст}}} \int \sigma dA = 0$, тогда статический момент армированного сечения относительно нейтральной оси должен быть равен нулю:

$$\sum S_{Z_0} = 0. \quad (2.8)$$

Армирование делает рассматриваемое сечение неоднородным. Для решения задачи приведём его к однородному виду, тогда нулю должен быть равен приведённый статический момент $S_{\text{прив}}$:

$$S_{\text{прив}} = A_1 y_1 - A_2 y_2 \frac{E_2}{E_1} = 0,$$

где E_1 – модуль упругости льда, МПа; E_2 – модуль упругости арматуры, МПа.

С учётом (2.7) и (2.8) получаем

$$y_1 = \frac{A_2 \frac{E_2}{E_1} \left(\frac{h}{2} - a \right) \left(1 + \frac{A_2}{A_1} \right)}{A_1 + A_2 \frac{E_2}{E_1}}. \quad (2.9)$$

Момент инерции J основной части сечения без учёта арматуры относительно оси Z

$$J = \frac{bh^3}{12}. \quad (2.10)$$

Момент инерции J_2 сечения арматуры относительно нейтральной оси Z_0

$$J_2 = \frac{b_2 \delta_2^3}{6} + A_2 y_2^2. \quad (2.11)$$

Момент инерции J_1 площади A_1 относительно нейтральной оси Z_0

$$J_1 = (J + A y_1^2) - J_2. \quad (2.12)$$

Модуль упругости и момент инерции приведённого сечения:

$$E_{\text{прив}} = E_1 \frac{J_1}{J} + E_2 \frac{J_2}{J}, \quad (2.13)$$

$$J_{\text{прив}} = J_1 + \frac{E_2}{E_1} J_2, \quad (2.14)$$

$$E_{\text{прив}} J = E_1 J_{\text{прив}}.$$

Определяем напряжения, возникающие во льду и арматуре.

Напряжения в основной части поперечного сечения, состоящей из льда,

$$\sigma_1 = \frac{E_1}{E_{\text{прив}}} \frac{M}{J} y_1, \quad (2.15)$$

где M – изгибающий момент в опасном сечении ($-h_2 \leq y \leq h_1$).

$$M = \frac{Fl}{4}, \quad (2.16)$$

где F – сила, действующая на образец, кН; l – расстояние между опорами, м.

Напряжения в арматуре

$$\sigma_2 = \frac{E_2}{E_{\text{прив}}} \frac{M}{J} y_2. \quad (2.17)$$

Определим равнодействующие внутренних сил (рис. 2.11), возникающих в растянутой и сжатой зонах поперечного сечения (R_2 и R_1):

$$R_1 = \frac{1}{2} \sigma_1 h_1 \cdot b, \quad (2.18)$$

$$R_2 = \frac{1}{2} \sigma_2 h_2 \cdot b. \quad (2.19)$$

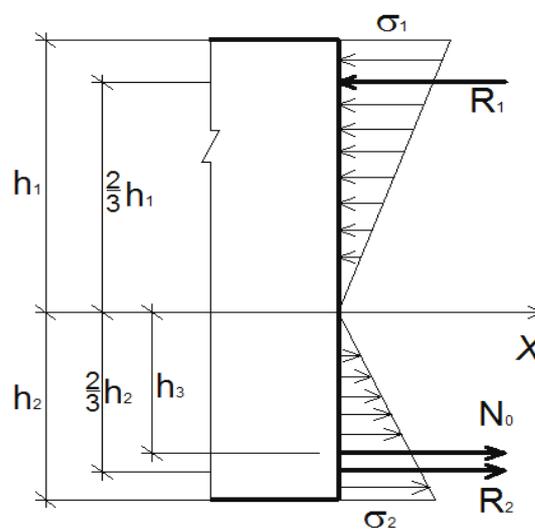


Рис. 2.11. Расчётная схема для определения R_1 , R_0 и N_0 в первой стадии

Растягивающее усилие в арматуре N_0 определяем из условия

$$\sum X = N_0 - R_1 + R_2 = 0 \Rightarrow N_0 = R_1 - R_2. \quad (2.20)$$

Первая стадия напряжённо-деформированного состояния балки завершается в момент появления в ней поперечной трещины. При проведении лабораторных испытаний образование первой трещины, нормальной к продольной оси балки, происходило при достижении нагрузки от 3,8 до 7 кН, т.е. при достижении предела прочности $R_{из2}$, равного 0,4÷0,8 МПа (его величина зависит от физических свойств льда).

Построив график (рис. 2.12) зависимости растягивающих напряжений от приложенной нагрузки (на основании известных теоретических данных), мы получили значения, которые соответствуют данным, полученным в ходе лабораторных исследований.

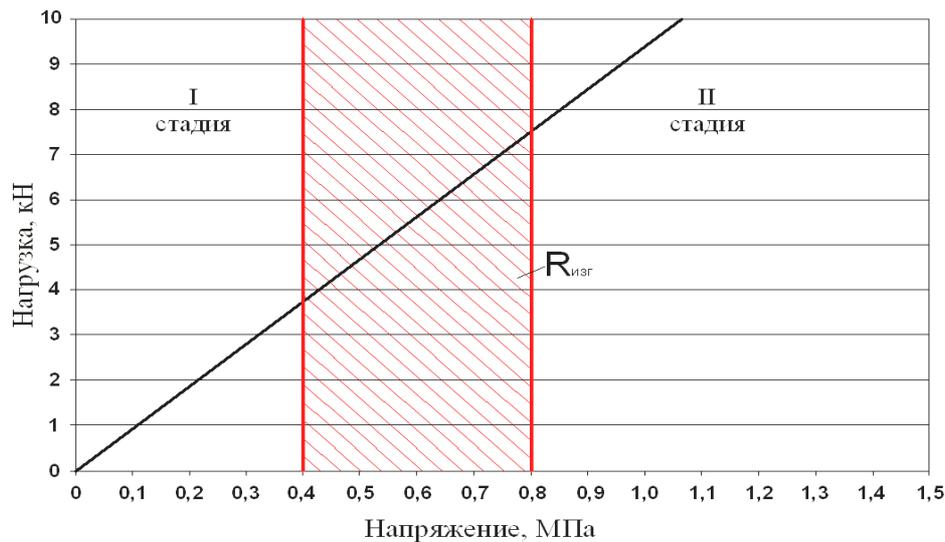


Рис. 2.12. Зависимость растягивающих напряжений от приложенной нагрузки

Исследования армированных и неармированных образцов льда (рис. 2.13) показали различия в их работе.

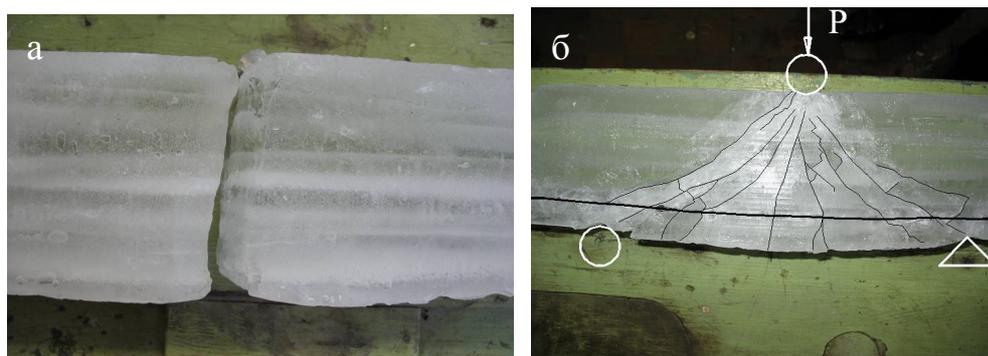


Рис. 2.13. Разрушение неармированного (а) и армированного (б) образцов

При достижении предела прочности ($\sigma_l = R_{изг}$) в балке появляется поперечная трещина. При этом неармированный образец разрушается, образуя две призматические части. Если же образец армирован, то после появления первой трещины он не разрушается, а переходит на *вторую стадию*. При этом происходит скачкообразное падение нагрузки, а затем плавный её рост (рис. 2.14), чередующийся с последующими скачками падения, являющимися результатом продолжающегося трещинообразования и постепенного разрушения арматуры.

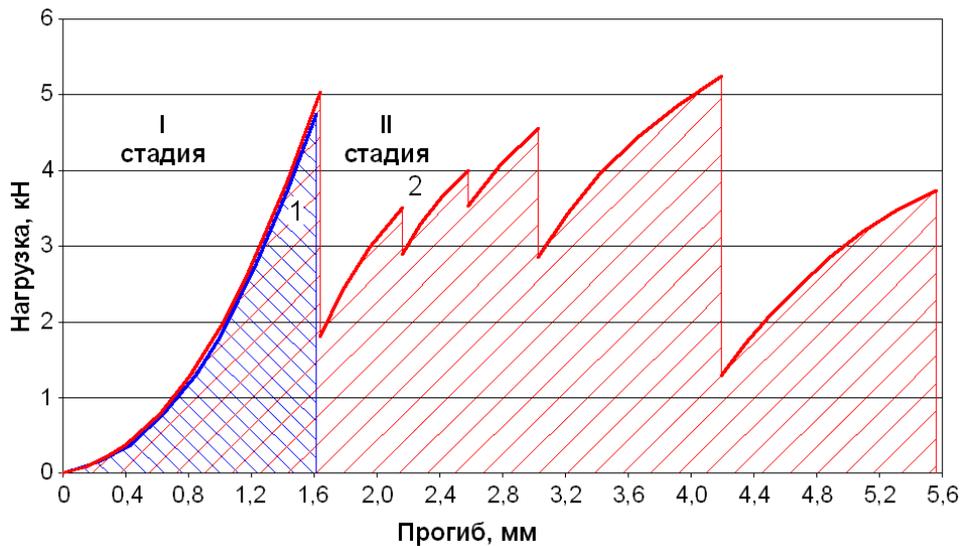


Рис. 2.14. Диаграмма, иллюстрирующая характер разрушения армированных и неармированных балок изо льда:
1 – неармированный образец; 2 – армированный образец

Во второй стадии в работу вступает армирующий материал. Длительность работы образца во второй стадии (до момента полного разрушения) зависит от прочности и деформативности армирующего материала и силы сцепления между армирующим и армируемым материалами.

Вторая стадия характеризуется дальнейшим развитием трещинообразования (как по величине раскрытия трещин, так и по их количеству). При этом образование новых трещин в балке происходит при более высоких напряжениях в арматуре. С ростом деформаций в растянутой зоне и в арматуре происходит увеличение напряжений, как в ледовом массиве, так и в армирующем геосинтетическом материале. При этом растягивающие напряжения во льду достигают предельных значений раньше, чем в армирующем материале.

В конце второй стадии ширина раскрытия трещин и прогиб балки становятся настолько большими, что конструкция не способна воспринимать дополнительную нагрузку.

Конец второй стадии характеризуется нарушением сплошности льда. Лёд начинает работать как дискретный материал, что приводит к разрушению образца без разрушения арматуры (см. рис. 2.13, б).

После образования трещины (вторая стадия) расчётная схема и схема действия сил показаны на рис. 2.15.

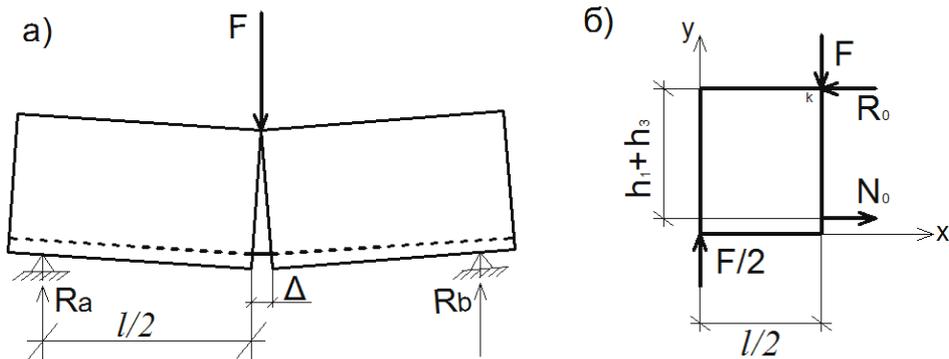


Рис. 2.15. Расчётная схема работы балки (а) и схема действия сил (б) на фрагмент балки во второй стадии

Растягивающее усилие в арматуре (N_0) находим из условия равновесия фрагмента балки ($\sum M_k = 0$):

$$N_0 = \frac{Fl}{4(h_1 + h_3)}. \quad (2.21)$$

Для оценки состояния образца на второй стадии используем модель плоского напряжённого состояния. Напряжение определяем при помощи функции напряжений Эри $\varphi(x, y)$ [86]:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2}, \\ \sigma_y &= \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2}, \\ \tau_{xy} &= -\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial y} - Xy - Yx, \end{aligned} \right\} \quad (2.22)$$

где X, Y – постоянные объёмные силы.

Решение плоской задачи заключается в определении функции напряжений $\varphi(x, y)$ из бигармонического уравнения (2.22):

$$\frac{\partial^4 \varphi}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \varphi}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \varphi}{\partial y^4} = 0. \quad (2.23)$$

Используя метод конечных разностей [87], исследуемую плоскость разобьём на сетку с прямоугольными ячейками размерами Δx и Δy . Для упрощения расчётов сетку выберем с квадратными ячейками:

$\Delta x = \Delta y = \gamma$. Бигармоническое уравнение в конечных разностях, записанное для произвольной точки (рис. 2.16), имеет вид

$$20\varphi_0 - 8(\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4) + 2[\varphi_6 + \varphi_8 + \varphi_{10} + \varphi_{12} + (\varphi_5 + \varphi_7 + \varphi_9 + \varphi_{11})] = 0. \quad (2.24)$$

Уравнение (2.23) связывает между собой значения функции φ в тринадцати точках разностной сетки (см. рис. 2.16).

Напряжения в точке 0 без учёта объёмных сил

$$\left. \begin{aligned} (\sigma_x)_0 &= \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} \right)_0 = \frac{1}{\gamma^2} (\varphi_2 - 2\varphi_0 + \varphi_4), \\ (\sigma_y)_0 &= \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} \right)_0 = \frac{1}{\gamma^2} (\varphi_1 - 2\varphi_0 + \varphi_3), \\ (\tau_{xy})_0 &= - \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial y} \right)_0 = - \frac{1}{4\gamma^2} (\varphi_6 - \varphi_8 + \varphi_{10} - \varphi_{12}). \end{aligned} \right\} \quad (2.25)$$

Уравнения вида (2.24) можно составить для каждого из узлов внутри контура. При этом в часть уравнений войдут и значения функций φ для узлов на контуре и для узлов, расположенных на расстоянии одного шага вне контура. На рис. 2.16 внеконтурная сетка показана штрихами.

Значения функции φ на контуре и вне контура находят из граничных условий. Таким образом, неизвестных значений функции окажется столько, сколько узлов внутри контура, но столько же можно составить уравнений вида (2.25).

Значения функции на контуре и вне его найдём из предположения А.П. Синицына о том, что значение φ на контуре исследуемой области принимается равным значениям изгибающего момента в балке с такой же нагрузкой, что и на краю данной области.

Если на верхней грани прямоугольной области приложена нагрузка $q(x)$, направленная вниз, то для этой грани можно составить следующее условие:

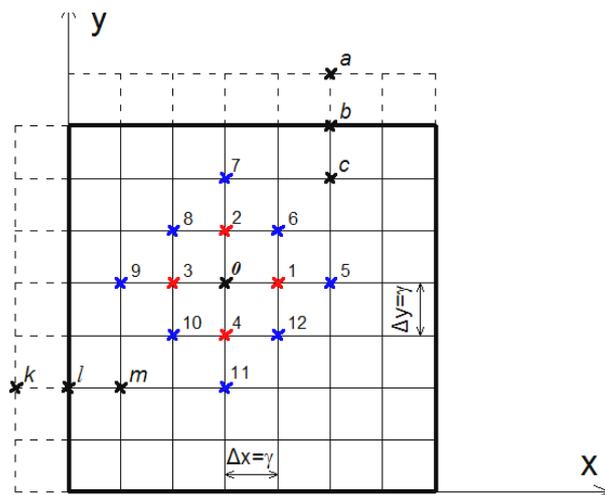


Рис. 2.16. Область, разбитая на ячейки

$$\sigma_y = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} = -q. \quad (2.26)$$

Сравнивая это соотношение с зависимостью между изгибающим моментом и интенсивностью распределённой нагрузки при изгибе балок $\frac{d^2 M}{dx^2} = -q$, заключаем, что функцию напряжений φ на контуре пластинки можно принять за значение изгибающего момента в данной точке для балки с такой же нагрузкой. При этом закрепления балки можно принимать любые, так как крепление оказывает влияние только на значения постоянных, появляющихся после интегрирования соотношения (2.26):

$$\varphi = M + C_1 x + C_2. \quad (2.27)$$

На величину напряжений закрепления балки влияния не окажут, так как напряжение σ_y равно второй части производной функции φ по x и постоянные C_1 и C_2 исчезают. На нижней грани пластинки функцию φ следует брать равной значению изгибающего момента с обратным знаком. Производные от функции φ на верхней и нижней гранях $\frac{\partial \varphi}{\partial x}$, а на боковых гранях $\frac{\partial \varphi}{\partial y}$ представляют собой поперечные силы в соответствующих точках балки.

Производные на верхней, нижней и на боковых гранях можно найти из формулы

$$\tau_{xy} = -\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial y}. \quad (2.28)$$

Значения производных в точках контура можно использовать и для определения значений функции в точках вне контура. Так, для точки b (см. рис. 2.16) можно составить следующее соотношение:

$$\left(\frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)_b = \frac{1}{2\gamma} (\varphi_a - \varphi_c). \quad (2.29)$$

Из выражения (2.29) находим значение функции φ в точке a , расположенной вне контура пластинки:

$$\varphi_a = \varphi_c + 2\gamma \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)_b. \quad (2.30)$$

Точно так же для точки l , лежащей на боковой грани:

$$\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x}\right)_l = \frac{1}{2\gamma}(\varphi_m - \varphi_k). \quad (2.31)$$

Из выражения (2.31) находим значение функции φ в точке k , лежащей вне контура пластинки:

$$\varphi_k = \varphi_m - 2\gamma \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x}\right)_l. \quad (2.32)$$

В результате плоская задача сводится к определению функции $\varphi(x, y)$ во всех узлах сетки.

Для решения задачи исследуемая нами область была разбита на ячейки (рис. 2.17) размерами $\Delta x = \Delta y = 1$ см. В результате мы получили 14 узлов по оси Y и 11 узлов по оси X .

В результате расчётов были вычислены нормальные напряжения σ_x , σ_y , касательные τ_{xy} и главные напряжения σ_{\max} и σ_{\min} , которые были определены по формуле

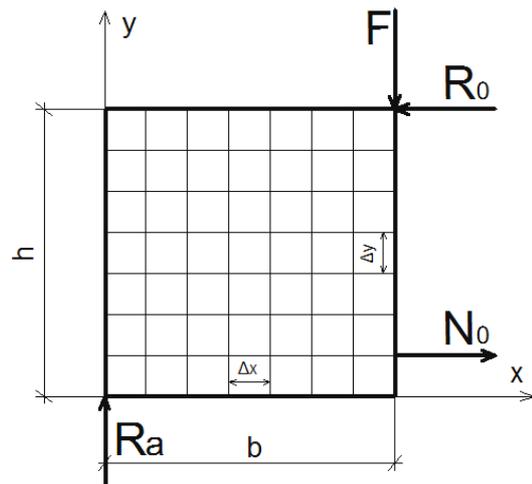


Рис. 2.17 Конечно-разностная дискретизация фрагмента исследуемой балки

$$\sigma_{\max, \min} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}. \quad (2.33)$$

По результатам расчёта построены эпюры напряжений (рис. 2.18 – 2.22).

Угол наклона нормали главной площадки определяется по выражению

$$\operatorname{tg} 2\alpha_0 = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y}. \quad (2.34)$$

Если угол имеет положительное значение, то он откладывается против часовой стрелки, если угол имеет знак минус, то по часовой стрелке.

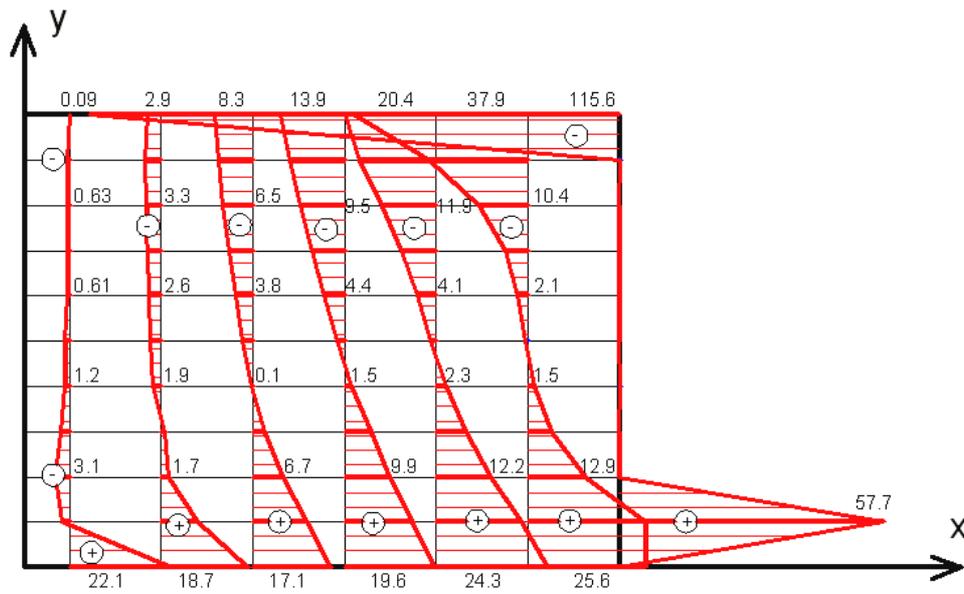


Рис. 2.18. Эпюра нормальных напряжений σ_x

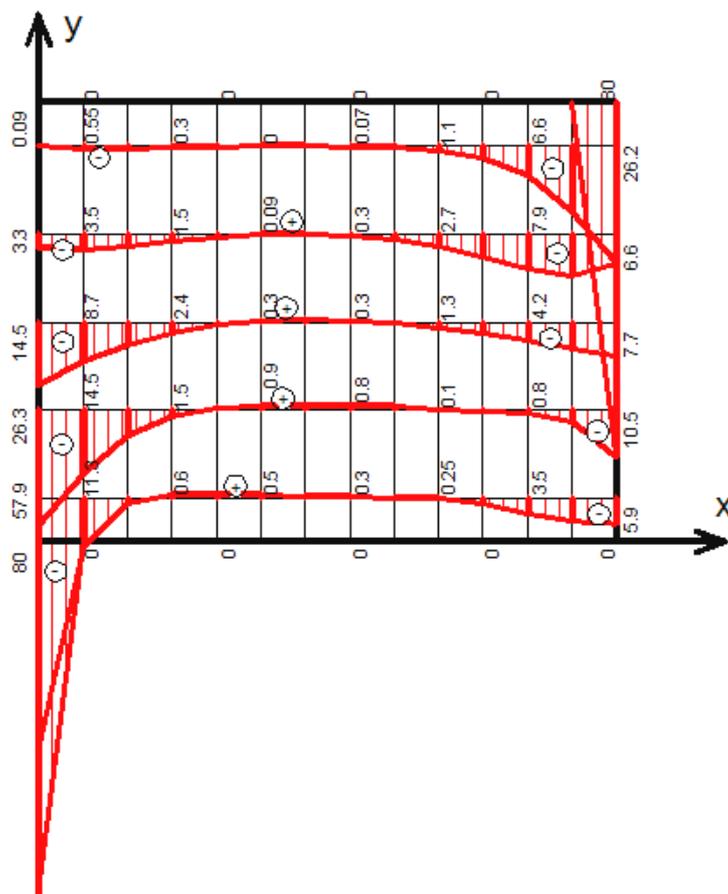


Рис. 2.19. Эпюра нормальных напряжений σ_y

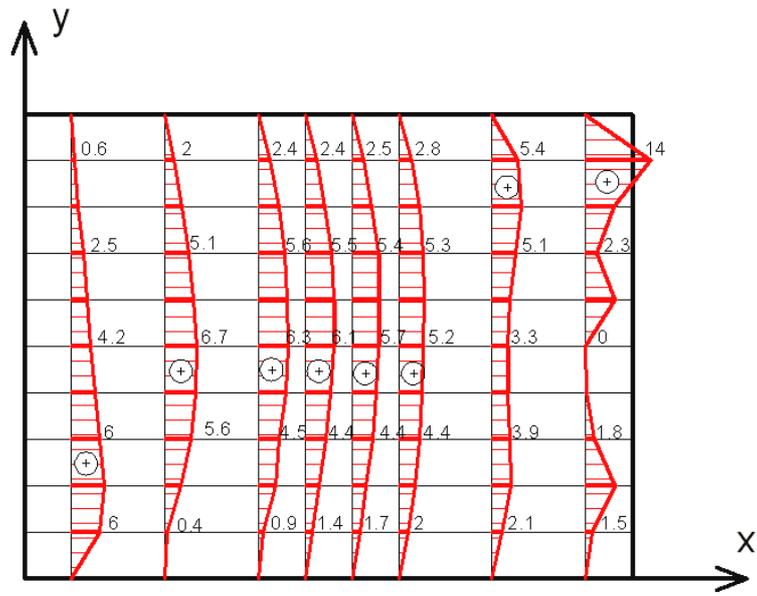


Рис. 2.20. Эпюры касательных напряжений τ_{xy}

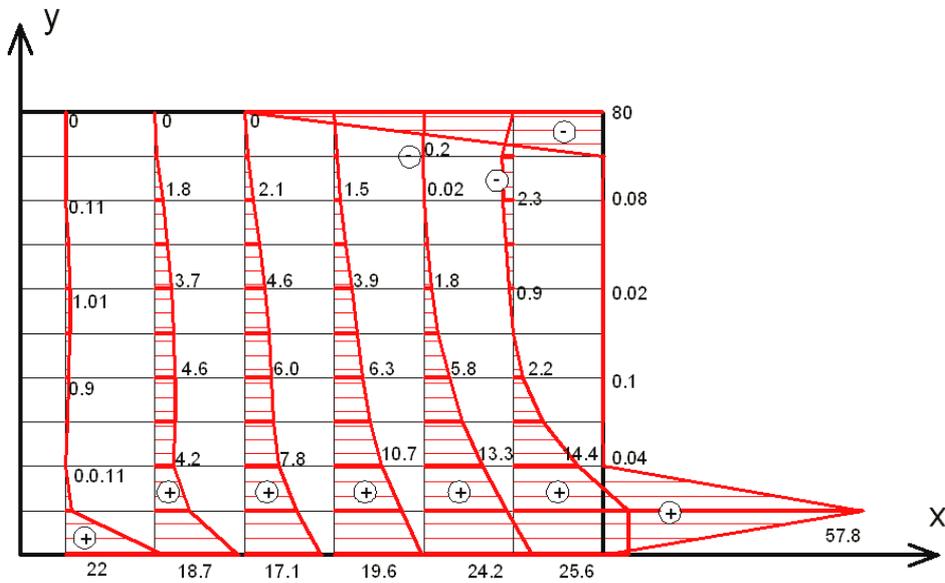


Рис. 2.21. Эпюры главных максимальных напряжений σ_{\max}

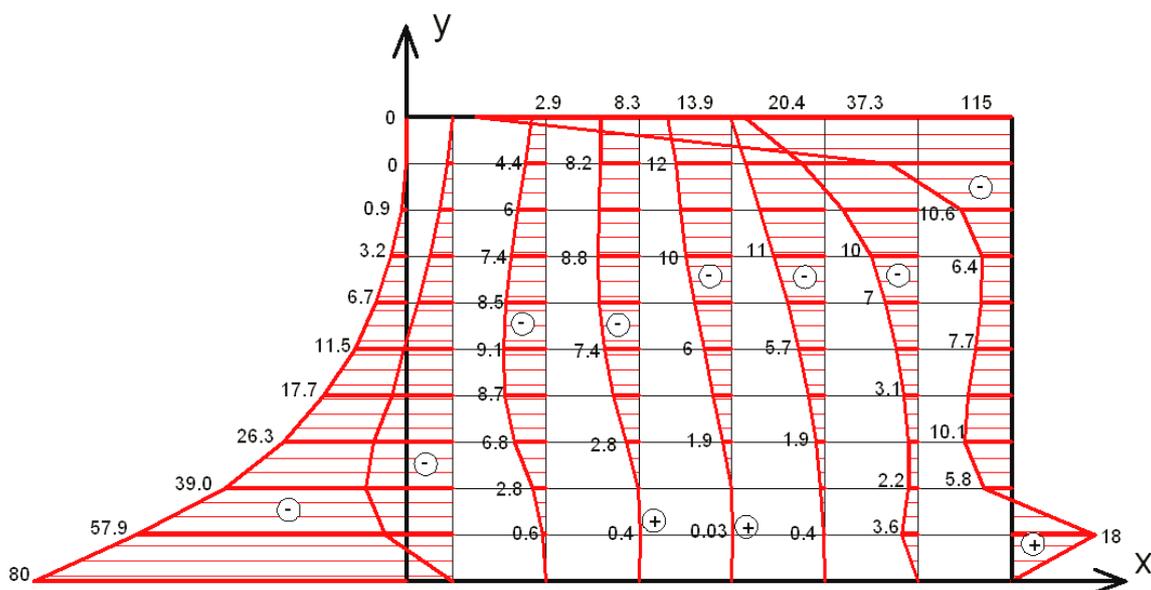


Рис. 2.22. Эпюра главных минимальных напряжений σ_{\min}

По результатам вычислений были построены изолинии действия главных напряжений (рис. 2.23).

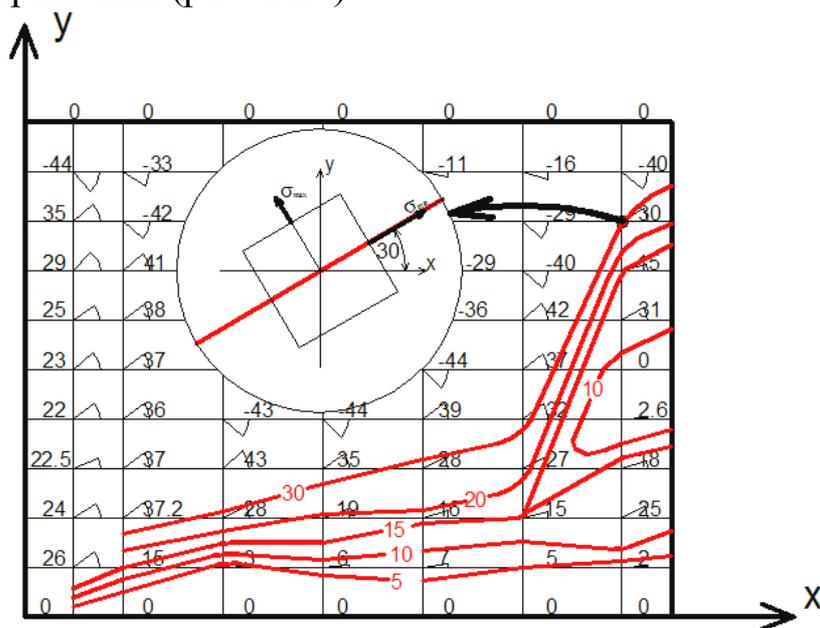


Рис. 2.23. Изолинии действия главных напряжений

Сравнивая полученные изолинии с трещинами, образующимися в образцах при проведении лабораторных испытаний (см. рис. 2.13, б), можем сделать заключение, что наклон и зона локализации трещин достаточно хорошо совпадают с аналогичными характеристиками изолиний. Это подтверждает адекватность выбранной модели армированного образца [88].

2.4. Методы определения несущей способности ледового покрова

Методы расчёта и определения несущей способности ледовых переправ (рис. 2.24) условно можно разделить на теоретические и прикладные [89].



Рис. 2.24. Классификация методов определения несущей способности ледовых переправ (* – к дополнительным измерениям не относится определение толщины ледового покрова)

В случаях, когда необходимо быстро определить несущую способность ледового покрова, пользуются прикладными методами (таблицы, диаграммы, графики). Они, в свою очередь, подразделяются на две категории: приближённые и точные. К приближённым относятся методы без проведения дополнительных измерений на ледовом покрове (к дополнительным измерениям не относится определение толщины ледового покрова). По температуре воздуха и тол-

щине ледового покрова определяется допустимая нагрузка на лёд, скорость движения и дистанция между автомобилями.

К точным относятся методы с определением дополнительных параметров ледового покрова. Для этого из ледового покрова могут выпиливаться балки, они испытываются при помощи мобильных прессов (определяется предел прочности при изгибе). Также было предложено определять несущую способность ледового покрова при помощи малокалиберного спортивного пистолета [90].

Также известен способ, который рекомендуется нормативными документами [2], – протаскивание контрольного груза с массой, превышающей на 10 % массу гружёного транспортного средства.

Теоретические методы тоже можно разделить на приближённые и точные. Приближённые методы рассматривают одиночную нагрузку (короткие передачи) и основываются на эмпирических зависимостях (П.И. Лебедев), принципе аналогии (М.М. Корунов) или являются упрощением точных методов (М.М. Казанский и А.Р. Шульман) [89].

К числу упрощённых расчётных приёмов относится метод аналогий, основанный на том, что при изгибе пластинки по цилиндрической поверхности возникающие напряжения будут равны напряжениям в бруске прямоугольного сечения высотой h , равной толщине льда, и шириной $b=1$. Нагрузка на лёд прямо пропорциональна квадрату его толщины. По величине нагрузки и толщине льда для нормальной работы ледяного покрова можно произвести расчёт для любой толщины льда и нагрузки.

М.М. Корунов, предложивший этот метод, взял опытные данные, при которых лёд кристаллической структуры толщиной 24 см выдерживал груз массой $P = 6$ т и получил для практических расчётов следующую формулу:

$$h = 10\sqrt{P} \quad \text{или} \quad P = \frac{h^2}{100}, \quad (2.35)$$

где P – нагрузка, т; h – толщина льда, см.

Метод аналогии достаточно прост и даёт для предварительных расчётов вполне удовлетворительные результаты. Однако на практике редко бывают аналогичные условия, кроме того, несмотря на то, что толщина льда является одной из основных характеристик, её недостаточно для определения несущей способности льда. Более достоверными являются формулы, полученные при решении осесимметричной

задачи. Так, например, в работе [55] приведена зависимость вида

$$P = \frac{B}{N} h^2 K S, \quad (2.36)$$

где P – допускаемая нагрузка на лёд, т; B – коэффициент распределения нагрузки (100 – для колёсных грузов и 125 – для гусеничных массой до 18 т и 115 – массой более 18 т); h – наименьшая фактическая толщина льда без снега, м; K – температурный коэффициент, определяемый по формуле

$$K = \frac{100 + \Theta}{100}, \quad (2.37)$$

где Θ – температура воздуха за истекшие трое суток, при положительных температурах $K = 1 - 0,05n_1$, n_1 – число суток с момента появления на льду воды; N – коэффициент запаса прочности и учёта трещин (табл. 2.4); S – коэффициент учёта солёности (1,0 – для пресных льдов и 0,7 – для солёных).

Таблица 2.4. Значения коэффициента запаса N для вычисления допускаемых напряжений

Тип переправы	Ледовый покров			
	ненарушенный, постоянной толщины	неравномерной толщины	с сухими трещинами	со сквозными трещинами
Единовременные или периодически действующие автомобильные переправы с пропуском грузов на пределе прочности	1,0	1,20	1,25	1,6
Автотранспортные и гужевые трассы без верхнего строения, действующие периодически	1,20	1,50	1,75	2,0
Автотранспортные и гужевые трассы без верхнего строения, действующие постоянно	1,50	1,50	1,75	–
Автотранспортные и гужевые трассы с верхним строением, действующие постоянно	1,30	1,30	1,50	–
Железнодорожные переправы	2,0	2,0	2,0	–

Точные методы основаны на положениях строительной механики. Плавающий ледовый покров рассматривается как упругая плита неограниченных размеров на упругом основании. Эти методы пригодны, когда ширина реки составляет не менее 150 толщин льда.

Из точных методов наиболее распространены методы С.А. Бернштейна, К.Е. Иванова – И.С. Песчанского. Оба метода позволяют вес-

ти расчёт для одиночной нагрузки и сцепа из многих единиц подвижного состава [89].

Теория упругости даёт точное теоретическое решение задачи об упругой деформации ледяного покрова как упругой тонкой плиты бесконечных размеров, покоящейся на упругом основании для двух основных схем статических нагрузок:

I. Для равномерно распределённой нагрузки по площади круга некоторого радиуса (осесимметричная задача) [55].

II. Для нагрузки равномерно распределённой по площади бесконечно длинной полосы (цилиндрический изгиб).

Решение практических задач обычно сводится к одной из двух схем в зависимости от соотношения длины и ширины грузовой площадки. В обоих случаях предполагается, что размеры ледового покрова не ограничены во всех направлениях. Практически это означает, что размеры ледового поля должны превосходить размеры области прогибов [55].

Осесимметричная задача

Для случая осесимметричной задачи Д.Ф. Панфиловым получено выражение для определения допустимой нагрузки:

$$P = \frac{\sigma_{\max} h^2}{3(1+\nu)l^2 c_2 \left(\frac{r_0}{l}\right)}, \quad (2.38)$$

где σ_{\max} – максимально допустимые нормальные напряжения, МПа; ν – коэффициент Пуассона; r_0 – радиус грузовой площадки, м; l – характеристика ледового покрова, зависящая от толщины льда, модуля упругости и коэффициента Пуассона; $c_2 \left(\frac{r_0}{l}\right)$ – функция, определяемая графически; h – толщина льда, м.

Авторы, принимая некоторые упрощения (коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$ для морского и пресного льда; модуль упругости для весеннего льда при температуре выше минус 5°C , равным 10^3 МПа, для зимнего льда при температурах ниже минус 25°C с очищенным снежным покровом $5,5 \cdot 10^3$ МПа), получил следующие расчётные зависимости:

1) для весеннего слабого льда

$$P = \frac{\sigma_{\max} h^{5/4}}{13,2(1,16r_0 - h^{3/4})}; \quad (2.39)$$

2) для зимнего льда под снежным покровом

$$P = \frac{\sigma_{\max} h^{5/4}}{26,4(0,823r_0 - h^{3/4})}; \quad (2.40)$$

3) для зимнего льда при температурах воздуха ниже минус 25 °С и расчищенном снежном покрове

$$P = \frac{\sigma_{\max} h^{5/4}}{31(0,76r_0 - h^{3/4})}. \quad (2.41)$$

Определяя несущую способность льда (T) по уравнениям осесимметричной задачи, авторы использовали различные способы решения этой задачи, в результате чего были получены следующие зависимости:

$$\text{С.А. Бернштейн: } P = \frac{m\sigma h^2}{3(1+m)C_\alpha}; \quad (2.42)$$

Государственный гидрологический институт:

$$P = \frac{2,56\sigma r^2 \sqrt{h}}{\sqrt{E} \cdot C_2 \left(\frac{r}{l}\right)}; \quad (2.43)$$

$$\text{А.В. Гастаев: } P = \frac{\sigma h^2}{0,42 - 1,47 \lg \alpha}; \quad (2.44)$$

$$\text{Н.К. Снитко: } P = A \frac{h^2}{W(\alpha\lambda)} = \frac{\pi^2 \sigma}{3(1+\nu)} \frac{h^2}{W(\alpha\lambda)}; \quad (2.45)$$

$$\text{А.Р. Шульман: } P = 0,375(h^2 + 7,8rE^{1/4}h^{5/4}); \quad (2.46)$$

$$\text{Д.Ф. Панфилов: } P = 0,375h^2(1 + 4,1\alpha); \quad (2.47)$$

$$\text{И.С. Песчанский: } P = \frac{\sigma h^{5/4}}{31(0,76r - h^{5/4})}, \quad (2.48)$$

где P – допустимая масса груза, т; σ – временное сопротивление льда на изгиб, 10^{-2} МПа; h – толщина льда, м; E – модуль упругости льда, 10^{-2} МПа; r – радиус эквивалентной круглой грузовой площадки при фактической грузовой площадке в форме прямоугольника длиной L и шириной a , м:

$$r = 0,5\sqrt{aL}; \quad (2.49)$$

m – обратное значение коэффициента Пуассона, т.е $m = \frac{1}{\nu}$; α – коэффициент распределения нагрузки; l – жёсткость льда, м.

$$l = \sqrt[4]{\frac{m^2 E h^3}{12(1-m^2)}} = \sqrt[4]{\frac{E h^3}{10,9}}, \quad (2.50)$$

где C_α и $W(\alpha\lambda)$ – сложные подынтегральные функции, определяемые графически [91]; C_2 – постоянная интегрирования.

Как видно, несущая способность покрова зависит от многих переменных величин: $P = f(h, \sigma, r, E, \mu)$. Все уравнения для определения несущей способности льда можно разделить на точные теоретические (С.А. Бернштейн, А.В. Гастаев, К.Н. Снитко), приближённые теоретические (А.Р. Шульман, Д.Ф. Панфилов, И.С. Песчанский) и эмпирические. К последним относятся:

– формула М.М. Корунова для определения веса расчётного груза (т):

$$P = 100h^2, \quad (2.51)$$

– формула для подсчёта разрушающего или проломного груза (т), предложенная Ленинградским физико-техническим институтом АН СССР:

$$P = 200h^2(\alpha). \quad (2.52)$$

Случай изгиба ледового покрова по цилиндрической поверхности.

Если представить, что на ледовый покров, представляющий собой ледяную плиту неограниченных размеров, действует нагрузка, равномерно распределённая по бесконечно длинной полосе шириной d , то слой изогнётся по некоторой цилиндрической поверхности. Задача об изгибе плиты сводится к задаче об изгибе бесконечно длинной балки или полосы шириной 1м, лежащей на упругом основании, нагруженной равномерно распределённой нагрузкой q на участке длиной d .

Если допускаемое нормальное напряжение для льда σ_{\max} , то выражение для максимально допускаемой нагрузки на лёд при ширине полосы нагрузки, равной $d = 0$,

$$P_{\max} = \frac{\sigma_{\max} h^{5/4}}{a_1}, \quad (2.53)$$

где h – толщина плиты; a_1 – коэффициент, зависящий от модуля упругости льда.

$$a_1 = 1,73\sqrt{E}. \quad (2.54)$$

При выборе расчётных случаев приходится учитывать разнообразие условий работы ледовых переправ [45]. Расчёт несущей способности обычно производят на кратковременную статическую нагрузку, так как это наиболее неблагоприятный случай с точки зрения возни-

кающих в ледовом покрове напряжений. На случай непредвиденной остановки груза на льду необходимо учесть запас прочности при пластических деформациях.

При расчёте на кратковременную нагрузку следует пользоваться формулами упругого прогиба.

Анализ вышеприведённых математических моделей (с точки зрения их применения для расчёта армированной ледяной плиты) показал, что наиболее приемлемым и теоретически проработанным методом расчёта является «метод Панфилова» [92].

Сравнительно недавно разработан «метод Матвеева – Немировского» [93], который позволяет определять параметры, которые описывают состояние многослойной плиты, лежащей на упругом основании, в том числе и в случае композитной структуры. С помощью этого метода можно не только учесть наличие во льду армирующей прослойки, но и различия в механических свойствах льда по толщине плиты.

Оба выбранных метода расчёта нуждаются в некоторых уточнениях применительно к рассматриваемой нами задаче. Поэтому вначале целесообразно рассмотреть теоретические основы используемых вычислительных методов.

Метод Панфилова

Известно, что ледовый покров деформируется подобно бесконечной плите, лежащей на упругом основании. При непродолжительном действии нагрузки его деформации удовлетворительно описываются уравнением

$$D \nabla^2 \nabla^2 w = q(x, y) - k_0 w, \quad (2.55)$$

где $D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$ – цилиндрическая жёсткость; E и ν – модуль деформации и коэффициент Пуассона; h и w – толщина и прогиб ледового покрова; $q(x, y)$ – активная нагрузка; k_0 – коэффициент упругого основания (коэффициент постели).

На практике возникает необходимость в расчёте неограниченного ледового покрова на действие ряда грузов, одиночного груза и нагрузки, распределённой по длинной узкой полосе [92].

Одиночные грузы. Формулы прогибов и изгибающих моментов в случае одиночных грузов получаются из уравнений, выведенных для ряда грузов, в результате предельного перехода при $c \rightarrow \infty$ (где c –

расстояние между осями соседних грузов). Если вес груза P распределяется по площади прямоугольника, уравнение упругой поверхности принимает вид

$$w = \frac{P}{2\pi\alpha\beta D} \int_0^{\infty} \frac{\sin \delta a}{\delta \varepsilon^4} [Z_1 Y_{4k}(y) + \lambda^2 S_k(y)] \cos \delta_k x d\delta. \quad (2.56)$$

Все коэффициенты и функции, входящие в эту и последующие формулы, имеют те же обозначения, что и выше, но при написании их опускается индекс k . Изгибающие моменты, действующие в ледовом покрове, определяются уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} M_x &= \frac{P}{2\pi\alpha\beta_0} \int_0^{\infty} \frac{\sin \delta a}{\delta \varepsilon^4} \{T_1 Y_{1k}(y) + T_2 Y_{4k}(y) + \lambda^2 [\delta^2 S_k(y) - v S_k''(y)]\} \cos \delta \cdot x d\delta, \\ M_y &= \frac{P}{2\pi\alpha\beta_0} \int_0^{\infty} \frac{\sin \delta a}{\delta \varepsilon^4} \{T_3 Y_{1k}(y) + T_4 Y_{4k}(y) + \lambda^2 [v \delta_k^2 S_k(y) - S_k''(y)]\} \cos \delta \cdot x d\delta. \end{aligned} \right\} (2.57)$$

В сечении под центром прямоугольника давления моменты принимают наибольшие значения

$$\left. \begin{aligned} M_x &= \frac{P}{4\pi\alpha\beta} \left[\pi \eta_2(a) + 2 \int_0^{\infty} \frac{T_1 \sin \delta a}{\delta \varepsilon^4} d\delta \right], \\ M_y &= \frac{P}{4\pi\alpha\beta} \left[\pi v \eta_2(a) + 2 \int_0^{\infty} \frac{T_3 \sin \delta a}{\delta \varepsilon^4} d\delta \right]. \end{aligned} \right\} (2.58)$$

Осесимметричная задача. Если нагрузка распределяется равномерно по длинной полосе шириной $2b$, происходит цилиндрический изгиб ледового поля [92]. Формулы прогибов и изгибающих моментов имеют вид

$$w = \frac{p}{2bD\lambda^4} [S(y) - \eta_1 Y_1(y) - \eta_2 Y_4(y)]; \quad (2.59)$$

$$M = \frac{p}{2b\lambda^4} [S''(y) - \eta_2 Y_1(y) - \eta_1 Y_4(y)]; \quad (2.60)$$

где p – погонная нагрузка, кг/м.

Наибольший момент развивается в начале координат и имеет величину

$$M = \frac{p}{2b\lambda^2} \eta_2. \quad (2.61)$$

Если нагрузка распределяется равномерно на оси ox , расчётные формулы принимают вид

$$w = \frac{P}{2\sqrt{2}D\lambda^3} [\eta_1(y) + \eta_2(y)]; \quad (2.62)$$

$$M = \frac{P}{2\sqrt{2}\lambda} [\eta_1(y) - \eta_2(y)] \quad (2.63)$$

Наибольшие моменты определяются по формуле [24]

$$M_y = \frac{P}{2\sqrt{2}} l. \quad (2.64)$$

Метод Матвеева – Немировского

Отличительной особенностью слоя дорожной одежды, армированного геосинтетическими материалами, от слоя неармированного является то, что при расчёте армированный слой должен рассматриваться как слой ортотропный, а неармированный – как изотропный. В работе [93] разработана математическая модель упругого слоя многослойной плиты, армированной геосинтетическими материалами, как композитного слоя. Модель представляет собой многослойную конструкцию дорожной одежды, которая состоит из нескольких упругих слоёв (жёстко скреплённых между собой), часть из которых может быть армирована.

Рассмотрим основные положения данной теории. Зависимости между напряжениями и деформациями для упругого слоя, расположенного в плоскости $xу$, имеют вид

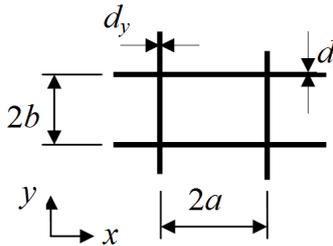
$$\begin{aligned} \sigma_x &= A_{11} \varepsilon_x + A_{12} \varepsilon_y - A_{1T} T; \\ \sigma_y &= A_{21} \varepsilon_x + A_{22} \varepsilon_y - A_{2T} T; \\ \tau_{xy} &= A_{33} \gamma_{xy}, \end{aligned} \quad (2.65)$$

где $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ – напряжения; $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}$ – деформации; $A_{11}, A_{12}, A_{21}, A_{22}, A_{33}$ – упругие постоянные; A_{1T}, A_{2T} – коэффициенты термоупругости; T – температура.

Выражения (2.65) справедливы как для слоя неармированного (изотропного), так и армированного (ортотропного). Упругие постоянные для армированного слоя определяются по формулам [94]

$$\begin{aligned}
A_{11} &= \Omega \frac{E_0}{1-\nu_0^2} + \omega_x E_x; & A_{22} &= \Omega \frac{E_0}{1-\nu_0^2} + \omega_y E_y; \\
A_{12} = A_{21} &= \frac{E_0 \nu_0}{1-\nu_0^2}; & A_{33} &= \frac{E_0}{2(1+\nu_0)},
\end{aligned} \tag{2.66}$$

где E_0, ν_0 – модуль упругости и коэффициент Пуассона основного материала слоя; E_x, E_y – модули упругости армирующих волокон, ориентированных вдоль осей x и y соответственно (рис. 2.26); $\Omega, \omega_x, \omega_y$ – постоянные, определяемые из выражений



$$\omega_x = \frac{d_x}{2b}; \quad \omega_y = \frac{d_y}{2a}; \quad \Omega = 1 - \omega_x - \omega_y. \tag{2.67}$$

Рис. 2.26. Характерная ячейка армирующей геосетки

Постоянные ω_x, ω_y называют интенсивностями армирования в направлении осей x и y соответственно.

Упругие постоянные неармированного слоя определяются из соотношений

$$A_{11} = A_{22} = \frac{E_0}{1-\nu_0^2}; \quad A_{12} = A_{21} = \nu_0 A_{11}; \quad A_{33} = \frac{E_0}{2(1+\nu_0)}. \tag{2.68}$$

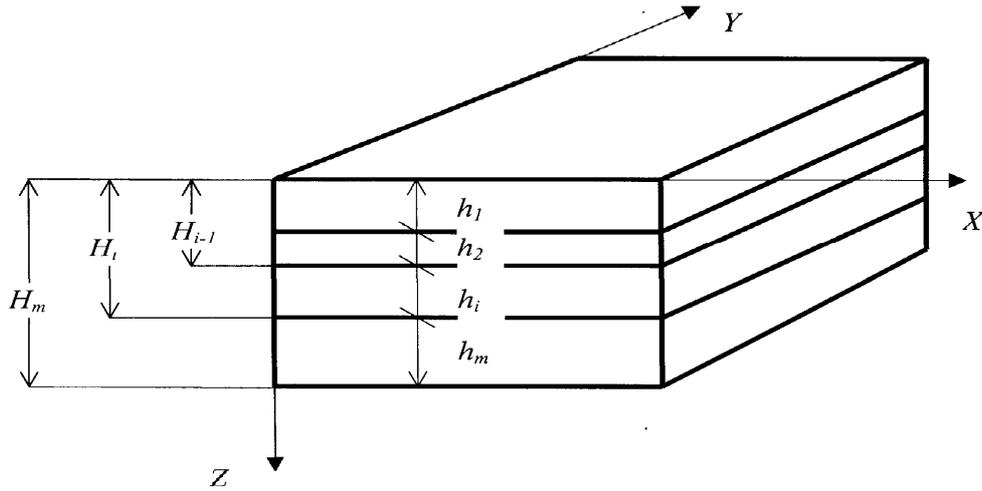
Дифференциальное уравнение цилиндрического изгиба многослойной полиармированной плиты (рис. 2.27) на упругом основании имеет вид [95]

$$\frac{d^4 w}{dx^4} + k^4 w = q^*, \tag{2.69}$$

$$k^4 = \frac{C}{D}; \quad q^* = -\frac{q}{D}, \tag{2.70}$$

где C – коэффициент постели; q – интенсивность равномерно распределенной по поверхности плиты нагрузки; D – постоянная, характеризующая упругие свойства плиты и определяемая из выражения

$$D = d_{11} + c_{11} c_{11}^* + c_{12} c_{21}^* + c_{13} c_{31}^*. \tag{2.71}$$



2.27. Многослойная плита

Постоянные d_{11} , c_{11} , c_{12} , c_{13} определяются из выражений

$$d_{11} = \sum_{i=1}^m A_{11}^i g_i, \quad c_{11} = \sum_{i=1}^m A_{11}^i p_i, \quad c_{12} = \sum_{i=1}^m A_{12}^i p_i, \quad c_{13} = \sum_{i=1}^m A_{13}^i p_i. \quad (2.72)$$

Постоянные p_i , g_i в формулах (2.72) определяются из выражений

$$p_i = \frac{1}{2} (2z_{i-1} + h_i) h_i; \quad g_i = \frac{1}{3} (3z_{i-1}^2 + 3z_{i-1} h_i + h_i^2) h_i. \quad (2.73)$$

Постоянные c_{11}^* , c_{21}^* , c_{31}^* в формуле (2.71) определяются из выражений

$$\begin{aligned} c_{11}^* &= \frac{1}{B} [c_{11}(b_{23}b_{32} - b_{22}b_{33}) + c_{21}(b_{12}b_{33} - b_{13}b_{32}) + c_{31}(b_{22}b_{13} - b_{12}b_{23})]; \\ c_{21}^* &= \frac{1}{B} [c_{11}(b_{21}b_{33} - b_{23}b_{31}) + c_{21}(b_{31}b_{13} - b_{11}b_{33}) + c_{31}(b_{11}b_{23} - b_{13}b_{21})]; \\ c_{31}^* &= \frac{1}{B} [c_{11}(b_{31}b_{22} - b_{32}b_{21}) + c_{21}(b_{11}b_{32} - b_{12}b_{31}) + c_{31}(b_{21}b_{12} - b_{11}b_{22})]; \\ B &= b_{11}b_{22}b_{33} + b_{12}b_{23}b_{31} + b_{13}b_{32}b_{21} - b_{31}b_{22}b_{13} - b_{21}b_{12}b_{33} - b_{11}b_{23}b_{32}. \end{aligned} \quad (2.74)$$

Постоянные c_{11} , c_{21} , c_{31} определяются из выражений (2.72), а постоянные b_{ij} ($i, j = 1, 3$) из следующих соотношений [93]:

$$b_{11} = \sum_{i=1}^m A_{11}^i h_i, \quad b_{12} = \sum_{i=1}^m A_{12}^i h_i, \quad b_{13} = \sum_{i=1}^m A_{13}^i h_i,$$

$$b_{22} = \sum_{i=1}^m A_{22}^i h_i, \quad b_{23} = \sum_{i=1}^m A_{23}^i h_i, \quad b_{33} = \sum_{i=1}^m A_{33}^i h_i. \quad (2.75)$$

При этом справедливы равенства

$$c_{ij} = c_{ji}, \quad b_{ij} = b_{ji} \quad (i, j = 1, 3). \quad (2.76)$$

В том случае, если армирование k -го слоя выполнено с использованием геосетки, то в формулы (2.75) необходимо внести изменения:

$$\begin{aligned} b_{11} &= \sum_{i=1}^{k-1} A_{11}^i h_i + A_{11}^k h_k + \sum_{i=k+1}^m A_{11}^i h_i; & b_{12} &= \sum_{i=1}^{k-1} A_{12}^i h_i + A_{12}^k h_k + \sum_{i=k+1}^m A_{12}^i h_i; \\ b_{13} &= \sum_{i=1}^{k-1} A_{13}^i h_i + A_{13}^k h_k + \sum_{i=k+1}^m A_{13}^i h_i; & b_{22} &= \sum_{i=1}^{k-1} A_{22}^i h_i + A_{22}^k h_k + \sum_{i=k+1}^m A_{22}^i h_i; \\ b_{23} &= \sum_{i=1}^{k-1} A_{23}^i h_i + A_{23}^k h_k + \sum_{i=k+1}^m A_{23}^i h_i; & b_{33} &= \sum_{i=1}^{k-1} A_{33}^i h_i + A_{33}^k h_k + \sum_{i=k+1}^m A_{33}^i h_i. \end{aligned} \quad (2.77)$$

Уравнение (2.69) является неоднородным дифференциальным уравнением четвёртого порядка. Для его решения используем метод начальных параметров А.Н. Крылова. В частном случае, когда края плиты жёстко защемлены (рис. 2.28), крайевые условия принимают вид

$$\begin{aligned} w(0) &= 0, \quad w'(0) = 0, \\ w(L) &= 0, \quad w'(L) = 0. \end{aligned} \quad (2.78)$$

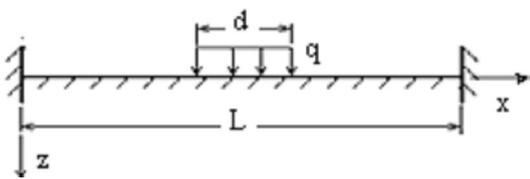


Рис. 2.28. Расчётная схема плиты

Максимальный прогиб определяется по выражению

$$w_{\max} = \left(-M_x(0)F_3(L/2) - Q_x(0)F_4(L/2) - \frac{q}{k^4} [1 - F_1(d/2)] \right) / D, \quad (2.79)$$

где $M_x(0)$ и $Q_x(0)$ – начальные параметры; F_1, F_2, F_3, F_4 – функции Крылова.

2.5. Оценка несущей способности армированного ледового покрова

Как установлено ранее (см. п. 2.4), при выполнении теоретических исследований ледовый покров можно представить в виде бесконечной плиты, лежащей на упругом основании. В настоящей работе для исследования напряжённо-деформированного состояния ледового

покрова использовался вычислительный метод, представленный в работе [94]. Данный метод (модель Матвеева – Немировского) позволяет определять напряжённо-деформированное состояние многослойной плиты, лежащей на упругом основании (рис. 2.29), с учётом включения в состав плиты отдельных слоёв, имеющих композитную структуру, близкую по своим свойствам слоям льда, армированным геосинтетическими материалами.

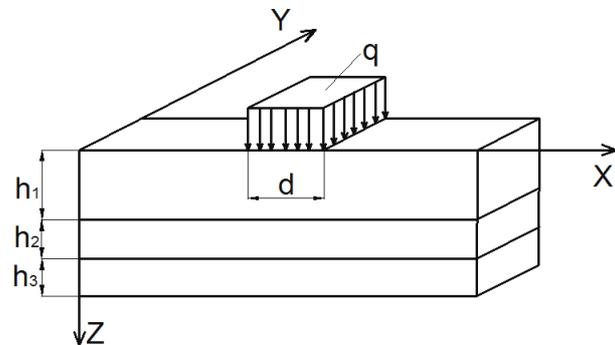


Рис. 2.29. Расчётная схема плиты

Для случая цилиндрического изгиба расчётная схема плиты фактически заменяется расчётной схемой бесконечной полосы на упругом основании. Чтобы заменить бесконечную полосу полосой конечной длины, нужно подобрать её размеры, которые примерно должны быть равными размерам чаши прогибов бесконечной полосы.

В ходе теоретических исследований была установлена связь максимального прогиба с длиной полосы конечных размеров (рис. 2.30), жёстко защемлённой по концам.

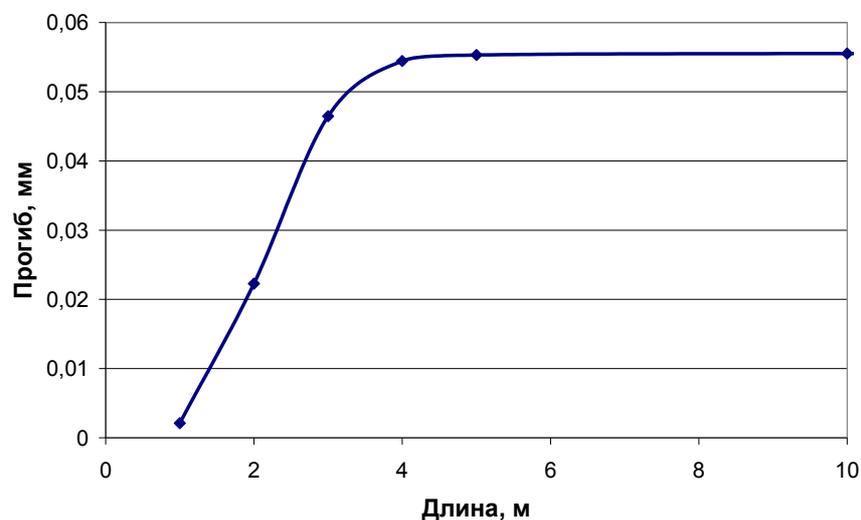


Рис. 2.30. Изменение максимального прогиба в зависимости от длины полосы

Эта зависимость позволила установить, что размеры чаши прогибов (для льда) лежат в пределах участка длиной до пяти метров. Поэтому для дальнейших расчётов была принята длина полосы L , равная пяти метрам [96].

- Приняты следующие расчётные характеристики льда:
- модуль упругости $E_0 = 100$ МПа;
 - коэффициент Пуассона $\nu_0 = 0,35$;
 - коэффициент постели $C = 9,81$ кПа/м [97];
 - интенсивность нагрузки $q = 0,25$ МПа;
 - общая толщина плиты $h = 0,5$ м;
 - толщина нижнего слоя плиты $h_3 = 0,2$ м;
 - толщина армирующего материала h_2 , м, принимается в зависимости от вида материала (табл. 2.5);
 - координата $Z_0 = 0$;
 - ширина грузовой площадки $d = 1$ м.

Таблица 2.5. Принятые характеристики геосинтетических материалов

Характеристика	Материал			
	СТ-100	Поли-40	Поли-30	Поли-20
1	2	3	4	5
Длина / ширина ячейки, мм	50 / 50	33 / 33	39 / 39	39 / 39
Ширина продольной / поперечной полосы, мм	8,0 / 5,0	2,2 / 2,5	2,3 / 2,8	2,2 / 2,4
Толщина, мм:				
– продольной / поперечной полосы	1,0 / 1,0	2,2 / 1,4	2,2 / 1,3	1,1 / 0,8
– стыка	1,0	5,8	5	4,1
Разрывная нагрузка, кН/м по продольным / поперечным нитям	100 / 95	40 / 40	30 / 30	20 / 20
Площадь поперечного сечения продольной / поперечной полосы F_α / F_β , мм ²	8,0 / 5,0	4,84 / 3,5	4,84 / 3,12	2,42 / 1,92
Интенсивность армирования в продольном направлении $\omega_\alpha = \frac{F_\alpha}{d_\alpha \delta}$	0,160	0,067	0,056	0,056
Интенсивность армирования в поперечном направлении $\omega_\beta = \frac{F_\beta}{d_\beta \delta}$	0,10	0,07	0,06	0,06
Общая площадь сечений армирующих полос, приходящихся на 1 п.м продольного сечения слоя, мм ² /м $F_\alpha^* = \frac{F_\alpha}{d_\alpha} \cdot 10^3$	160,0	146,7	124,1	62,0
Характеристика, МПа, $A_{11} = \omega_\alpha E_\alpha$	2500,0	318,2	238,63	236,4
Характеристика, МПа, $A_{22} = \omega_\beta E_\beta$	2125,0	500,0	403,8	375,0

1	2	3	4	5
Общая площадь сечений армирующих полос, приходящихся на 1 п.м поперечного сечения слоя, мм ² /м $F_{\beta}^* = \frac{F_{\beta}}{d_{\beta}} \cdot 10^3$	100,0	106,0	80,0	49,2
Модуль упругости в продольном направлении, МПа, $E_{\alpha} = \frac{\sigma_{\alpha}}{0,02}$	15625,0	4772,7	4230,3	4190,1
Модуль упругости в поперечном направлении, МПа, $E_{\beta} = \frac{\sigma_{\beta}}{0,02}$	21250,0	6600,0	6562,5	6093,8
Напряжение в продольном направлении, МПа, $\sigma_{\alpha} = \frac{N_{\alpha}}{F_{\alpha}^*}$	312,5	95,4	84,6	83,8
Напряжение в поперечном направлении, МПа, $\sigma_{\beta} = \frac{N_{\beta}}{F_{\beta}^*}$	425,0	132,0	131,2	121,8

Используя вышеописанную модель Матвеева – Немировского, мы получили следующие результаты:

– упругие постоянные: $A_{11} = A_{22} = 113,96$ МПа; $A_{12} = A_{21} = 39,89$ МПа; $A_{33} = 37,03$ МПа; $A_{13} = A_{31} = 0$; $A_{23} = A_{32} = 0$.

Максимальный прогиб $W_{\max} = 0,055$ м.

Для сравнения выполнен расчёт по модели Д.Ф. Панфилова, представляющей собой плиту, лежащую на упругом основании, на которой расположен равномерно распределённый груз по площади прямоугольника со сторонами $2a$ и $2b$. В расчёте были использованы те же исходные данные.

В результате расчёта получено, что максимальный прогиб $W_{\max} = 0,060$ м. По полученным результатам построены графики прогибов плиты под нагрузкой (рис. 2.31).

Сравнение результатов расчёта прогиба двумя методами (для неармированного льда) даёт расхождение не более чем на 9 %.

Для расчёта ледового покрова, армированного геосинтетическими материалами, воспользуемся методом Матвеева – Немировского, т.к., в отличие от метода Д.Ф. Панфилова, он позволил учесть наличие во льду геосинтетических материалов.

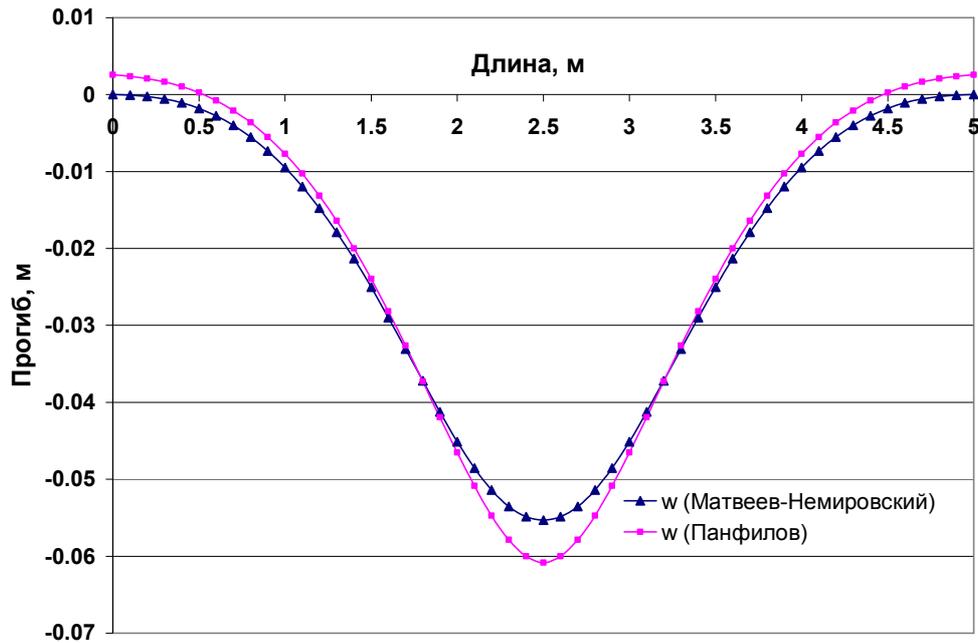


Рис. 2.31. Сравнение прогибов, полученных двумя методами

Для расчёта ледового покрова, армированного геосинтетическими материалами, необходимы дополнительные исходные данные:

- толщина слоя геосинтетического материала $h_2 = 0,003$ м;
- общая толщина льда (с учётом введения в него геосинтетического материала) $h = 0,503$ м.

Характеристики используемых в расчёте геосинтетических материалов приведены в табл. 2.5.

Для армированных слоёв вычислены упругие постоянные, а для всей плиты определены изгибающий момент, поперечная сила и максимальный прогиб в центре грузовой площадки.

Сравнивая прогибы неармированной ледяной плиты с прогибами плиты, армированной различными видами геосинтетических материалов, получаем значения, приведённые в табл. 2.6.

Таблица 2.6. Результаты расчёта

Материал	Модуль упругости, МПа		Прогиб, м	Уменьшение прогиба (по сравнению со льдом без усиления), %
	в продольном направлении, E_α	в поперечном направлении, E_β		
СТ-100	15625	21250	0,0260	56,7
Поли-40	4772,7	6600	0,0492	18,0
Поли-30	4230,4	6562,5	0,0495	17,5
Поли-20	4190,1	6093,8	0,0501	16,4

При введении геосинтетических материалов в ледяную плиту происходит уменьшение максимального прогиба конструкции. Величина снижения максимального прогиба зависит от характеристик используемого материала: наибольшее снижение получено для геосетки марки СТ-100, имеющей максимальную прочность и минимальную деформативность, а минимальные для георешётки марки Поли-20.

Достоверность результатов расчётов по предлагаемым математическим моделям подтверждается удовлетворительным совпадением экспериментальных и теоретических данных. Различия величины уменьшения прогиба, полученного теоретически, и при опытно-производственной проверке составляет от 5 до 20 %.

Для оценки прочности конструкции ледовой переправы, армированной геосинтетическими материалами, определим напряжения в разных слоях ледяной плиты по формуле

$$\sigma_x^i = -A_{11}^i (c_{11}^i + z) w'' . \quad (2.80)$$

Здесь w'' – кривизна, определяемая по формуле

$$w'' = w\left(\frac{L}{2}\right) = -\frac{1}{D} \left[M_x(0) \cdot F_1\left(\frac{L}{2}\right) + Q_x(0) \cdot F_2\left(\frac{L}{2}\right) - q \cdot F_3\left(\frac{L}{2} - x_1\right) \right], \quad (2.81)$$

где x_1 – расстояние от начала координат до начала приложения нагрузки, м.

Для построения эпюры напряжений в армированной плите находим напряжения на верхней и нижней границе каждого слоя (рис. 2.32).

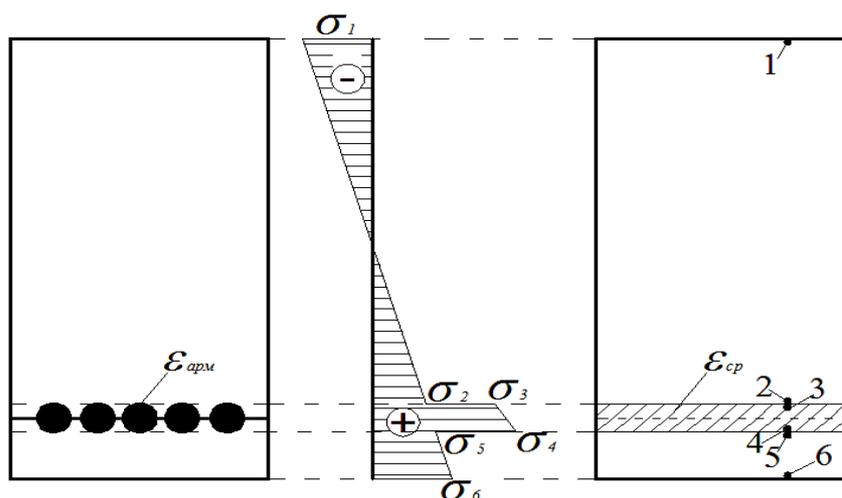


Рис. 2.32. Характерная эпюра нормальных напряжений в армированной ледяной плите

Напряжения σ_x^3 и σ_x^4 возникают в точках 3 и 4 в условном однородном композитном армированном слое, характеристики которого определены в параграфе 2.5. Для определения напряжения в армирующем геосинтетическом материале используем условие равенства относительных деформаций ε_{cp} в композитном слое и относительных деформаций в армирующих волокнах $\varepsilon_{арм}$:

$$\sigma_{арм} = \frac{\varepsilon_{арм}}{E_{арм}}, \quad (2.82)$$

где $E_{арм}$ – модуль упругости армирующего материала, МПа; $\varepsilon_{арм}$ – деформация в армирующем слое, м.

$$\varepsilon_{арм} = \frac{\sigma_{арм}^{cp}}{A_{11}^{арм}}, \quad (2.83)$$

где $\sigma_{арм}^{cp}$ – среднее напряжение в армирующем слое, МПа; $A_{11}^{арм}$ – упругая характеристика композитного армированного слоя, МПа (2.66).

Обозначим в формуле (2.80)

$$B = -A_{11}^i (c_{11}^i + z). \quad (2.84)$$

Запишем выражение для кривизны в виде

$$w'' = K_1 \cdot q + K_2, \quad (2.85)$$

K_1 и K_2 определяются как

$$K_1 = -\frac{1}{D} \left(M_x(0) \cdot F_1\left(\frac{L}{2}\right) + Q_x(0) \cdot F_2\left(\frac{L}{2}\right) \right); \quad (2.86)$$

$$K_2 = \frac{1}{D} F_3\left(\frac{L}{2} - x_1\right).$$

Нагрузка q равна

$$q = \frac{P}{A_0}, \quad (2.87)$$

где P – вес, приходящийся на одно колесо, кН; A_0 – площадь отпечатка колеса, м².

Из условия прочности получаем выражение для определения несущей способности ледового покрова

$$P < \frac{A_0}{K_2} (R - K_2), \quad (2.88)$$

где R – предел прочности льда на растяжение при изгибе, МПа.

Для приближённых расчётов, например, на уровне технико-экономического сравнения вариантов конструкций ледовых переправ, нами предлагается метод расчёта несущей способности по упрощённой математической модели.

Выбор упрощённой математической модели осуществлён на базе анализа существующих формул для определения несущей способности ледового покрова – см. формулы (2.35) – (2.54). Сравнение методов (предлагаемых формул) выполнено для льда толщиной 0,2 м при температуре воздуха 0 °С и минус 20 °С. Результаты вычислений приведены в табл. 2.7.

В результате анализа можно сделать вывод, что с наибольшей надёжностью можно пользоваться формулой, предложенной в ОДН 218.010 – 98 [2]. Являясь достаточно простой, она позволяет получать численные значения несущей способности ледового покрова, наиболее близкие к значениям, получаемым по точным моделям и результатам испытаний, а также даёт некоторый запас по несущей способности льда.

Определять несущую способность ледового покрова с учётом наличия в нём армирующего геосинтетического материала предлагается по выбранной формуле посредством введения коэффициента армирования ($K_{арм}$), численные значения которого определены теоретически и проверены экспериментально.

Таким образом, несущую способность ледового покрова рекомендовано вычислять в зависимости от вида геосинтетического материала и его места расположения в армируемом материале (рис. 2.33, табл. 2.8) по следующей формуле:

$$P = \left(\frac{h_{пр} + 0,5h_{мут}K_2}{11n_u} \right)^2 K_3K_4 \cdot K_{арм}, \quad (2.89)$$

где $h_{пр}$ и $h_{мут}$ – толщина прозрачного и мутного льда, см; n_u – коэффициент, учитывающий интенсивность движения; K_2 – коэффициент изменения общей структуры льда при намораживании; K_3 – коэффициент запаса прочности при оттепелях; K_4 – коэффициент неравномерности структуры льда; $K_{арм}$ – коэффициент, учитывающий наличие армирующей прослойки из геосинтетического материала.

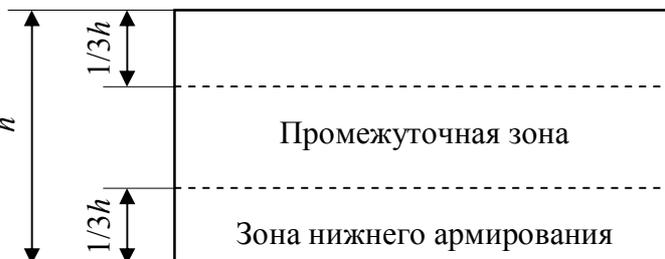


Рис. 2.33. Схема местоположения армирующего материала: h – толщина льда

Таблица 2.7. Результаты сравнения формул для определения несущей способности льда

Автор формулы	Формула	Допустимая несущая способность, т		Учитываемый параметр				
		t = -20 °С	t = 0 °С	вид нагрузки	наличие трещин	солёность	температура воздуха	прочность льда
М.М. Корунов	$P = \frac{h^2}{100}$	4,0	4,0	-	-	-	-	-
М.М. Казанский и Р.А. Шульман	$P = \frac{B}{N} h^2 K S$	4,80	4,0	+	+	+	+	-
А.В. Гастаев	$P = \frac{\sigma h^2}{0,42 - 1,47 \lg \alpha}$	4,40	3,67	+	-	-	-	+
С.А. Бернштейн	$P = \frac{m\sigma \cdot h^2}{3(1+m)C_\alpha}$	4,35	3,6	+	-	-	-	+
А.Р. Шульман	$P = 0,375(h^2 + 7,8rE^{1/4}h^{5/4})$	3,60	2,97	+	-	-	-	+
Д.Ф. Панфилов	$P = 0,375h^2(1 + 4,1\alpha)$	3,40	2,8	+	-	-	-	+
И.С. Песчанский	$P = \frac{\sigma h^{5/4}}{31(0,76r - h^{5/4})}$	3,95	3,4	+	-	-	-	+
ОДН 218.010 – 98	$P = \left(\frac{h_{пр} + 0,5h_{мут}K_2}{11n_n} \right)^2 K_3 K_4$	3,3	2,3	+	+	+/- КОСВ.	+	+

Таблица 2.8. Значение коэффициента армирования $K_{арм}$

Прочность геосетки (георешётки), кН/м	Относительная деформация при разрыве, %, не более	$K_{арм}$ при верхнем/нижнем армировании
20	3	1,10/1,15
	8	1,05/1,10
60	3	1,20/1,30
	8	1,15/1,20
100	3	1,30/1,50
	8	1,25/1,40

Примечание. Промежуточные значения коэффициентов армирования по прочности, деформативности и местоположению ГМ определяются методом интерполяции.

При «верхнем» армировании ГМ материал располагается в зоне не глубже 1/3 от общей толщины ледяной плиты, но не ближе 5 см от дневной поверхности льда. При «нижнем» ГМ материал располагается в зоне не выше 1/3 от общей толщины ледяной плиты, но не ближе 5 см от нижней поверхности льда.

Значения остальных коэффициентов в формуле (2.89) заимствованы из ОДН 218.010 – 98 [2] и приведены в табл. 2.9 и 2.10.

Таблица 2.9. Коэффициент неравномерности структуры льда

Состояние ледового покрова	Структура льда			
	Кристалльно прозрачный лёд без включений	Слабый кристалльно прозрачный лёд с вертикальными трубочками небольших размеров (по длине и диаметру)	Очень слабый кристалльно прозрачный лёд с полыми вертикальными трубочками значительного диаметра	Очень слабый кристалльно прозрачный лёд, зернисто-шуговой лёд
Ровный, без трещин	1,00	0,85	0,70	0,50
Имеются сухие несквозные трещины до 3 см	0,85	0,75	0,60	0,45
Имеются мокрые сквозные трещины до 5 см (отдельные льдины)	0,50	0,45	0,35	0,25

Таблица 2.10. Значение коэффициента n_n

N, авт./сут	<500	500-2000	>2000
n_n	1,0	1,1	1,25

Коэффициент, учитывающий изменение общей структуры ледового покрова, K_2 , принимается равным 0,8 при наращивании дополнительного льда насосом и 0,7 при намораживании льдодождеванием.

Коэффициент K_3 определяется по формуле

$$K_3 = 1 - 0,005 \cdot n_D, \quad (2.90)$$

где n_D – число дней с момента появления воды на ледяном покрове.

Выводы по второй главе

1. Под нагрузкой (при её кратковременном действии) ледовый покров ведёт себя как упругое тело, и к нему применимы классические дифференциальные уравнения теории упругости.

2. Исследования напряжённого состояния армированных ледяных образцов-балок при их работе в первой и второй стадиях позволили установить закономерности разрушения армированного материала под воздействием нагрузки. В результате установлено, что наклон и зона локализации трещин в армированных образцах достаточно хорошо совпадают с аналогичными характеристиками изолиний, что подтвердило адекватность выбранной модели армированного образца и возможность применения этой модели для прогнозирования деформативно-прочностных показателей льда, армированного ГМ, в наиболее опасном случае – при зависании льда над поверхностью воды.

3. Анализ математических моделей показал, что в наибольшей степени соответствует поставленной задаче метод расчёта Матвеева – Немировского. Этот метод позволяет определить параметры, описывающие состояние многослойной плиты, лежащей на упругом основании, и позволил учесть наличие во льду армирующей прослойки из ГМ.

4. В ходе теоретического исследования установлено, что введение в ледяную плиту выбранных нами геосеток и плоских георешёток увеличивает её несущую способность от 14 до 56 %.

5. Нами рекомендован упрощённый метод (формула) определения несущей способности ледового покрова, усиленного геосинтетическими материалами. Наличие ГМ учитывается коэффициентом армирования, численные значения которого рекомендованы в зависимости от свойств геосинтетического материала и его места расположения в армируемом материале.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕОСИНТЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ И АРМИРОВАННОГО ЛЬДА

3.1. Физико-механические свойства геосинтетических материалов при отрицательной температуре и высокой влажности

Особенность применения геосинтетических материалов для усиления ледовых переправ связана с работой при отрицательных температурах. Целью исследований является оценка физико-механические свойства геосинтетических материалов при отрицательной температуре и повышенной влажности.

Определение предела прочности при растяжении

Сущность метода заключается в определении нагрузки, необходимой для разрушения образца при растяжении (рис. 3.1) после воздействия на него отрицательной температуры и повышенной влажности с определением соответствующих предельных деформаций. При разработке данной методики за основу была взята методика, описанная в работе [42].



Рис. 3.1. Определение предела прочности геосинтетических материалов при растяжении

Образцы выдерживали в морозильной установке при заданной температуре в течение суток. Испытания проводили при температуре материала плюс 20 °С, 0 °С и минус 20 °С. Для моделирования высокой влажности образцы равномерно обливались водой (вода распыля-

лась по всей поверхности образца из пульверизатора) непосредственно в морозильной камере до образования слоя льда толщиной не менее 1 мм.

Для испытания готовили образцы геосинтетического материала шириной 180÷220 мм (в зависимости от вида материала и размера ячеек) из расчёта, чтобы количество продольных рёбер было не менее пяти. Длина образцов должна обеспечивать их надёжную фиксацию в зажимах, расположенных на барабанах. Ориентировочно длина составляет от 1000 до 2000 мм.

Предел прочности определяли при постоянной скорости опускания нижнего барабана (20 ± 2 мм/мин). Для предварительного натяжения образца создавали предварительное усилие величиной 2 Н. Начальное расстояние между осями барабанов составляло не менее 400 мм.

По результатам испытаний определяли предел прочности при растяжении R_R (кН/м):

$$R_R = \frac{P_{\max}}{b} = \frac{P_{\max} K_p}{K_{p(1)}}, \quad (3.1)$$

где P_{\max} – разрушающая нагрузка, кН; b – ширина образца (расстояние между осями крайних рёбер), м; K_p – количество рёбер на 1 пог. м геосетки; $K_{p(1)}$ – количество рёбер по ширине b испытываемого образца.

Определение ползучести и длительной прочности геосинтетических материалов при отрицательной температуре

При разработке методики испытаний за основу были приняты работы [42, 98]. Сущность методики заключается в определении способности геосинтетического материала выдерживать длительное действие постоянных нагрузок при отрицательной температуре. Для проведения испытаний изготавливали образцы (рис. 3.2) размеров: ширина – в одно ребро 2, длина – 1,5 м. Образцы фиксировали в зажимах 1, прикладывали к ним нагрузку обжатия, равную 2 Н, и измеряли первоначальную длину образца l_0 , мм. Затем подвешивали к нижнему зажиму постоянную

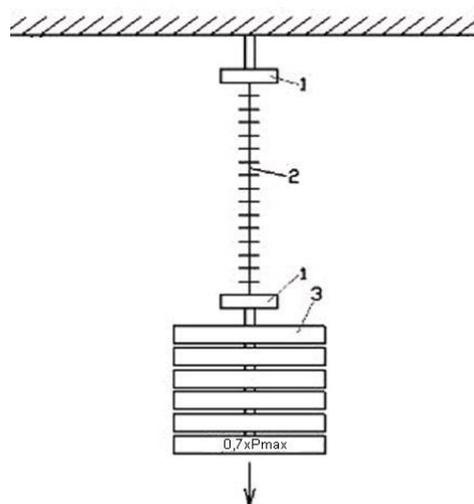


Рис. 3.2. Схема испытания геосинтетических материалов на длительную прочность при отрицательной температуре

нагрузку 3, величину которой назначали равной 0,7 от разрушающей нагрузки P_{\max} на одно ребро.

Испытания проводили при температуре минус (20 ± 2) °С, в тёмном помещении. Продолжительность проведения испытания составляла 15 суток. Замеры длины образцов выполняли ежедневно.

Если все испытываемые образцы выдержали нагрузку (70 % от кратковременной прочности одного ребра) в течение 15 суток, то давали положительное заключение по данному показателю свойств.

При обработке результатов испытаний учитывается место разрыва образца. Если разрыв ребра произошел в месте его крепления у одного из зажимных устройств 1, то испытания повторяли, уменьшив смятие ребра в зажимном устройстве.

По результатам замеров длины образцов строили графики, а также устанавливали соответствие показателя длительной прочности геосинтетического материала или его снижение под действием отрицательных температур.

По результатам этих испытаний определяли и общую относительную деформацию ползучести геосинтетического материала. Определение этого показателя производили по формуле

$$\varepsilon_{L(R)R_{\max}} = \frac{l_n - l_0}{l_0} \cdot 100, \quad (3.2)$$

где l_0 – длина образца с нагрузкой обжатия 2 Н, м; l_n – длина образца с расчётной нагрузкой через n дней, м.

Определение прочности геосинтетических материалов после воздействия циклов замораживания – оттаивания

Сущность метода заключается в определении изменения прочности геосинтетического материала после воздействия на него циклического замораживания и оттаивания.

Для испытания вырезали образцы геосинтетического материала длиной 1000÷2000 мм и шириной 180÷220 мм. Образцы укладывали на дно одной или нескольких ванн. В ванну наливали воду, соответствующую ГОСТ Р 51232 – 98 [99], так, чтобы уровень воды над образцами был не ниже 15 мм. Ванну с образцами помещали в морозильную камеру, в которой установлена температура минус (20 ± 2) °С, и выдерживали в этих условиях до полного замерзания воды [100].

После этого ванну с образцами извлекали из морозильной камеры и проводили полное размораживание образцов до отсутствия льда

в ванне при комнатной температуре (18÷23) °С. При необходимости корректировали уровень воды в ванне и повторяли процесс замораживания. Таким образом, образцы подвергали 25-ти циклам замораживания – оттаивания.

После завершения необходимого количества циклов образцы извлекали из ванны, просушивали при комнатной температуре не менее суток и определяли предел прочности при растяжении.

Уменьшение исходной прочности после циклов замораживания–оттаивания, %, определяли по формуле

$$\frac{R_{LR(TR)} - R_{LR(TR)}^F}{R_{LR(TR)}} \cdot 100, \quad (3.3)$$

где $R_{LR(TR)}$ – прочность при кратковременном растяжении в направлении длины (ширины) материала, кН/м; $R_{LR(TR)}^F$ – то же после 25 (50)-ти циклов замораживания- оттаивания, кН/м.

3.2. Методика экспериментальных исследований армированного льда

Детально прочностные свойства пресноводного льда исследовались на р. Свирь М.М. Басиным [101], на р. Обь К.Н. Коржавиным [102, 103] и Б.Д. Карташкиным [104]. Важные исследования механических свойств льда выполнены Н.А. Цытовичем [105], А.Н. Будниковым [106], М.И. Сумгиным, С.С. Вяловым [107] и др. [108 – 111]. Многочисленные эксперименты произведены в лабораторных условиях и в натурной обстановке, во ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева (г. Санкт-Петербург). Примером экспериментальной базы также является ледоисследовательская лаборатория Арктического и Антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ) (г. Санкт-Петербург) [55].

Весьма подробное и обстоятельное описание особенностей строения, химического состава, термических и механических свойств ледового покрова морских и пресных водоёмов приводится в монографии Б.А. Савельева [112]. Он рассмотрел и систематизировал применяющиеся в практике методы изучения состава льда и его физических свойств [113].

Большой объём исследований физических свойств льда систематизирован и обобщён в монографии Б.П. Вейнберга [114]. Ограниченный круг исследований проведён на образцах с высотой сечения, равной толщине ледового покрова. Известны опыты Н.Д. Шишова [115], В.В. Лаврова [116], проводившиеся на так называемых «клави-

шах», т.е. ледяных консольных балках шириной до 1 м, выпиленных непосредственно в ледовом покрове. Как показывают данные этих экспериментов, опыты с крупными образцами дают меньшую вариацию и меньшие абсолютные значения предела прочности льда, чем при испытаниях образцов малого размера [117, 118].

Не останавливаясь подробно на каждой из этих работ, можно отметить следующее:

- почти все экспериментальные исследования выполнялись на образцах льда с размерами сечений, не превышающими 10x10 см и значительно реже – 30x30 см;

- результаты определения прочности льда в значительной степени зависят от его строения, температуры, других условий, а также методики эксперимента;

- величина прочности льда характеризуется большими различиями.

Разнородность имеющихся характеристик механических свойств льда и большое влияние на них температуры и других местных условий делает весьма затруднительным выбор расчётных значений пределов прочности ледового покрова.

На первом этапе исследований при формировании методики лабораторных испытаний льда за основу были приняты работы [34, 55, 72, 112].

Целью проведения лабораторных исследований являлось определение физико-механических свойств льда и оценка эффективности улучшения этих свойств с помощью геосинтетических материалов, а также проверка достоверности математических моделей, представленных в предыдущей главе.

Был уточнён перечень необходимых для исследования показателей свойств льда и условия испытаний, с внесением необходимых дополнений.

На втором этапе были решены следующие задачи:

- подобрана методика лабораторных исследований;
- изготовлены специальные формы для приготовления образцов из льда;

- подготовлено необходимое холодильное оборудование для приготовления образцов из льда и проведения испытаний при отрицательных температурах;

- сконструировано и изготовлено специальное оборудование для испытания ледяных образцов на текучесть.

Подготовка образцов для испытаний

Для получения образцов из льда были изготовлены специальные формы из полипропилена. Формы помещались в морозильную камеру, где в них послойно при спокойном наливе воды намораживались ледяные балки (рис. 3.3).



Рис. 3.3. Получение образцов льда в морозильной камере

Слои делались небольшой толщины (не более 2÷3 см), что позволяло получать образцы «правильной» формы (т.е. требовался минимум усилий для придания им нужной призматической формы). Для приготовления льда использовалась вода, соответствующая ГОСТ Р 51232–98 [99]. Перед использованием вода отстаивалась в помещении не менее суток, далее ёмкость с водой помещалась в морозильную установку на 4÷6 часов для охлаждения. Охлаждённая вода в равных объёмах заливалась в каждую форму мерной кружкой. После намораживания образец извлекался из формы, выполнялись замеры его высоты и ширины и, при необходимости, поверхность, которая не отвечала требуемым размерам, шлифовалась. Размеры готового образца составляли 400x100x100 мм. Размер образцов обусловлен размерами ячеек геосинтетического материала, используемого в исследованиях. Ширина 100 мм была выбрана из расчёта, чтобы в сечение образца-балки укладывалась хотя бы одна полная ячейка георешётки (геосетки) самого крупного размера.

При изготовлении армированного образца сначала в форме намораживался нижний слой льда (или несколько слоёв) необходимой толщины, затем на него укладывался геосинтетический материал, и продолжалось послойное намораживание. Для армирования образцов

использовали плоские георешётки (геосетки) с условным наименованием Поли-20, Поли-30, Поли-40, СТ-100 (табл. 3.1).

Таблица 3.1. **Некоторые свойства геосинтетических материалов, использованных для армирования ледяных образцов**

Условное наименование геосинтетического материала	Сырьё	Прочность при растяжении (прод.), кН/м	Относительная деформация при разрыве, %	Размер ячейки, мм
Плоская георешётка Поли-20	Полипропилен	22,4	6,5	39/39
Плоская георешётка Поли-30	Полипропилен	32,2	6,1	39/39
Плоская георешётка Поли-40 (геокомпозит)	Полипропилен	40,5	6,3	33/33
Стеклосетка СТ-100 (геокомпозит)	Стекловолокно и полипропилен	109	1,4	25/25

При использовании геосинтетических материалов на основе полимеров (обладающих положительной плавучестью) укладка образца в форму осуществлялась следующим образом. Армирующий материал требуемого размера (100x400 мм), предварительно распрямлённый, укладывался на нижний слой замороженного льда. Сверху на геосинтетический материал наливался небольшой слой воды (несколько миллиметров) для того, чтобы материал примёрз ко льду, а после его примерзания (через 10÷15 минут) наливался слой воды требуемой толщины. Такой способ укладки позволял расположить армирующий материал в нужном слое образцов.

При использовании геокомпозитов (например, стеклосетка СТ-100 с подложкой из полипропилена) материал укладывался в форму следующим образом. Армирующий материал требуемого размера (100x400 мм), предварительно распрямлённый, выдерживался в воде в течение 5÷10 минут. Затем его укладывали на нижний слой замороженного льда, крепко прижимали и удерживали его в течение 3÷5 секунд, а затем сверху наливался слой воды требуемой толщины.

После замораживания образцы подготавливались к испытанию и хранились в морозильной камере. Срок хранения образцов не превышал двух суток. Для предохранения образцов от выветривания они были изолированы полиэтиленовой плёнкой.

Для испытания ледяных образцов при заданной температуре их термостатировали в холодильной камере в течение 6-ти часов.

Определение предела прочности льда на растяжение при изгибе

Сущность метода заключается в определении нагрузки P , необходимой для разрушения ледяного образца (балки), с вычислением соответствующих предельных деформаций (рис. 3.4).

Прочностные характеристики определялись при различных температурах: $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, минус $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ и минус $20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Испытания проводились на современной компьютеризированной установке ЛКСМ-1 (рис. 3.5) при постоянной скорости нагружения (100 ± 1) мкм/с, что соответствует $(6\pm 0,06)$ мм/мин.

Расстояние между опорами составляло 260 мм. Для сохранения заданной температуры образца во время испытаний оборачивались теплоизолирующим материалом.

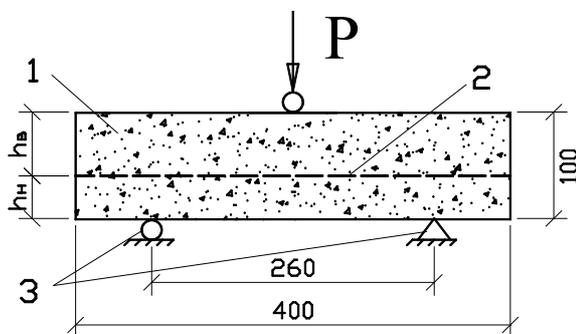


Рис. 3.4. Схема определения предела прочности образца на растяжение при изгибе: 1 – ледяной образец; 2 – армирующая прослойка; 3 – опорные приспособления; $h_{\text{в}}$ – толщина верхнего слоя; $h_{\text{н}}$ – толщина нижнего слоя

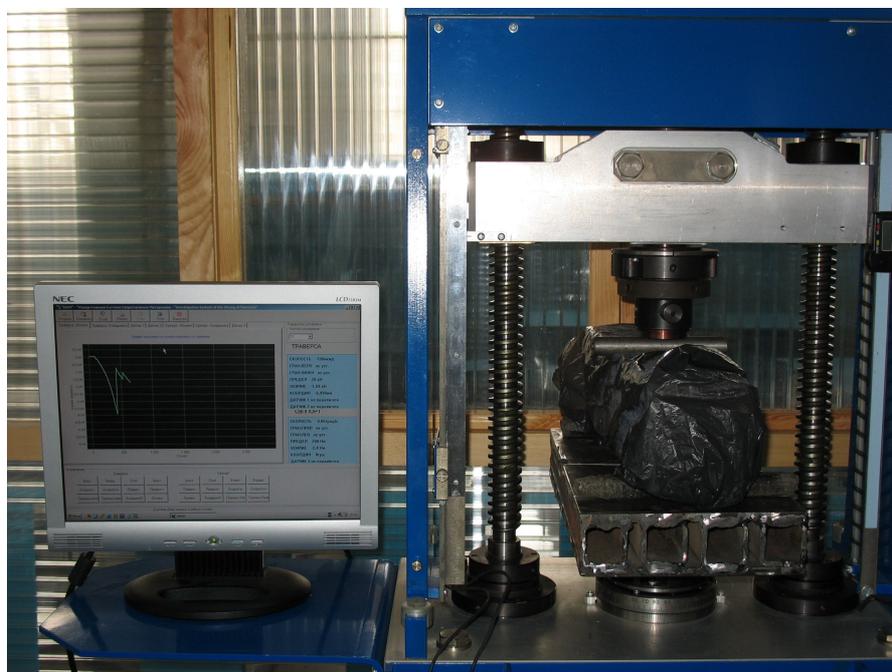


Рис. 3.5. Установка для испытания ледяных образцов на растяжение при изгибе

Максимальное усилие, полученное в процессе испытания, принимали за разрушающую нагрузку. Также фиксировалась величина прогиба, соответствующая этому усилию. Кроме численных значений нагрузки и деформации при испытании получали диаграмму с кривой, отражающей изменение этих показателей [100].

По полученным результатам определялся предел прочности на растяжение при изгибе армированного и неармированного льда и модуль упругости.

Предел прочности на растяжение при изгибе (МПа) рассчитывали по формуле

$$R_{изг} = \frac{3Pl}{2bh^2} \cdot 10^{-2}, \quad (3.4)$$

где P – разрушающая нагрузка, Н; l – расстояние между опорами, см; b – ширина образца, см; h – высота образца, см.

Предел прочности на растяжение при изгибе $R_{изг}$ (МПа) определяли с точностью до второго десятичного знака.

Модуль упругости образцов (МПа) рассчитывали по формуле

$$E_y = \frac{Pl^3}{4f_{np}bh^3} \cdot 10^{-2}, \quad (3.5)$$

где f_{np} – прогиб, см.

3.3. Обработка результатов испытаний методами математической статистики

Для обработки полученных экспериментальных значений использовались методы математической статистики.

Определение объёма пассивных однофакторных экспериментов выполнялось с учётом предположения, что распределение исследуемых параметров следует нормальному закону Гаусса. Случайный характер результатов испытаний, выражаемый дисперсией разброса исследуемых параметров, обусловлен как естественной неоднородностью материалов, так и изменчивостью работы испытательного оборудования.

Поскольку при каждом измерении исследуемых параметров происходят случайные измерения, то целью статистического исследования является отыскание оценки совокупности параметров на основе выборочной статистики. При установлении объёма выборки используется интервальная оценка, с назначенной степенью надёжности оп-

ределяется доверительный интервал возможных значений исследуемого параметра. Чем шире доверительный интервал, тем надёжнее получаемая оценка.

Число образцов геосетки в серии принимали по табл. 3.2, в зависимости от значения коэффициента вариации прочности k_v .

Таблица 3.2. Зависимость количества испытываемых образцов от внутрисерийного коэффициента вариации прочности

Значение коэффициента вариации k_v , %	4 и менее	От 5 до 6	7 и более
Требуемое число испытываемых образцов, шт.	2	4	6

Коэффициент вариации k_v определялся по формуле

$$k_v = \frac{\sigma}{\bar{X}}, \quad (3.6)$$

где σ – среднеквадратическое отклонение измеряемого параметра, служащее характеристикой рассеяния рассматриваемого ряда; \bar{X} – математическое ожидание исследуемого параметра, характеризующее центр распределения случайной величины.

Величина среднеквадратического отклонения измеряемого параметра вычислялась по формуле

$$\sigma = \sqrt{D}, \quad (3.7)$$

где D – дисперсия, характеризующая разброс случайных величин относительно её математического ожидания.

Для $N < 30$ дисперсия вычисляется по формуле

$$D = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{N-1}. \quad (3.8)$$

Величину математического ожидания определяли по выражению

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i, \quad (3.9)$$

где X_i – частные значения исследуемого параметра, полученные при единичном измерении; N – число измерений.

Заданная точность измерений ρ определяется по формуле

$$\rho = \frac{\sigma_0}{\bar{X}}, \quad (3.10)$$

где σ_0 – среднеарифметическое значение среднеквадратического отклонения измеряемого параметра, служащее характеристикой рассеяния рассматриваемого ряда.

Величина σ_0 вычислялась по формуле

$$\sigma_0 = \frac{\sigma}{\sqrt{N}}. \quad (3.11)$$

Если фактически полученный после проведения испытаний коэффициент вариации окажется меньше принятого, то количество проведённых наблюдений достаточно, и действительное значение измеряемого параметра для малой выборки X_d с заданной доверительной вероятностью будет находиться в пределах:

$$X_d = \bar{X} \pm \mu_{CT}, \quad (3.12)$$

где μ_{CT} – доверительный интервал.

Величина доверительного интервала определялась по формуле

$$\mu_{CT} = \alpha_{CT} \cdot \sigma_0, \quad (3.13)$$

где α_{CT} – коэффициент Стьюдента, назначенный в зависимости от значения доверительной вероятности и числа наблюдений.

В процессе обработки экспериментальных данных исключались грубые ошибки статистического ряда. Выборка из полученных результатов измерений имеет цель определить, является ли данный резко отличающийся результат закономерным, или он случаен, т.е. является ли он промахом или ошибкой в данной серии измерений.

Выборка выполнена с помощью метода оценки по критерию появления грубых ошибок [119]:

$$\begin{cases} \beta_1 = \frac{(X_{\max} - \bar{X})}{\sigma} \sqrt{\frac{N}{N-1}}; \\ \beta_2 = \frac{(\bar{X} - X_{\min})}{\sigma} \sqrt{\frac{N}{N-1}}, \end{cases} \quad (3.14)$$

где β_1, β_2 – наибольший и наименьший критерии появления грубых ошибок из серии выборки; X_{\max}, X_{\min} – соответственно наибольшие и наименьшие значения из N измерений.

Полученные значения β_1, β_2 сравнивались с максимальным

значением β_{\max} при фактическом числе измерений N и принятой доверительной вероятности. Если $\beta_1 > \beta_{\max}$, то значения X_{\max} исключали из статистического ряда как грубую погрешность. При $\beta_2 < \beta_{\min}$ исключалась величина X_{\min} . После исключения грубых ошибок определяли новые значения X и σ из $(N - 1)$ измерений.

3.4. Результаты лабораторных испытаний геосинтетических материалов

Предел прочности на растяжение при отрицательной температуре и высокой влажности

Результаты испытаний геосинтетических материалов, выполненные по вышеприведённой методике, приведены в табл. 3.4 и на рис. 3.6 – 3.8.

Таблица 3.3. Результаты определения предела прочности и деформативности

Условное наименование геосинтетического материала	Предел прочности при растяжении, кН/м			Общая относительная деформация, %		
	Температура испытания, °С					
	- 20	0	+ 20	- 20	0	+ 20
Георешётка Поли-20	23,5	22,7	22,4	4,5	5,2	6,5
Георешётка Поли-30	33,8	32,6	32,2	4,0	4,8	6,1
Георешётка Поли-40 (геокомпозит)	42,5	41,0	40,5	4,1	5,1	6,3
Стеклосетка СТ-100 (геокомпозит)	110,1	109,5	109	1,3	1,3	1,4

Отрицательные температуры не оказывают негативного влияния на ГМ: при снижении температуры с 20 до 0 °С происходит незначительное увеличение предела прочности на растяжение (до 1,3 %), а при снижении температуры до минус 20 °С увеличение предела прочности составляет 5 % для ГМ на основе полипропилена и до 1 % для ГМ на основе стекловолокна. Понижение температуры воздуха от 20 °С до минус 20 °С приводит к снижению общей относительной деформации ГМ. Так, например, при температуре 0 °С деформация ГМ на основе полипропилена снижается на 19÷21 %, а при дальнейшем снижении температуры (до минус 20 °С) – на 30÷35 %. Снижение общей относительной деформации для ГМ на основе стекловолокна достигает 7 % при температуре 0 °С и с её понижением не изменяется.

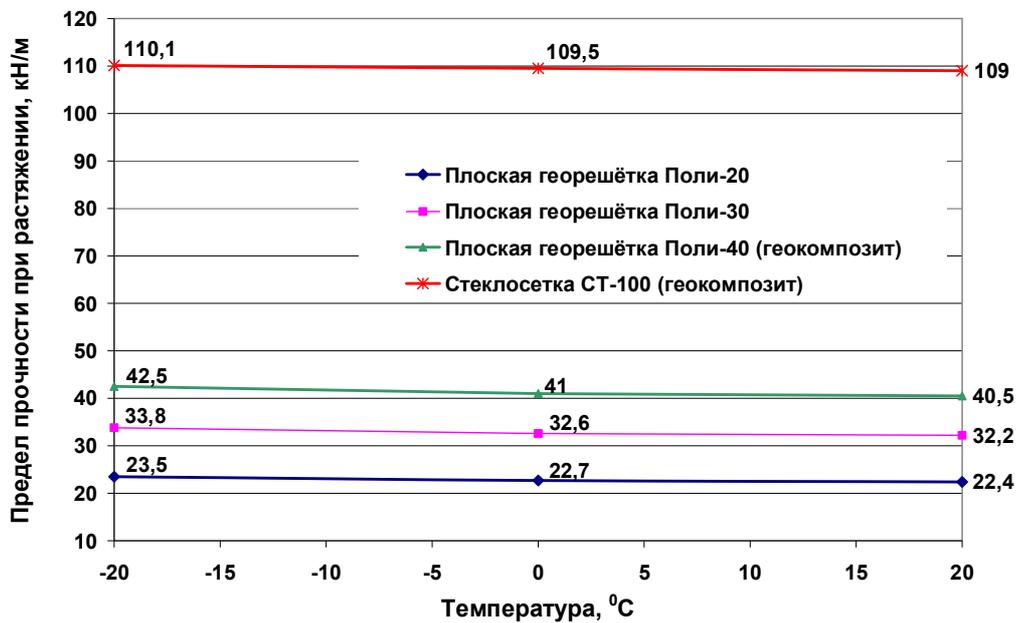


Рис. 3.6. Зависимость прочности геосинтетических материалов от температуры

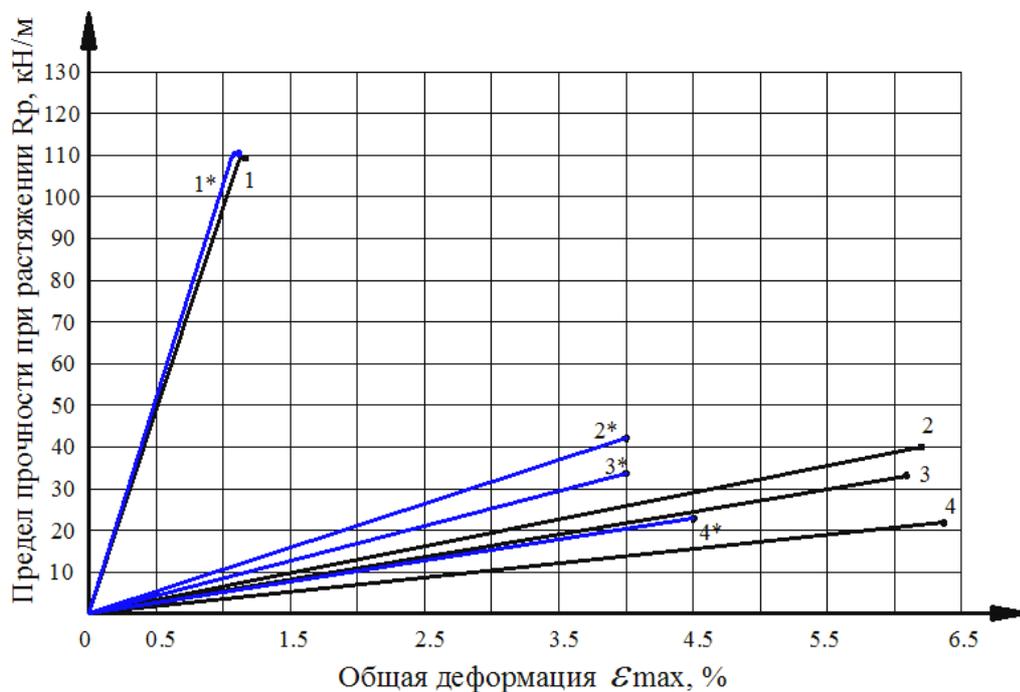


Рис. 3.7. Предел прочности при растяжении ГМ при положительной и отрицательной температурах (1 – 4 – соответственно СТ-100, Поли-40, Поли-30 и ПОЛИ-20 при температуре 20 °C; 1* – 4* – те же материалы при температуре минус 20 °C)

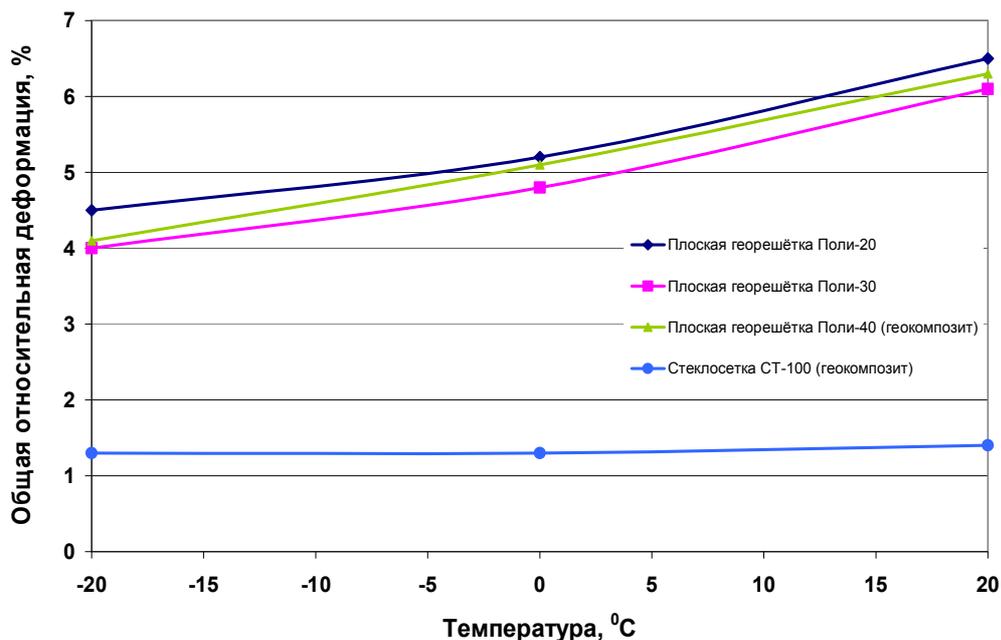


Рис. 3.8. Зависимость деформативности геосинтетических материалов от температуры

Ползучесть и длительная прочность геосинтетических материалов при отрицательных температурах

В работе [42] были выполнены исследования по определению прочности геосинтетических материалов под действием постоянной статической нагрузки (ползучести) при температуре плюс 20 °С. Результаты этих исследований приведены на рис. 3.9.

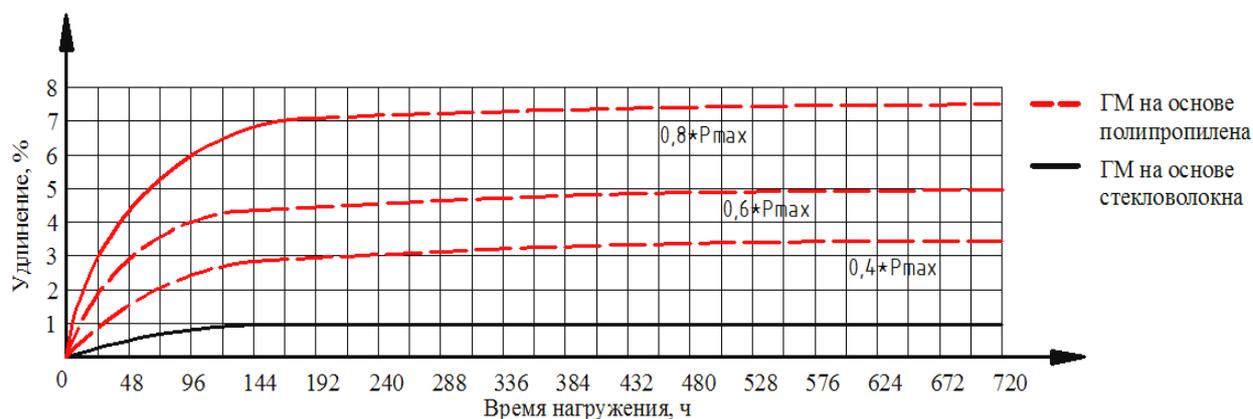


Рис. 3.9. График, отображающий процесс ползучести геосинтетических материалов при положительной температуре

Результаты наших исследований по определению ползучести и длительной прочности геосинтетических материалов при отрицательной температуре, выполненных по описанной выше методике, приведены на рис. 3.10.

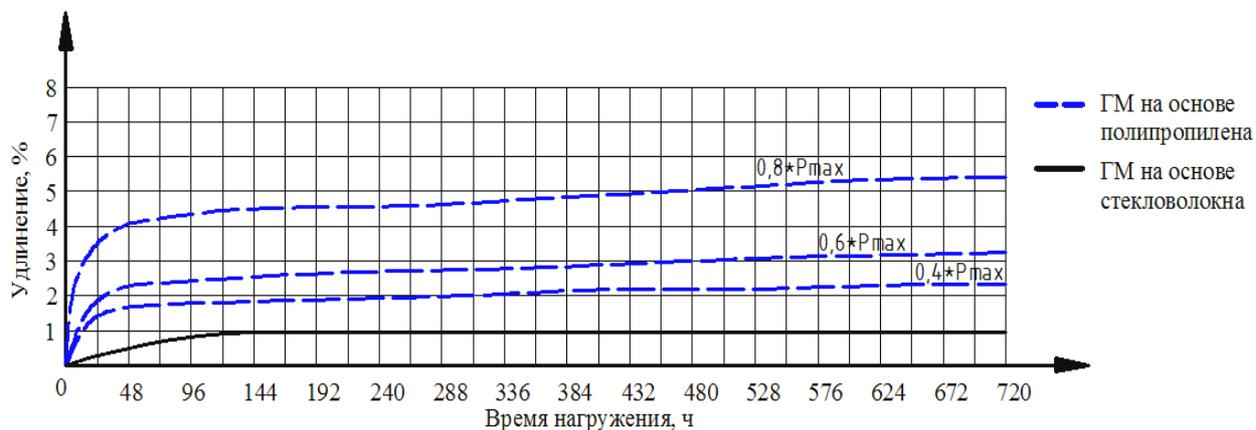


Рис. 3.10. График, отображающий процесс ползучести геосинтетических материалов при отрицательной температуре

Сравнивая полученные результаты, можно сказать, что под действием отрицательных температур (до $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$) происходит снижение ползучести ГМ и увеличение длительной прочности (табл. 3.4).

Таблица 3.4. Результаты испытаний геосинтетических материалов на ползучесть и длительную прочность

Наименование показателя	Нагрузка (доля от разрушающей)		
	0,8	0,6	0,4
Удлинение образца, %, при температуре: 20 °С минус 20 °С	7,5	4,9	3,5
	5,4	3,4	2,4
Снижение ползучести и увеличение длительной прочности, %, при снижении температуры от 20 °С до минус 20 °С	39	44	46

Наибольшее увеличение длительной прочности ГМ – до 46 % – происходит при воздействии на него нагрузки, равной 0,4 от максимальной разрушающей. При увеличении нагрузки до 0,8 от максимальной разрушающей увеличение длительной прочности происходит на 39 %.

Прочность геосинтетических материалов после воздействия циклов замораживания – оттаивания

Результаты испытаний, выполненных по вышеприведённой методике (табл. 3.5, рис. 3.11), показывают, что после воздействия циклов замораживания – оттаивания происходит снижение прочности ГМ. Максимальное снижение прочности (до 13 %) наблюдалось у ГМ марки Поли-20, а минимальное (4 %) – у ГМ марки СТ-100.

Таблица 3.5. Результаты испытаний ГМ на морозостойкость

Условное наименование геосинтетического материала	Предел прочности при растяжении, кН/м		Снижение прочности после замораживания – оттаивания, %
	в исходном состоянии	после 25-ти циклов замораж. – оттаиван.	
Георешётка Поли-20	22,4	19,5	13
Георешётка Поли-30	32,2	28,9	10
Георешётка Поли-40 (геокомпозит)	40,5	35,7	12
Стеклосетка СТ-100 (геокомпозит)	109	104,3	4

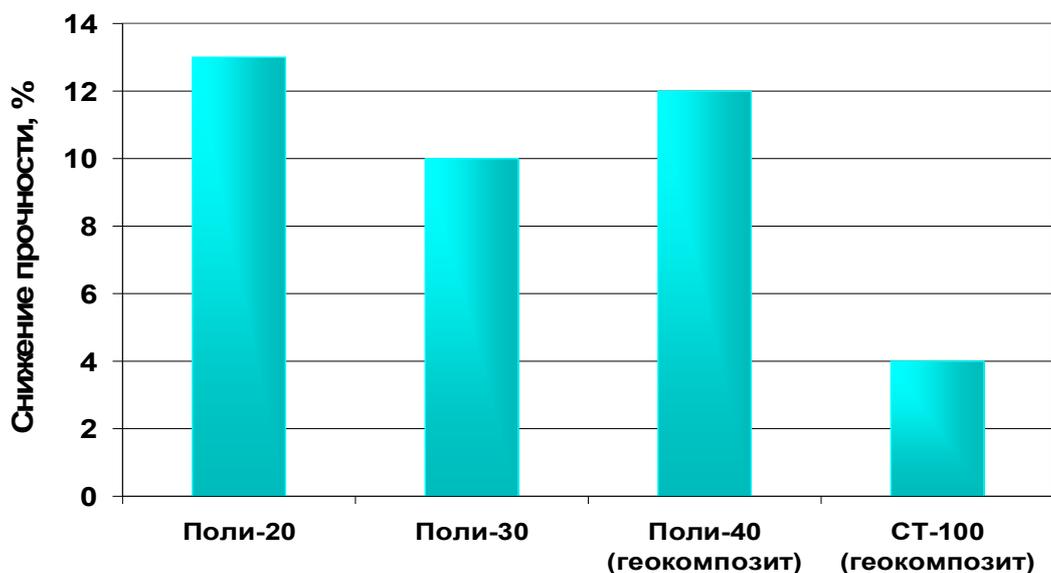


Рис. 3.11. Снижение прочности геосинтетических материалов после 25-ти циклов замораживания – оттаивания, %

3.5. Результаты лабораторных испытаний армированного льда

Исследования показали существенные различия в работе армированных и неармированных образцов. Разрушение образцов началось с образования вертикальных трещин, по которым при увеличении нагрузки образец разрушался. При увеличении нагрузки и достижении предельных напряжений неармированный образец разрушался, образуя два куска льда призматической формы (рис. 3.12).



Рис. 3.12. Характер разрушения неармированных образцов

При этом образование центральной трещины и разрушение происходило практически одновременно.

При образовании центральной трещины в армированных образцах лёд не раскалывается на две половины.

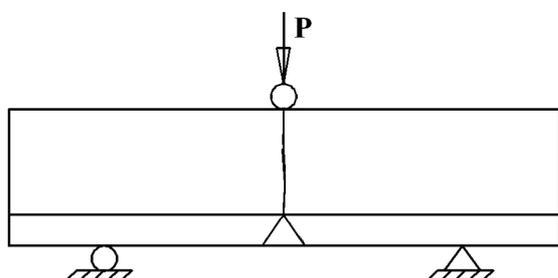


Рис. 3.13. Форма первой трещины в армированном образце

Трещины (чаще всего их образовывается несколько одновременно) от основания образца доходят до армирующей прослойки из геосинтетического материала и сливаются в одну вертикальную, которая доходит до верха образца (рис. 3.13). При этом происходит

падение величины нагрузки, а затем её рост.

Мы разделяем процесс разрушения армированных образцов на два этапа. На первом этапе разрушения армированного образца образуются трещины, и откалывается лёд, находящийся в нижней растянутой зоне балки (ниже армирующего материала, рис. 3.14).

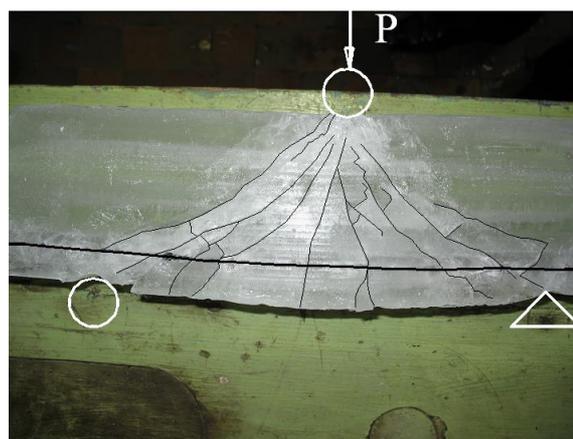


Рис. 3.14. Характер разрушения армированных образцов

Это объясняется тем, что предельная деформативность льда в несколько раз меньше, чем георешётки, поэтому он разрушается в первую очередь.

На втором этапе в работу вступают армирующий материал и лёд, находящийся выше георешётки, но ниже нейтральной зоны балки. Величина второй ступени зависит от прочности и деформативности армирующего материала. На этом этапе происходит ступенчатая потеря сцепления между льдом и георешёткой и окончательное разрушение образца. Ледяная балка теряет сплошность и работа георешётки напоминает механику её взаимодействия с дискретными каменными материалами. При этом прогиб балки заметно увеличивается.

Отмечено, что вторичные разрушения армированных образцов всегда происходят по касательным плоскостям от центра балки (места приложения нагрузки) к ближайшему узлу георешётки. Эта особенность подтверждает результаты теоретических исследований, выполненных в данной работе (см. главу 2).

В ходе лабораторных исследований выявлены существенные различия в величине работы, затрачиваемой на полное разрушение армированных и неармированных образцов (рис. 3.15 и 3.16).

Очевидно, что работа, необходимая для разрушения неармированных образцов из льда, в несколько раз меньше, чем армированных геосинтетическими материалами.

Кроме того, если неармированные образцы разрушаются хрупко и резко, то армированные георешётками – постепенно теряют несущую способность.

Такие особенности разрушения льда, армированного геосинтетическими материалами, позволяют прогнозировать увеличение безопасности движения по ледовым переправам, т.к. увеличивается время, которое потребуется для пролома ледяной плиты [100].

Результаты определения модуля упругости и предела прочности на растяжение при изгибе образцов-балок из льда при разных температурах приведены на рис. 3.17 и 3.18.

Максимальный модуль упругости у неармированного льда объясняется особенностями разрушения армированных образцов – увеличением прогиба. Особенно заметно прогиб увеличивается при армировании более деформативными материалами, например, ГМ на основе полипропилена.

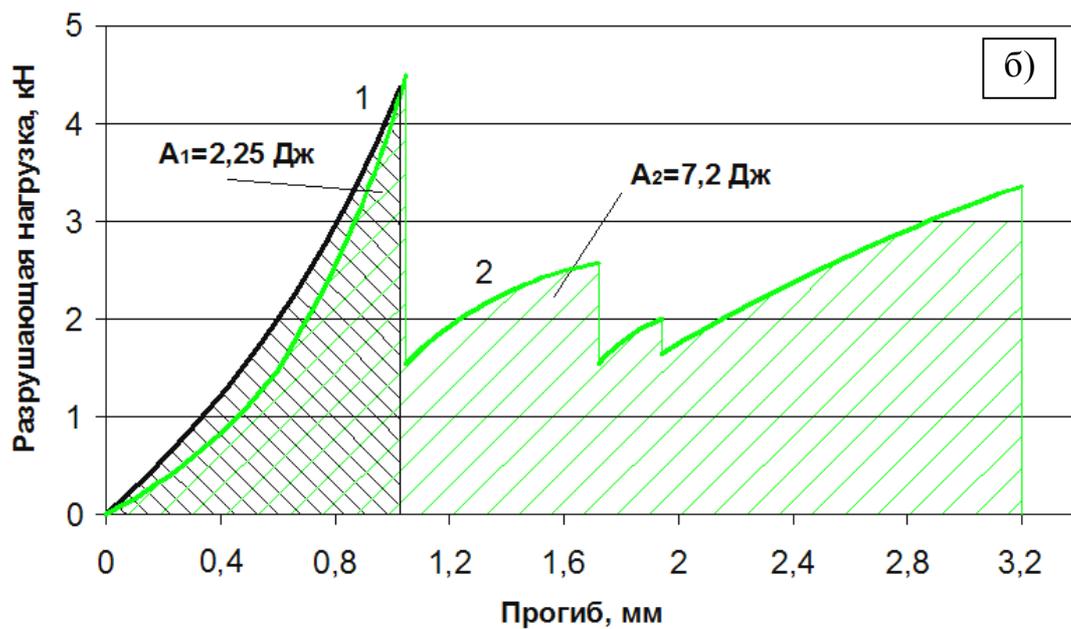
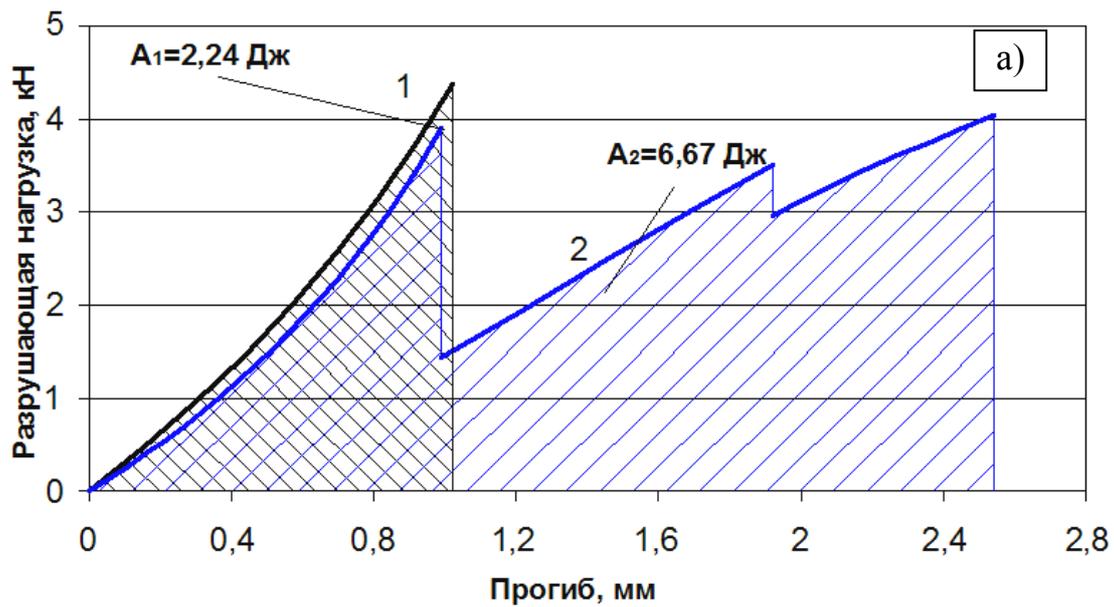
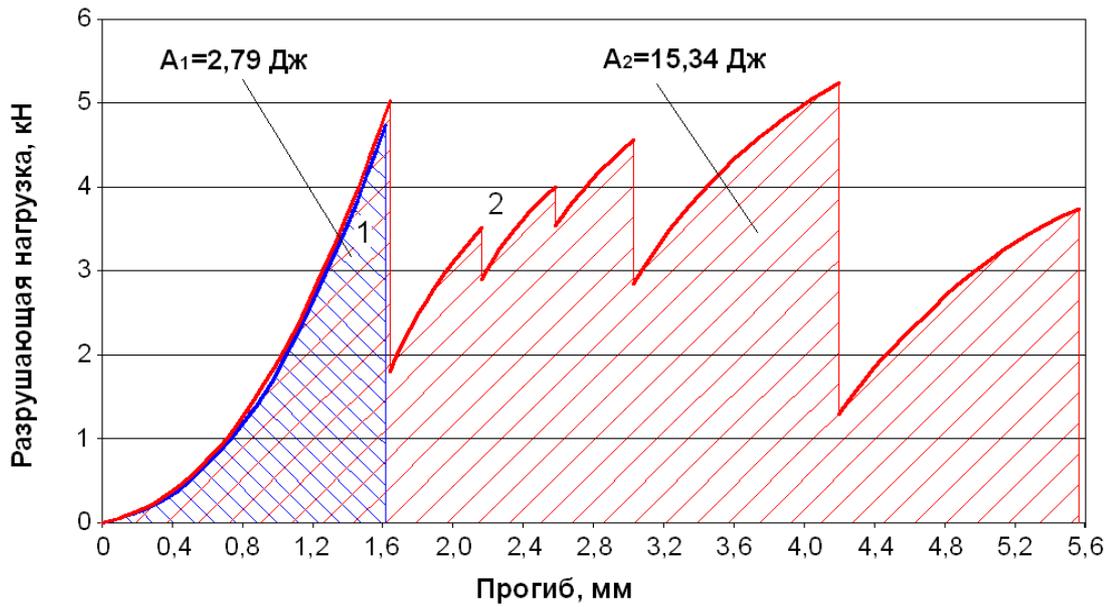


Рис. 3.15. Диаграммы, иллюстрирующие характер разрушения балок изо льда и количество затрачиваемой на это работы: 1 – неармированный образец; 2 – образец, армированный георешёткой Поли-20 (а) и Поли-40 (б); A_1 и A_2 – работа, затрачиваемая на разрушение неармированного и армированного образцов соответственно



3.16. Диаграммы, иллюстрирующие характер разрушения балок изо льда и количество затрачиваемой на это работы: 1 – неармированный образец; 2 – образец, армированный георешёткой СТ-100; A_1 и A_2 – работа, затрачиваемая на разрушение неармированного и армированного образцов соответственно

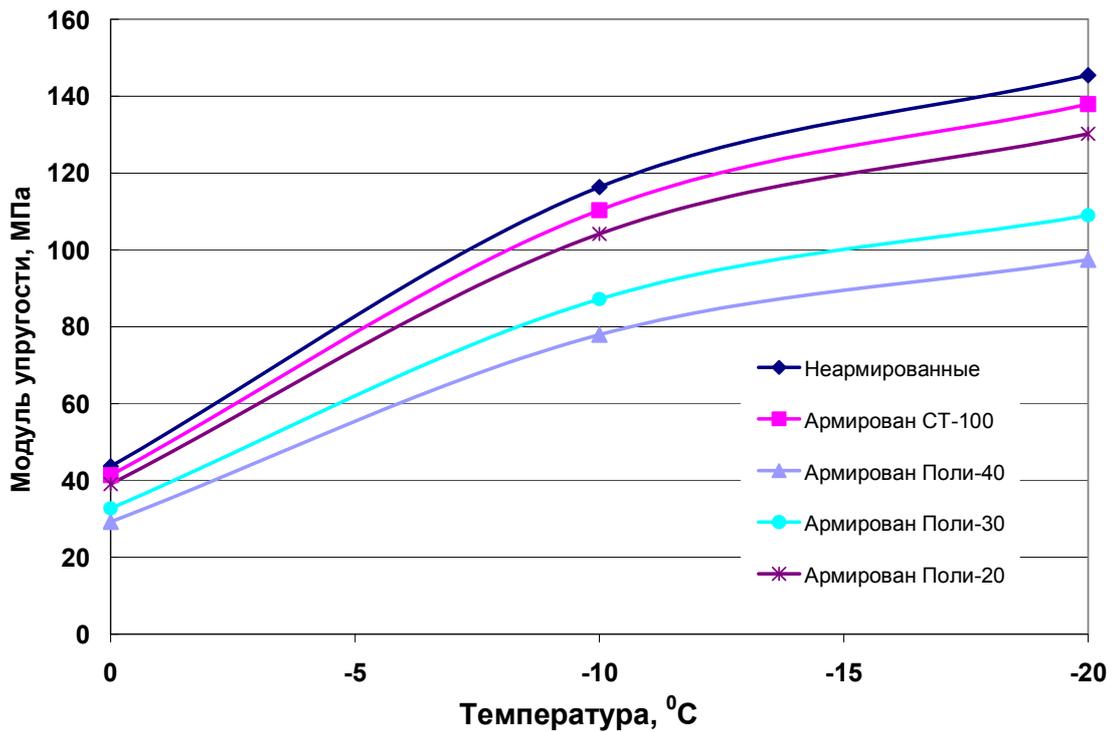


Рис. 3.17. Зависимость модуля упругости неармированных и армированных образцов от температуры

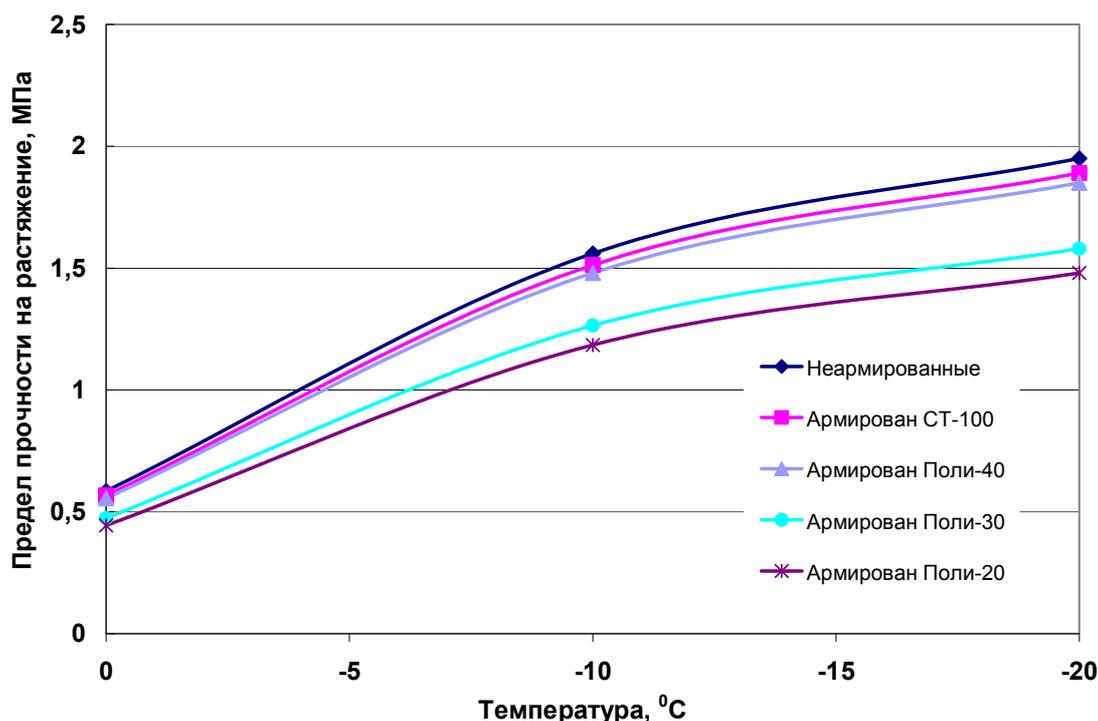


Рис. 3.18. Зависимость предела прочности на растяжение при изгибе неармированных и армированных образцов от температуры

Результаты лабораторных исследований показали увеличение модуля упругости льда и предела прочности на растяжение с понижением температуры.

Выводы по третьей главе

На основании проведённых лабораторных испытаний сделаны следующие выводы.

1. При снижении температуры до минус 20 °С происходит:
 - увеличение предела прочности на растяжение до 5 % для ГМ на основе полипропилена и до 1 % для ГМ на основе стекловолокна;
 - снижение общей относительной деформации ГМ на основе полипропилена на 30÷35 % и на 7 % для ГМ на основе стекловолокна;
 - снижение ползучести ГМ и увеличение длительной прочности до 46 % при воздействии на него нагрузки, равной 0,4 от максимальной разрушающей.
2. Отрицательное действие на ГМ оказывают циклы замораживания – оттаивания: максимальное снижение прочности (до 13 %) наблюдалось у ГМ марки Поли-20, а минимальное (4 %) – у ГМ марки СТ-100.

3. С понижением температуры испытания образца от минус 10 °С до минус 20 °С модуль упругости льда возрастает до 20 %. Увеличение температуры от минус 20 °С до 0 °С снижает модуль упругости льда более чем в 2 раза. Аналогичные зависимости получены для предела прочности льда на растяжение при изгибе.

4. При испытании на растяжение при изгибе ледяные образцы демонстрируют явные признаки хрупкого разрушения без проявления ползучести и вязкости. Предел прочности на растяжение при изгибе зависит от скорости нагружения и температуры льда.

5. Экспериментальные исследования, моделирующие наиболее опасные участки льда, зависшие над водой (например, на съездах), позволили установить, что геосинтетические материалы, замороженные в нижнюю часть ледяных балок в качестве армирующего материала, изменяют кинетику разрушения образцов с увеличением предела прочности на растяжение при изгибе не более 15 %. Предельная деформация и работа, необходимая для разрушения балок, увеличиваются в 3÷5 раз.

6. Установлены два этапа потери несущей способности ледяных образцов, армированных геосинтетическими материалами. Это позволяет прогнозировать повышенную безопасность ледовых переправ ввиду отсутствия резкого хрупкого разрушения армированного льда.

7. На основании теоретических и экспериментальных исследований установлены требования к ГМ, рекомендованным для армирования льда:

- прочность на растяжение не менее 40 кН/м;
- относительное удлинение при разрыве не более 8 %;
- снижение прочности при воздействии отрицательных температур не более 10 %;
- отсутствие снижения прочности при длительном нахождении в воде;
- снижение прочности при действии циклов замораживания – оттаивания не более 10 %;
- стойкость к ультрафиолетовому излучению не менее 90 %;
- обеспечение гибкости материала на бруске радиусом (5±1) мм при температуре не выше минус 10 °С.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА И ОЦЕНКА ПРЕДЛАГАЕМЫХ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

Первый опытный участок ледовой переправы, армированной геосинтетическим материалами, был построен с **целью** опытно-производственной проверки результатов теоретических и экспериментальных исследований. Для достижения поставленной цели в ходе опытного строительства необходимо решить следующие **задачи**:

– сопоставление данных, полученных в результате теоретических исследований и лабораторных испытаний, с реальными показателями свойств, полученными в ходе опытно-производственных испытаний конструкций;

– отработка технологии вмонтирования и демонтажа георешёток в ледовом покрове;

– получение сравнительных данных по несущей способности ледового покрова, армированного георешётками.

Для строительства ледовой переправы (опытного участка) был выбран один из водоёмов Омской области (рис. 4.1).



Рис. 4.1. Внешний вид водоёма, выбранного для строительства опытного участка ледовой переправы

Выбор осуществлялся по следующим критериям:

– строительство первого опытного участка на реальной речной ледовой переправе не представляется возможным и целесообразным из-за необходимости регулярного проведения специальных испытаний с возможным разрушением ледового покрова, что не допускается на действующей переправе или вблизи неё;

- размеры (4600 м²) и глубина водоёма (до 3 м) вполне подходят для опытных работ;
- имеется круглогодичная транспортная доступность и наличие подъезда к водоёму, оборудованному съездами на лёд;
- в случае необходимости имеется возможность обогрева людей и быстрой организации спасательных работ.

4.1. Конструктивно-технологические решения, применяемые на первом опытном участке

Опытный участок был разделён на несколько подучастков для апробации различных конструкций армированного ледового покрытия [120].

В ходе строительства и испытаний были опробованы разные конструкции, технологии и материалы.

1. Усиление ледового полотна намораживанием дополнительных слоёв льда (рис. 4.2).

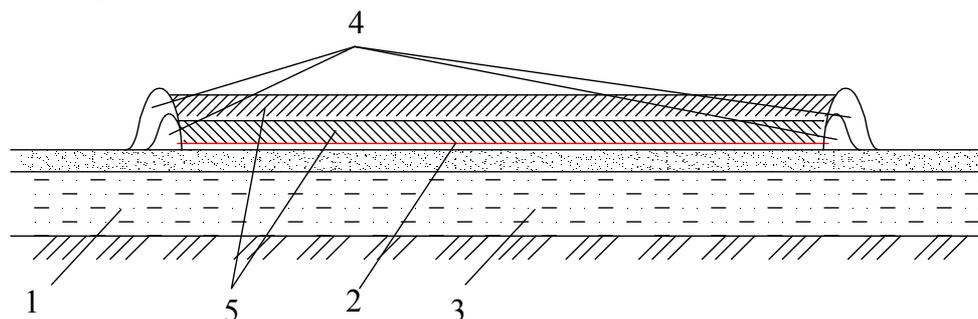


Рис. 4.2. Конструкция армированного ледового полотна на опытном участке:
1 – вода; 2 – армирующий геосинтетический материал; 3 – естественный ледовый покров; 4 – валы снега; 5 – намороженные слои

Это конструктивно-технологическое решение обладает одним существенным преимуществом – относительной простотой реализации на любом водоёме после образования естественного ледового покрова. Данный способ обладает и недостатком – армирующий материал располагается не в нижней растянутой зоне, а в средней или верхней зоне ледового покрова, которая при силовом нагружении подвижной или статической нагрузкой не испытывает растягивающих напряжений, следовательно, арматура в этом случае не работает на силовые нагрузки вначале первого этапа разрушения льда.

Анализ напряжённо-деформированного состояния покрытий автомобильных дорог, выполненный в работе [42], показал, что кроме

силовых нагрузок от транспорта армированное покрытие подвергается значительным температурным деформациям, причём величина нагрузок и напряжений от этих деформаций зачастую превосходит силовое воздействие от автотранспорта. Абсолютная величина растягивающих температурных напряжений имеет наибольшие значения в верхней части ледяной плиты, которая больше подвержена температурным колебаниям (температура воды всегда положительна). Следовательно, расположение армирующего материала в этой зоне (в верхней части ледяной плиты) должно оказывать положительное влияние на температурное трещинообразование и величину раскрытия трещин.

Таким образом, армирование верхней зоны ледяной плиты должно косвенно улучшать показатели её несущей способности.

Параллельно, для сравнения, было выполнено намораживание верхних слоёв льда без укладки армирующего материала.

2. Усиление ледового покрова геосинтетическим материалом методом «притапливания». Сущность этого способа заключается в предварительном размещении армирующего материала на месте будущей переправы в предзимний период. Суть этого конструктивно-технологического решения представлена на рис. 4.3.

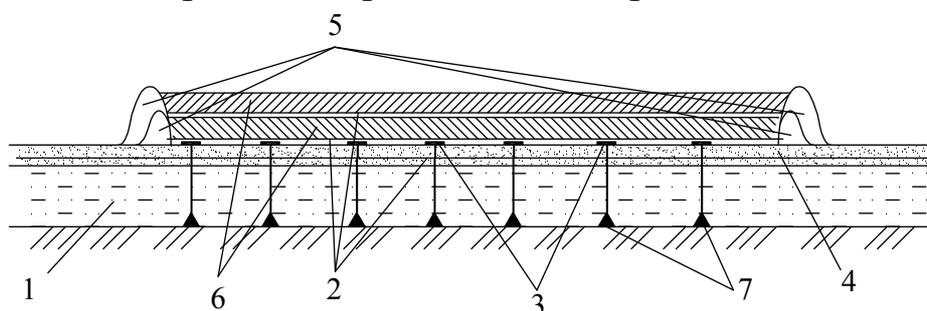


Рис. 4.3. Схема предварительного размещения и вмораживания армирующего материала в два и более слоя

До образования льда 4 на водоеме 1 вдоль намеченного пути будущей ледовой переправы на проектной глубине (возможно в нескольких слоях по глубине) закрепляют армирующий геосинтетический материал 2. При этом если геосинтетический материал имеет плотность больше плотности воды (тонет), то его удерживают поплавки 3, которые поддерживают геосинтетический материал в горизонтальном положении, и грузы 7, которые фиксируют положение армирующего материала в створе будущей переправы. Если геосинтетический материал имеет плотность меньше плотности воды (всплывает), то его удерживают грузы 7.

При образовании льда достаточной толщины поверхность водоёма очищают от снега. Далее на поверхность ледового покрова вдоль намеченного пути ледовой переправы укладывают следующий слой армирующего материала 2. Затем создают бордюр 5 для удержания поливной воды и намораживают дополнительные слои 6 до необходимой толщины льда.

В процессе увеличения толщины естественного льда армирующий материал оказывается вмонтированным (вмороженным) в растянутой зоне ледяной плиты для эффективного восприятия растягивающих напряжений от силового воздействия автотранспорта.

Можно уложить и второй слой армирующего материала. Вмороженный в верхнюю часть плиты он будет воспринимать температурные напряжения.

Таким образом, такое конструктивно-технологическое решение должно существенно увеличить несущую способность и безопасность ледовой переправы, армированной двумя и более слоями геосинтетического материала.

3. Усиление ледового покрова геосинтетическим материалом методом «подныривания». Данная технология наиболее приемлема при необходимости армирования ледовой переправы на водоёмах, подъезд к которым в предзимний период осложнён или невозможен (например, автозимник проходит по заболоченной территории). В этих случаях вмонтирование армирующего материала в нижний слой ледового покрова может быть выполнено после наступления устойчивых отрицательных температур (поздней осенью или в начале зимы), после начала промерзания водоёмов и болот. Суть метода «подныривания» заключается в следующем (рис. 4.4).

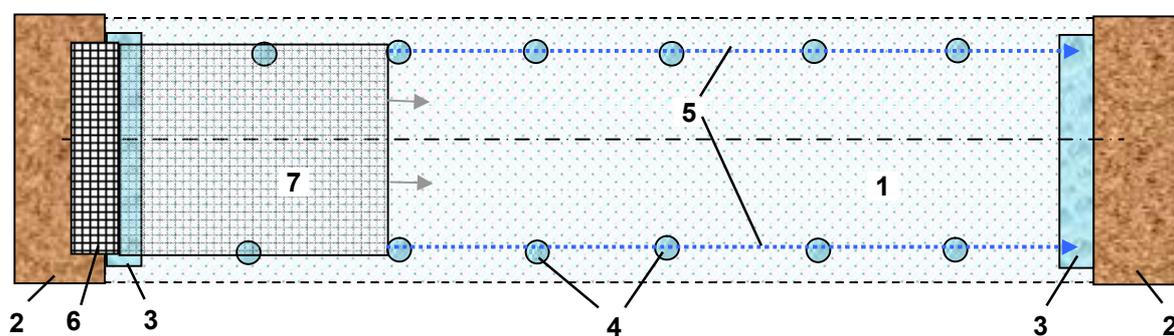


Рис. 4.4. Схема, иллюстрирующая способ «подныривания» при армировании ледовой переправы

На месте будущей переправы после образования ледового покрова 1 (12-15 см), безопасного для рабочих, выполняют разбивочные работы. У обоих берегов 2 устраивают во льду майны 3, выпускную и приёмную, ширина которых немного превышает требуемую ширину армирования (могут устраиваться и промежуточные майны). В поверхности льда по краям армируемой зоны от берега к берегу бурят лунки 4, расстояние между которыми определяется принятым способом проводки подо льдом троса 5 от выпускной к приёмной майне (известно несколько способов ручной и механизированной проводки троса подо льдом). На берегу располагают рулон армирующего материала 6, прикрепляют его начало к тросу, разматывают рулон и тросами протягивают армирующее полотно подо льдом. После выхода полотна из приёмной майны его натягивают и закрепляют на берегу. По мере дальнейшего промерзания водоёма армирующее полотно вмерзает в нижний слой ледового покрова (в случае отрицательной плавучести к армирующему полотну во время подачи в майну можно крепить поплавки).

4.2. Организация и технология строительства опытного участка

Организационно-технологический процесс производства работ на опытном участке был разделён на четыре основных этапа:

- подготовительные работы;
- строительство опытного участка (вмонтирование георешёток в лёд);
- наблюдение за нарастанием льда и трещинообразованием, испытание ледового покрова колёсной и гусеничной нагрузкой;
- извлечение армирующего материала из ледового покрова.

Подготовительные работы

В ходе подготовительных работ выполняли следующие операции:

- разбивочные работы на водоёме;
- замеры глубин (рис. 4.5) при помощи лота (груза на верёвке достаточной длины с засечками через 10, 50 и 100 см) и ручного эхолота-глубиномера (FISHERMAN-120);
- определены марки армирующих материалов, и заключены договоры на их приобретение;
- определены участки для размещения армирующих материалов и способы их укладки в ледовый покров (способ усиления).



Рис. 4.5. Замер глубин водоёма

Для усиления ледового покрова были выбраны три вида геосинтетических материалов: георешётки Поли-20, Поли-40 и СТ-100.

Строительство опытного участка

Строительство первого опытного участка ледовой переправы с применением геосинтетических материалов было начато 4 декабря 2007 г. Толщина льда к этому периоду составляла 30 см. Высота снежного покрова – 20 см.

Поверхность водоёма была ровной (без торосов), лёд прозрачный без посторонних включений. Поверхность льда на водоёме была очищена от снега, выполнена высотная съёмка и промеры толщины льда (рис. 4.6).



Рис. 4.6. Очистка поверхности льда (а), высотная съёмка (б) и промеры толщины льда (в)

Далее производилась укладка геосинтетического материала согласно исполнительной схеме (рис. 4.7).

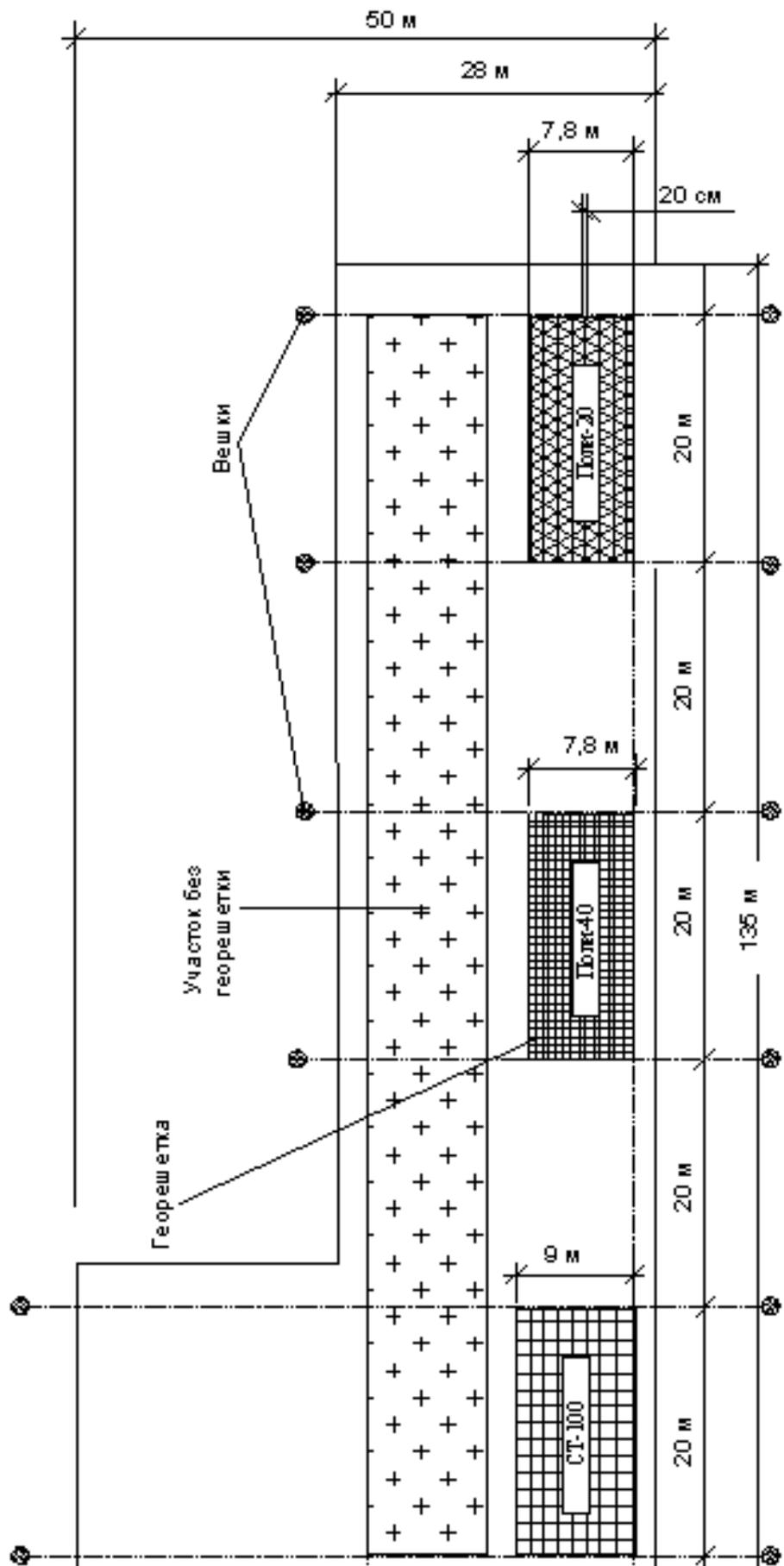


Рис. 4.7. Исполнительная схема опытного участка

Ввиду того, что ширина одной полосы движения на ледовой переправе должна быть не менее семи метров (п.2.4 ОДН 218.010 – 98), укладывалось по две полосы армирующего материала длиной 20 м, с перекрытием полос на 20 см. Фиксация на льду первоначально осуществлялась при помощи металлических скоб (рис. 4.8).



Рис. 4.8. Попытка фиксации георешётки на поверхности льда при помощи металлических скоб

Однако эта операция не дала положительных результатов. Скобы, вбитые в лёд вертикально для прижатия армирующего материала ко льду, не держались в нём. А скобы, вбиваемые под углом, – скалывали лёд.

Для решения этой проблемы можно заблаговременно нагревать скобы и втапливать их в лёд, чтобы талая вода при замерзании фиксировала скобу. Можно поливать вбитую скобу холодной водой и ждать её замерзания. Однако эти решения весьма трудоёмкие и требуют больших затрат времени, поэтому было решено примораживать один край рулона геосинтетического материала к поверхности льда.

При решении такой задачи мы столкнулись с определёнными трудностями, в ходе решения которых нами была отработана технология укладки армирующего геосинтетического материала на поверхности льда.

Следует отметить, что при отрицательной температуре геосинтетический материал становится более жёстким. Поэтому перед укладкой армирующий материал был предварительно разложен на поверхности льда (рис. 4.9).

Поскольку георешётка Поли-40 выполнена с подложкой, укладка производилась следующим образом. На увлажненное ледяное полотно укладывался свободный конец рулона, который сверху дополнительно поливался водой из проруби, и геокомпозит примораживался ко льду (рис. 4.10).

После закрепления свободного конца рулон разматывали, натягивали вручную, убирая волны, и поливали водой для лучшего сцепления с поверхностью. Комбинированный материал лучше распределялся и фиксировался на поверхности льда.



Рис. 4.9. Раскладка полотна георешётки на основе полимера



Рис. 4.10. Укладка геокомпозита Поли-40

Фиксация геосинтетического материала без подложки (Поли-20) также осуществлялась методом примораживания с поливкой полотна водой.

Намораживание дополнительных слоёв льда. Розлив на поверхность льда воды для намораживания дополнительных слоёв производился при помощи пожарной машины на базе автомобиля «Урал – 5557» (рис. 4.11). Обваловка участков снегом осуществлялась вручную.



Рис. 4.11. Формирование снежных валов и намораживание льда

Во время разлива струя воды была направлена под углом от 45 до 80 градусов относительно поверхности льда. Для оперативного контроля толщины намораживаемых слоёв была выполнена разметка участков вешками (рис. 4.12), шаг разметки на вешке составлял 5 см.



Рис. 4.12. Высотная разметка участков при помощи вешек

Строительство участка

ледовой переправы методом «притапливания» было начато через год после строительства первого опытного участка – 19 октября 2008 г. при положительной среднесуточной температуре воздуха.

Для армирования была использована георешётка Поли-20. Для закрепления материала на местности был пробит створ. Для закрепления створа и армирующего материала на проектной глубине было заготовлено 6 металлических вешек длиной 2,5 м. Длина армируемой полосы составляла 20 м.

Перед началом работ георешётка была разложена на берегу, для того чтобы избежать её обратного сворачивания в рулон (рис. 4.13). По двум продольным краям армирующего материала была продета верёвка, для удобства перемещения по водоёму и закрепления её на месте армирования. Далее два человека на берегу спускали георешётку на воду, а двое в лодке оттягивали её к месту крепления (рис. 4.14).



Рис. 4.13. Предварительная раскладка георешётки



Рис. 4.14. Спуск георешётки на воду

При помощи веревок, прикрепленных к концам геосинтетического материала, производилось натяжение, крепление армирующего материала на проектной глубине (20 см) и одновременное выравнивание положения материала в плане (рис. 4.15).



Рис. 4.15. Закрепление армирующего материала на проектной глубине

Поскольку используемый ГМ плавал на поверхности, его средняя часть поднималась к поверхности. Для регулировки положения ГМ были использованы грузы. Закрепление грузов на берегу не представлялось возможным, т.к. промер глубин (при любой точности приборов) не даёт конкретного рельефа дна и точно угадать длину верёвки в определённом месте невозможно. Поэтому крепление грузов к ГМ производилось непосредственно после закрепления ГМ на армируемом участке в необходимых местах (где глубина погружения не соответствовала проектной). После окончательного закрепления ГМ к его краям были привязаны поплавки, чтобы зимой свободно отыскать армированный участок.

Осмотр места армирования (после образования ледового покрова) показал, что материал притоплен, однако имеет место некоторое его поднятие по краям.

Протаскивание георешётки подо льдом методом «подныривания» осуществлялось в декабре 2008 года. Для этого были выполнены следующие технологические операции:

- в начале участка армирования во льду толщиной 30 см был сделан пропил размером 8,0 x 0,5 м бензомоторной пилой;
- при помощи пешни отпиленный участок льда был разбит на мелкие куски, которые удалялись из майны при помощи лопаты с перфорацией (рис. 4.16);



Рис. 4.16. Устройство майны в начале участка армирования ледового покрова

- в конце участка армирования размер майны составил 8,0х0,1 м;
- для армирования был использован геокомпозит Поли-40;
- перед началом работ для удобства укладки армирующего материала и сокращения времени работ две полосы георешётки предварительно были связаны вместе с нахлёстом 20 см.



Рис. 4.17. Армирующее полотно ГМ разложено на поверхности ледового покрова

Таким образом, из двух полос материала было подготовлено и разложено на поверхности ледового покрова армирующее полотно шириной 8 м (рис. 4.17).

Перед протаскиванием ГМ под лёд были заведены верёвки, длина которых превышала длину армируемого участка плюс запас, необходимый для захвата и протаскивания ГМ

(2÷3 м). Для протаскивания верёвок подо льдом было подготовлено две рогатины и большой шест, а вдоль участка армирования были пробурены лунки из расчёта, чтобы по длине шеста помещалось минимум две лунки (рис. 4.18).



Рис. 4.18. Подготовка к протаскиванию верёвок подо льдом

Далее к концу верёвки (оставленному у первой майны) привязывалось подготовленное полотно армирующего материала. Протаскивание георешётки подо льдом производилось вручную (рис. 4.19).

Для того, чтобы георешётка подо льдом не образовывала волн и ровно прилегал к нижней части ледового покрова, к ней были прикреплены куски пенопласта в центре и по краям по всей длине полотна (рис. 4.20).



Рис. 4.19. Протаскивание георешётки подо льдом



Рис. 4.20. Привязывание пенопласта к полотну георешётки

При протаскивании георешётки подо льдом прикреплённый пенопласт не создавал дополнительных помех. Весь процесс протаскивания 20 метров георешётки подо льдом длился около 30 минут (с учётом времени, необходимого на остановки и привязывания пенопласта).

После протаскивания георешётки первый её конец остался подо льдом, а второй конец длиной 3 м – на поверхности (он был приприморожен к краю майны и придавлен колотым льдом). Второй конец был оставлен для того, чтобы весной опробовать технологию «выдёргивания» георешётки изо льда.

Верёвки, с помощью которых протаскивали ГМ, не отцепляли от материала, а крепили на деревянные палки (рогатины и шест) и закрепляли на поверхности (положены поперёк майны, а по краям присыпаны колотым льдом и снегом и политы водой).

После закрепления георешётки подо льдом была проверена глубина её расположения. В каждой лунке положение решётки было хорошо видно, а при помощи щупа мы определили, что она максимально близко подошла к нижней границе ледяной плиты [121, 122].

Для контроля через неделю были проделаны контрольные замеры: при сверлении лунок в месте укладки сетки бур остановился на уровне 30 и 34 см. Таким образом, сетка ровно примерзла к нижней части ледяной плиты.

4.3. Наблюдение за опытным участком и испытания ледового покрова

Наблюдение за ледовым покровом в течение зимы перед проведением испытаний силовой нагрузкой показало следующее:

- ледовый покров на опытном участке имел ровную однородную поверхность;
- все участки неармированного ледового покрова, очищенные от снега, покрыты сеткой трещин с максимальной шириной раскрытия от 5 до 10 мм (рис. 4.21);



Рис. 4.21. Типичный вид трещин на неармированных участках ледового покрова, очищенных от снега

- трещины имеют форму конуса и сужаются по глубине;
- глубина открытия трещин, замеренная узким щупом, изменялась от 35 до 47 см, что составляло от 60 до 80 % общей толщины льда;
- все участки ледового покрова, армированные ГМ, отличались от неармированных участков отсутствием раскрытых трещин;
- при внимательном рассмотрении ледовой поверхности на армированных участках на ней можно было обнаружить волосяные «безззорные» трещины;
- при армировании нижней части ледяной плиты (способом «подныривания») величина трещин была «промежуточной», т.е. больше, чем при расположении армирующего материала в верхней части, и меньше, чем на неармированных участках.

За день до испытаний опытного участка были проведены измерения толщин льда и выполнены разбивочные работы, составлена схема испытания участков нагрузками. Подготовлены приборы для определения деформации ледовой поверхности от силового воздействия. До начала нагружений были определены высотные отметки поверхности льда в каждой контрольной точке. Для измерения общего и упругого прогибов ледовой поверхности использовался длинноразмерный прогибомер МАДИ-ЦНИЛ. Размер чаши прогибов при нагружении уточнялся путём контроля высотных отметок через каждый 1 м высокоточным теодолитом с рейкой. Определение прогибов ледового покрова производилось при одинаковых условиях нагружения на армированных и неармированных участках. Для испытаний использовали колёсные и гусеничные машины (рис. 4.22).



Рис. 4.22. Испытание опытного участка колёсной и гусеничной техникой

Для нагружение ледового покрова использовали следующие машины: гружёные автомобиль-самосвал ЗИЛ-585 (на базе шасси ЗИЛ-130) и пожарная машина АЦП 6/3 – 40 (на базе шасси «Урал – 5557»), специализированная военная колёсная машина (СКМ), специализированная гусеничная военная машина (СГМ-1), специализированная гусеничная военная машина (СГМ-2).

Перед началом испытаний у всех видов техники, которая использовались для определения несущей способности ледового покрова, была измерена масса и давление в шинах, ширина и длина гусениц. Некоторые технические характеристики машин, необходимые для оценки несущей способности ледового покрова, приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1. **Некоторые технические характеристики машин, используемых для нагружения ледового покрова на опытном участке**

Вид машины и её марка	Масса, кг		Давление в шинах, МПа	Ширина гусеницы, см	Длина гусеницы (опирающаяся на грунт), см
	общая	приходящаяся на колесо задней оси			
Автосамосвал ЗИЛ-585	11030	4035	0,6 – передние, 0,65 – задние	–	–
Специализированный автомобиль на базе шасси Урал – 5557	19000	3550 – на каждое из четырёх колес задней оси	0,7 – все	–	–
Военная колёсная машина (СКМ)	16000	2000 – на каждое из восьми колес	0,7 – все	–	–
Гусеничная военная машина (СГМ-1)	16000	–	–	30	245
Гусеничная военная машина (СГМ-2)	42000	–	–	51	415

Первым прогиб ледового покрова измеряли под нагрузкой от автосамосвала ЗИЛ-585. Пятку прогибомера размещали между скатами на задней оси двухосного грузового автомобиля. При определении прогибов поверхности от гружёной пожарной трёхосной машины на базе шасси Урал – 5557 пятку прогибомера приходилось размещать по вертикальной оси заднего моста рядом со скатом.

Измерение прогибов поверхности ледового покрова от воздействия «нестандартной» колёсной и гусеничной нагрузок производилось при расположении прогибомера вдоль и поперёк оси машин, рядом с колесом или гусеницей. Параллельно производилось определение чаши прогибов от всех видов нагрузки с помощью геодезических приборов и методов. Наибольшие значения общего и упругого прогибов ледового покрова были зафиксированы от СГМ-2, а наименьшие значения – от СКМ и СГМ-1.

Результаты определения упругого прогиба на участках приведены в табл. 4.2.

Таблица 4.2. Величина упругих прогибов (мм) поверхности ледового покрова

Марка машины	Номер участка					
	I	II	III	IV	V	VI
ЗИЛ-585	12	20	15	18	14	18
УРАЛ 5557	21	24	20	22	21	27
СКМ	13	13	10	10	11(7)*	45
СГМ-1	5	15	9	10	10(7)*	7
СГМ-2	95	94	86	142	99(67)*	–

Примечания. Участки I, III, V армированы соответственно геосеткой СТ-100, геокомпозитом Поли-40 и георешёткой Поли-20. Участки II и IV – не армированы, но наморожены. Участок VI – естественный ледовый покров.

При определении прогибов покрытия на пятом участке было отмечено изменение величины прогиба при возвращении подлёдной волны, которая образовалась под воздействием движущейся техники. Второе значение упругого прогиба с учётом возвращённой волны указано в табл. 4.2 в скобках.

Значение эквивалентного модуля упругости на поверхности ледового покрова определено по формулам

$$E_{\text{упр}} = 0,36 \frac{Q}{f_{\text{уп}}}, \quad (4.1)$$

$$E_{\text{упр}} = \frac{K_q \cdot p \cdot D(1 - \mu^2)}{l_{\text{уп}}}, \quad (4.2)$$

где $E_{\text{упр}}$ – модуль упругости, МПа; Q – нагрузка, кН; $f_{\text{уп}}$ – упругий прогиб, см; K_q – коэффициент, зависящий от характера передачи нагрузки на покрытие, $K_q \approx$

$\approx 0,6$; p – давление на покрытие, МПа; D – диаметр круга, эквивалентного следу колеса, см; μ – коэффициент Пуассона, $\mu = 0,35$; l_{np} – прогиб под нагрузкой, см.

Результаты расчётов представлены на рис. 4.23. Результаты испытаний участков с расположением армирующих прослоек в нижней и верхней частях ледового покрова приведены на рис. 4.24 [123, 124].

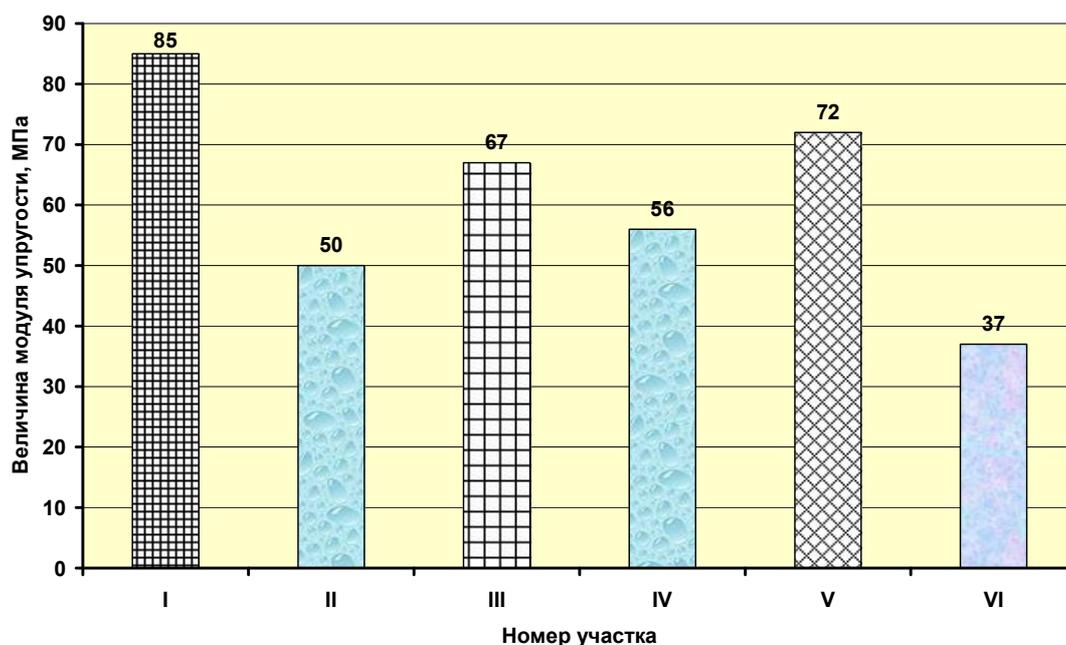


Рис. 4.23. Величина модуля упругости поверхности ледового покрова при силовом воздействии по участкам: I, III, V армированы соответственно геосеткой СТ-100, геокомпозитом Поли-40 и георешёткой Поли-20; участки II и IV – не армированы, но заморожены; участок VI – естественный ледовый покров

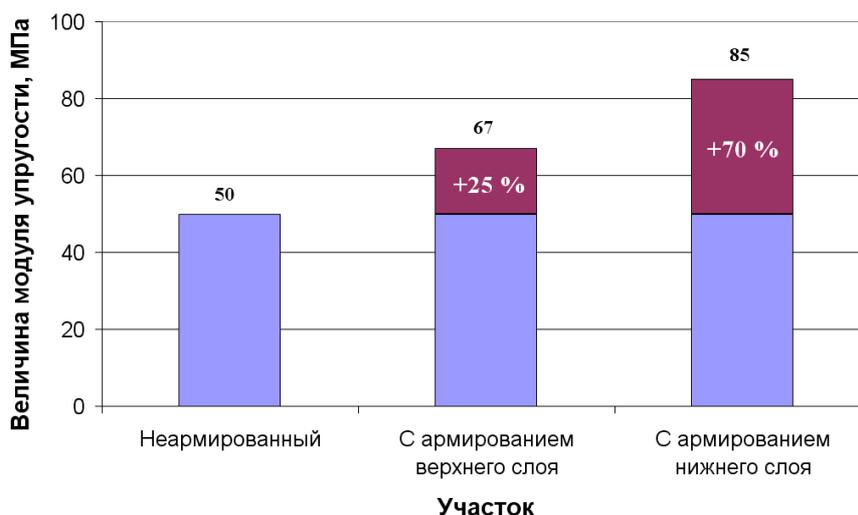


Рис. 4.24. Результаты испытаний опытных участков

Испытания показали, что на всех участках, армированных геосинтетическими материалами, несущая способность ледового покрова увеличилась. Наибольшее увеличение (до 70 %) достигнуто на участке, армированном стеклосеткой.

Оба участка, армированные георешётками Поли-40 и Поли-20, показали увеличение несущей способности от 30 до 35 % по сравнению с неармированным ледовым покровом одинаковой толщины. Наиболее эффективно георешётки на основе полимеров проявили себя под самой тяжелой нагрузкой от СГМ-2, вызывающей значительные осадки и деформации ледового покрова.

Основная причина увеличения несущей способности ледового покрова, армированного в верхней части ГМ, заключается в повышении трещиностойкости ледяной плиты. Кроме того, даже образовавшиеся трещины не открываются, что способствует улучшению распределения возникающих напряжений. Это является косвенной причиной увеличения несущей способности и безопасности армированной ледовой переправы.

Сравнивая результаты испытаний, следует учесть, что строительство и испытания опытных участков длилось два года. При этом все геосинтетические материалы, использованные при втором строительстве, ранее были задействованы на первом опытном участке. Перед использованием геосинтетических материалов повторно была определена их прочность в лаборатории. Было установлено, что сохранность прочностных свойств георешёток из полипропилена после механических воздействий и длительного нахождения в воде и во льду несколько выше, чем у геосетки из стекловолокна. Это объясняется ещё и тем, что по нашей просьбе нам была предоставлена стеклосетка без специальных пропиток органическим вяжущим, чтобы улучшить её смерзание со льдом.

4.4. Извлечение армирующего материала из ледового покрова

Нормативно-методические документы, определяющие порядок эксплуатации ледовых переправ, требуют удаления всех посторонних материалов, использованных для усиления ледового покрова в весенний период (п.9.12 ОДН 218.010 – 98), не объясняя способы выполнения этих операций.

На опытном участке были опробованы различные способы удаления геосинтетических материалов из верхней и нижней частей ледового покрова.

В результате экспериментальных исследований можно рекомендовать следующее: если материал располагается в верхней части, не ниже $1/3$ от общей толщины ледяной плиты, то процесс извлечения геосинтетического материала весной не вызывает каких-либо осложнений. Он вытаскивается из льда, собирается в рулоны и вручную удаляется на берег (рис. 4.25).



Рис. 4.25. Общий вид опытного участка после извлечения георешёток

Если материал располагается в нижней части (не выше $1/3$ от общей толщины ледяной плиты), то в процессе таяния льда, которое происходит как с верха, так и снизу, геосинтетический материал постепенно вытаскивается из льда и может быть извлечён через пропиленные майны целиком или по участкам (в зависимости от протяжённости армирования) механизированным или ручным способом. Тросы, используемые

в методе «подныривания», весной целесообразно использовать для механизированного извлечения полотна тягачами (лебёдками) с берега.

В случае использования для армирования нижней части плиты геокомпозита процесс извлечения может осложниться, т.к. геотекстиль увеличивает силу сцепления геосинтетического материала со льдом за счёт того, что он гидрофилен. Ощутимых преимуществ от использования геокомпозита в нижней части ледового покрова (по сравнению с некомбинированными сетками и решетками) не установлено. Поэтому, с точки зрения извлечения армирующего полотна из подо льда, использование геокомпозита в этом случае не целесообразно.

При расположении армирующей прослойки в средней части ледового покрова автозимников на проточных водоёмах (с весенним ледоходом) геосинтетический армирующий материал целесообразно из-

влекать вместе с блоками льда, которые, например, можно выпиливать электро-, бензопилами по размерам, зависящим от возможностей тягача (лебёдки). Тягач должен вытаскивать эти блоки на берег тросом, на котором «удавкой» закреплён выпиленный блок с геосеткой. В этом случае возможны и иные способы извлечения армирующего материала, но они требуют производственной проверки.

Для ускоренного протаивания ледового покрова в зоне переправы по поверхности льда можно распределить тёмный, экологически безвредный материал (например, песок, золу, сажу и т.п.). В результате под действием солнца лёд будет интенсивно таять и появится возможность беспрепятственно извлечь ГМ даже из средней части ледяной плиты для его повторного использования.

При армировании ледового покрова автозимников на беспроточных водоёмах (без существенных подвижек льда весной) геосинтетический армирующий материал целесообразно извлекать из воды с использованием тросов после таяния льда.

4.5. Экономическая оценка эффективности строительства армированных ледовых переправ

Технико-экономическое обоснование строительства ледовых автозимников и переправ, армированных геосинтетическими материалами, выполнено применительно к условиям Омской области [39]. Для расчёта принято три альтернативных варианта технологии усиления ледовых автозимников, которые приведены на рис. 4.26 – 4.28.

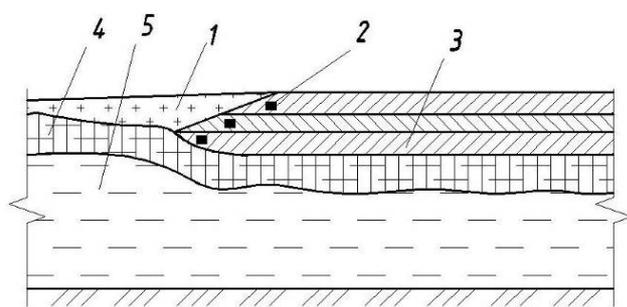


Рис. 4.26. Усиление ледового покрова намораживанием льда сверху: 1 – снег; 2 – бордюр для поддержания поливной воды; 3 – намороженные слои льда; 4 – естественный ледовый покров; 5 – вода

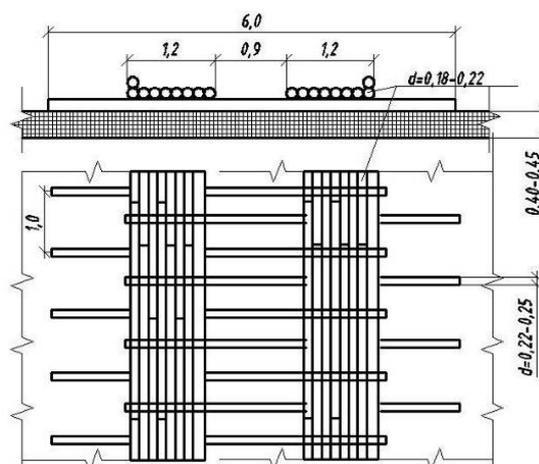


Рис. 4.27. Усиление ледового покрова устройством деревянного настила

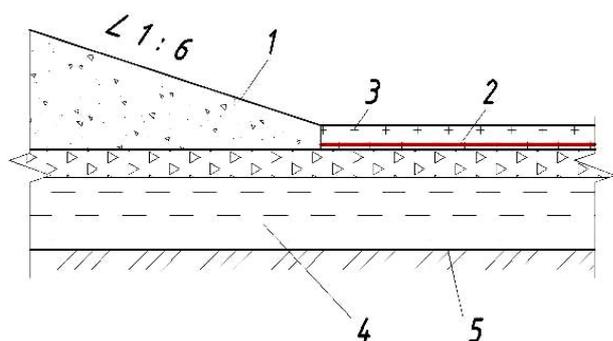


Рис. 4.28. Усиление ледового покрова армированием геосинтетическими материалами (верхней части)

Сметные расчёты по вариантам выполнены ресурсным методом на 2 года. Расчёты выполнялись в текущих ценах по состоянию на 01.04.2010 г.

Затраты на машины, материалы, заработную плату и сметная стоимость приведены на рис. 4.29 – 4.32.

Как видно из приведённых данных, стоимость устройства деревянного настила превышает стоимость усиления намораживанием дополнительных слоев льда более чем в 15 раз.

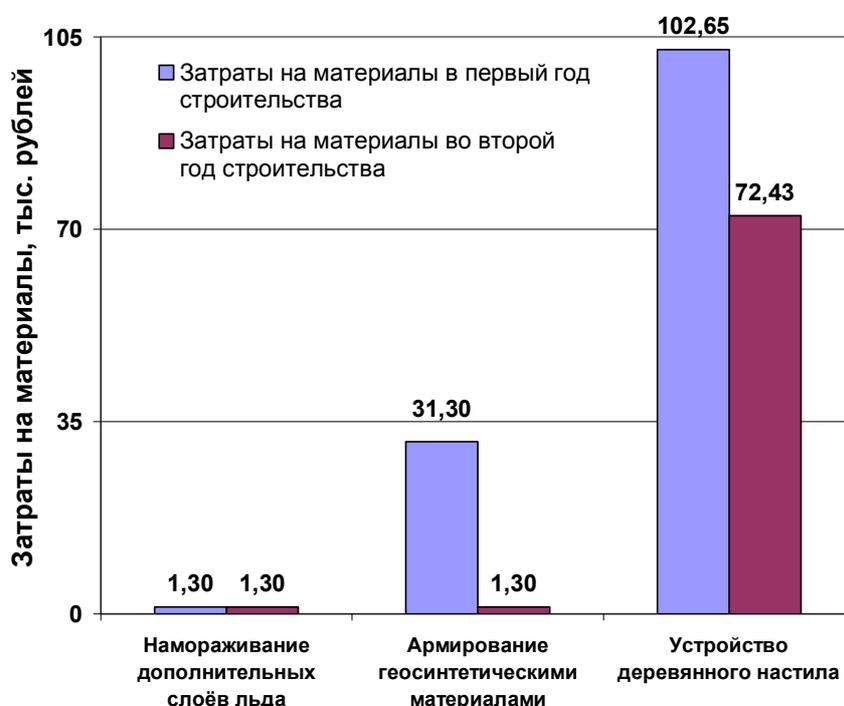


Рис. 4.29. Затраты на материалы при строительстве ледовой переправы за два года по вариантам усиления

Стоимость армирования льда геосинтетическими материалами увеличивается только за счёт стоимости самого материала и увеличения затрат (на 100 р. на 100 п.м) ввиду появления дополнительной операции – укладки армирующего материала на поверхность льда. Намораживание льда в этом случае необходимо только для предотвращения повреждений геосинтетического материала колёсами автотранспорта, а поэтому не превышает 5÷7 см.

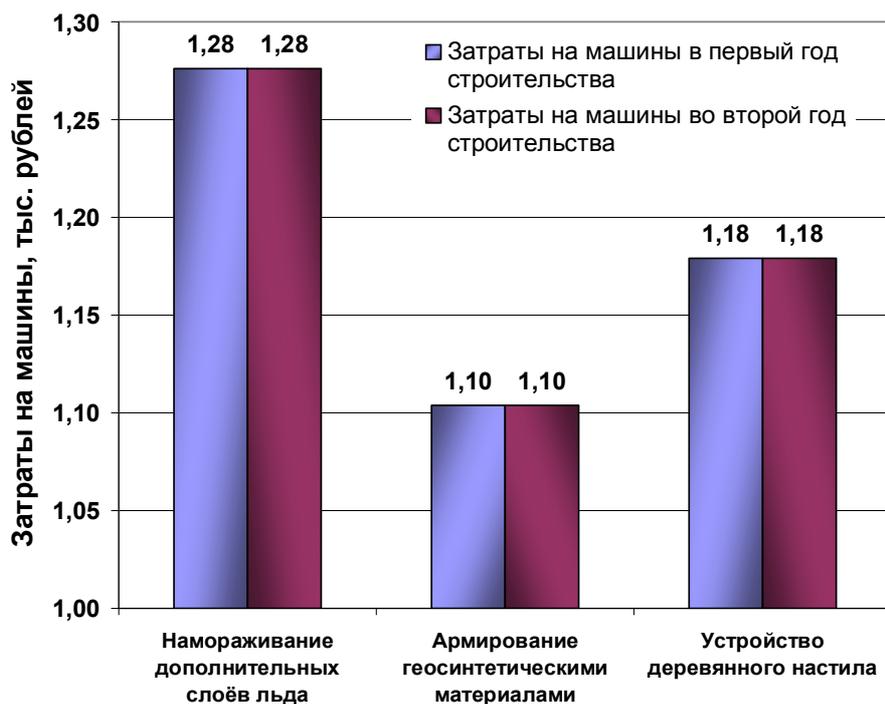


Рис. 4.30. Затраты на машины при строительстве ледовой переправы за два года по вариантам усиления

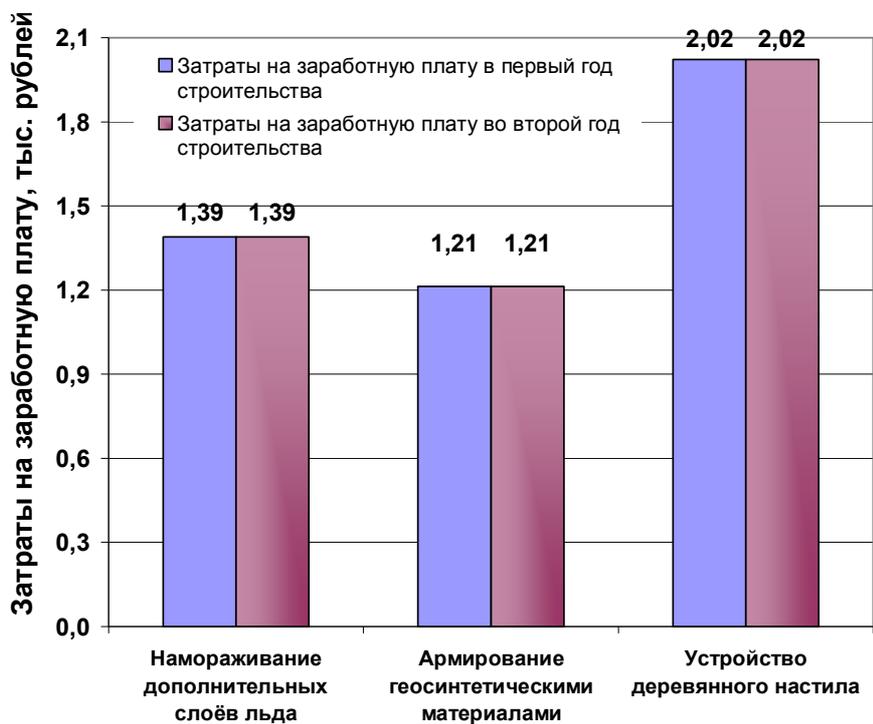


Рис. 4.31. Затраты на заработную плату при строительстве ледовой переправы за два года по вариантам усиления

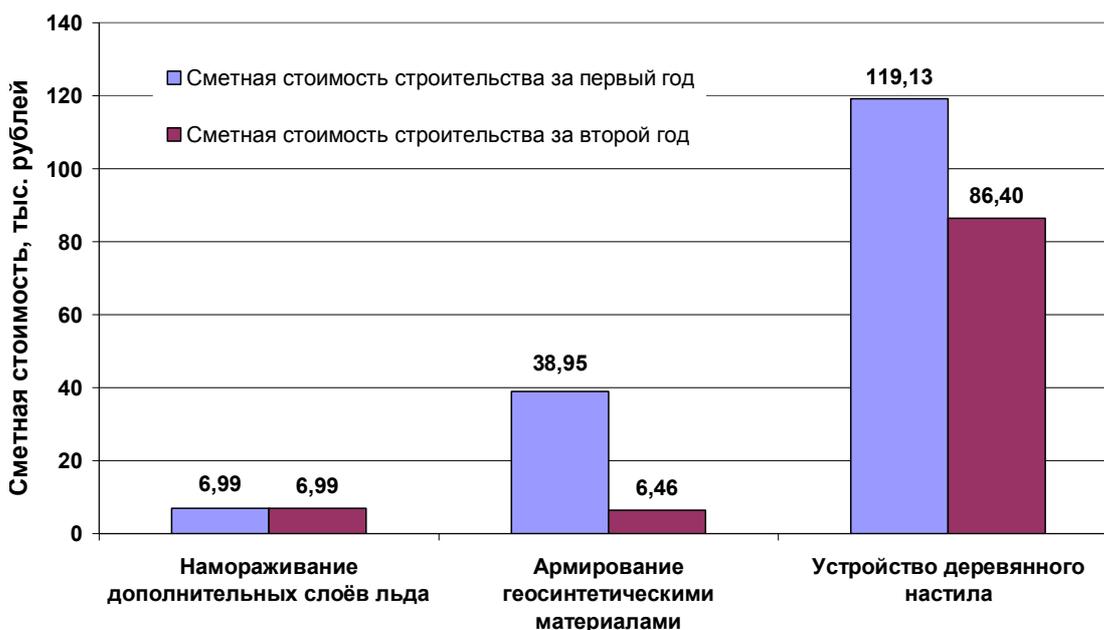


Рис. 4.32. Сметная стоимость строительства ледовой переправы за два года по вариантам усиления

При сравнении вариантов усиления следует учесть, что увеличение несущей способности ледового покрова намораживанием льда имеет ограничения: этот метод эффективен только при сравнительно тонких слоях (до 50 см); толщина намороженного слоя не должна превышать 30 % от естественной толщины льда.

Геосинтетические материалы могут быть использованы для армирования второй раз. Это существенно снижает затраты при строительстве армированной ледовой переправы на второй год.

Установлено, что армирование верхней части ледяной плиты снижает трещинообразование. Это позволяет снизить затраты на содержание переправы. Приведём сравнение затрат на содержание участка ледовой переправы (100 п.м) по вариантам усиления (рис. 4.33).

Расчёты показывают, что усиление льда геосинтетическими материалами позволяет снизить затраты на содержание 100 п.м ледовой переправы: до 2 тыс. руб. по сравнению с намораживанием дополнительных слоёв льда и до 46 тыс. руб. по сравнению с усилением деревянным настилом.

Отсутствие статистических данных не позволяет более точно оценить снижение затрат на содержание при использовании геосинтетических материалов, т.к. в данном расчёте учтены только «мелкие» трещины, которые ремонтируются колотым льдом. Однако сквозные трещины с величиной раскрытия больше 10 см необходимо перекрывать деревянными настилами, что увеличит затраты в разы.

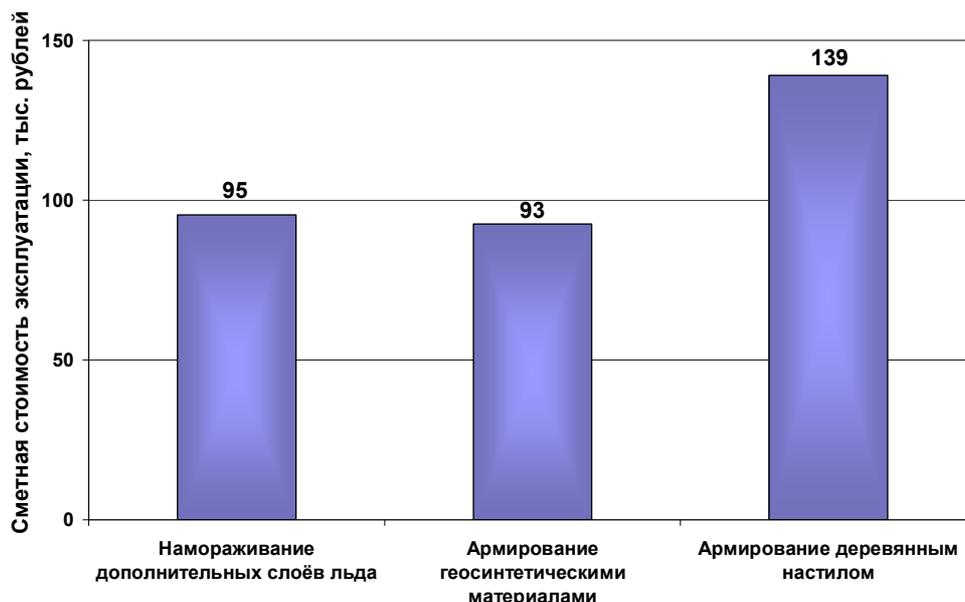


Рис. 4.33. Сметная стоимость эксплуатации ледовой переправы по вариантам усиления

Рассмотрим экономию издержек в сфере транспорта на примере ледовой переправы в Усть-Ишиме (Омская область).

Строительство ледовой переправы, усиленной намораживанием дополнительных слоёв льда или геосинтетическими материалами, может быть начато при толщине естественного льда 15 см. Для усиления льда деревянным настилом минимальная требуемая толщина естественного льда составляет 40÷45 см. Меньшая толщина льда может не выдержать веса строения.

Поскольку намораживание льда снизу (естественное промерзание льда, очищенного от снега) зависит от первоначальной толщины льда и температуры воздуха, то ориентировочное время нарастания льда до требуемой толщины можно подсчитать, используя табл. 4.3 [3].

Таблица 4.3. Естественный прирост льда, очищенного от снега (см)

Среднесуточная температура воздуха, °С	Начальная толщина льда						
	5	10	20	30	40	50	60
	Увеличение толщины льда за сутки						
– 10	6,3	3,6	2,8	2,1	1,5	1,1	0,7
– 15	8,3	5,2	3,9	2,8	2,0	1,4	1,0
– 20	9,5	6,5	5,0	3,6	2,6	1,6	1,2
– 25	11,1	8,1	5,9	4,2	2,9	1,8	1,4
– 30	12,3	9,2	6,8	4,8	3,3	2,1	1,6
– 35	13,1	10,1	7,3	5,2	3,7	2,3	1,7

Таким образом, при температуре воздуха от минус 20 °С до минус 25 °С нарастание льда до 40 см будет длиться примерно 6 дней.

Длительность строительства ледовой переправы (участок 100 м х 10 м) составит:

- усиленной намораживанием слоёв льда – 4 дня;
- усиленной геосинтетическими материалами – 2 дня;
- усиленной деревянным настилом – 3 дня.

Поэтому первой будет сдана в эксплуатацию ледовая переправа, усиленная геосинтетическим материалом, через 2 дня – усиленная намораживанием дополнительных слоёв льда, а еще через 4 дня – усиленная деревянным настилом.

Общая задержка (от момента сдачи переправы, армированного геосинтетическим материалом) составит 2 дня для усиления намораживанием и 9 дней – для усиления деревянным настилом.

Если предположить, что по рассматриваемой ледовой переправе предполагается ежедневно перевозить, например, 100 тонн какого-либо груза стоимостью 1000 руб./т, тогда предприятие теряет от 200 до 900 тыс. руб.

Также при исследовании издержек в сфере транспорта следует рассмотреть себестоимость перевозок в зависимости от грузооборота.

Допустим, что предприятие имеет в своём парке следующие транспортные средства:

- КамАЗ 55111 грузоподъёмностью 10 т (стоимость 1 маш./ч транспортных услуг – 884,36 руб.);
- КамАЗ 55111 с прицепом до 20 т (1285,82 руб.);
- КрАЗ-250 с прицепом до 30 т (1417,65 руб.) [125 – 128].

Усиление тремя способами начинают одновременно при естественной толщине льда 50 см.

При усилении намораживанием дополнительных слоёв льда толщина намораживаемого слоя не должна превышать 30 % толщины естественного льда. Поэтому, с учётом того, что прочность намороженного льда в два раза меньше, чем у естественного, получаем примерно 65 см чистого льда. Максимальная несущая способность такой переправы будет составлять 28 т. Усиление геосинтетическими материалами и устройство деревянного настила, уложенного на естественный ледовый покров, дают увеличение несущей способности в 1,5 раза. Поэтому допустимая нагрузка в этом случае будет 37 т.

Требуется провезти 100 т груза через переправу. С учётом максимального использования грузоподъёмности автомобиля получаем,

что на переправе с несущей способностью 28 т груз можно перевезти пятью автомобилями по 20 т. Стоимость перевозки составит 6429,10 руб. На переправе с несущей способности 37 т – тремя автомобилями по 30 т и одним – 10 т. Тогда стоимость перевозки будет равна 5137,31 руб., что на 25 % дешевле.

При наличии объездного пути длиной, например 10 км, который может пропустить автомобиль грузоподъемностью 30 т. При стоимости, например, 100 руб./км получаем удорожание на 20 %. Полученные расчёты представим в табл. 4.4.

Таблица 4.4. Результаты расчета издержек в сфере транспорта

Показатель	Тип усиления льда		
	Намораживание дополнительных слоёв льда	Усиление геосинтетическим материалом	Усиление деревянным настилом
<i>Издержки от более позднего ввода переправы в эксплуатацию</i>			
Начало строительства (толщина льда 15 см)	+	+	Задержка на 7 дней до нарастания льда толщиной 40 см
Длительность строительства, дни	4	2	3
Начало эксплуатации ледовой переправы	Задержка на 2 дня	+	Задержка на 9 дней
Издержки, т/день	200	–	900
<i>Издержки с учётом грузооборота</i>			
Несущая способность переправы, т	28	37	37
Затраты на перевозку грузов, руб. (без перепробега на объезд)	6429,10 (+25 %)	5137,30	5137,10
Затраты на перевозку грузов, руб. (с перепробегом на объезд – 10 км)	6137,30 (+20 %)	5137,30	5137,10
Издержки, руб. /день	6137,30	5137,30	5137,10

Нашими исследованиями установлено, что при армировании льда геосинтетическими материалами процесс разрушения льда носит ступенчатый характер, не происходит резкого пролома конструкции. Такой характер разрушений предполагает снижение несчастных случаев со смертельным исходом и потери груза. Поэтому мы считаем,

что полный эффект от применения геосинтетики превысит затраты на материал и в первый год строительства.

Одновременно с экономическим эффектом и увеличением безопасности движения по переправе мы также обращаем внимание на экологическую безопасность конструкции (по сравнению с устройством деревянного настила). Это связано с тем, что геосинтетический материал экологически безопасен (на него не влияет высокая влажность, он не подвержен гниению), он достаточно просто может быть извлечен изо льда в весенний период (в отличие от древесины).

4.6. Строительство опытных участков на реальных объектах

Наши первые публикации об эффективности усиления ледовых автозимников и переправ с помощью геосинтетических материалов появились в 2007 г. За прошедшие годы опубликовано более десятка статей, получено два патента на изобретения. Предложенные нами способы армирования ледового покрова оказались актуальны, довольно просты и эффективны, а поэтому их внедрение на реальных объектах – речных ледовых переправах – получает распространение уже без нашего участия. При этом, к сожалению, нас не ставят в известность, что не позволяет обобщать получаемые результаты. Иногда для армирования льда применяют геосинтетику, которая априори не может дать положительный результат.

Опыт строительства ледовой переправы на р. Пеза

С сайта компании «ГЕОКОМ» (http://miakoming.ru/InfoTech/Ledovie_perepravu/), мы получили сведения о том, что ОАО «Мезенское дорожное управление» на автомобильной дороге Архангельск – Белогорский – Пинега – Кимжа – Мезень (ледовая переправа через реку Пеза) в 2011 г. провело эксперимент по использованию геосетки при устройстве ледовой переправы.

Мы связались с этим управлением и получили более подробную информацию о проведенном опытном строительстве. Учитывая, что эта информация* имеется в открытой сети Интернет (http://www.ador.ru/data/files/docs/innovations_01.pdf), считаем возможным и полезным опубликовать её и в нашей монографии.

* – информация приводится без редакционной правки.

«Для обеспечения проезда по автодорогам области в зимний период за счёт средств областного бюджета устраивается и содержится около 60 ледовых переправ общей протяжённостью 23,5 км.

Отличительной особенностью ледовых переправ и автозимников является невысокая интенсивность и скорость движения транспортных средств, в основном значительной грузоподъёмности. Для безопасного пропуска большегрузных транспортных средств (общей массой 30-40 т и более) требуется прочный, с минимальным количеством трещин, ледяной покров (толщиной 70 см и более), формирование которого может происходить до середины зимы.

В настоящее время используют два способа увеличения грузоподъёмности ледовых переправ: искусственное намораживание с увеличением толщины льда и усиление ледяного покрова деревянным брусом с настилом. Первый способ эффективен только до определённых пределов (толщина намораживаемого слоя – не более 30 % от толщины естественного льда), кроме того, при его применении увеличивается вероятность образования глубоких трещин. Второй способ более дорогой и трудоёмкий (особенно если учесть, что весной, перед ледоходом, весь деревянный настил должен быть убран из льда).

В качестве более современного и технологичного решения было предложено применить технологию, разработанную в 2008 году д.т.н., проф. В.В. Сиротюком (СибАДИ) – армирование льда геосеткой (обращаем внимание на то, что наши коллеги из дорожного управления сочли необходимым упомянуть автора технологии армирования, в отличие от компании «ГЕОКОМ»).

Эта технология позволяет решить сразу 2 проблемы: повысить несущую способность льда (на 30 – 65 %) и уменьшить образование температурных трещин.

Для армирования применялась стеклосетка ГЕО СТ 50/50 производства компании «Миакон» (табл. 4.5).

15 февраля с 10 до 14 утра при температуре воздуха – 26 °С на ледовой переправе через реку Пеза на автодороге Архангельск – Белогорский – Пинега – Кимжа – Мезень была уложена геосетка (400 кв. м, армировано 50 м переправы). Толщина льда на момент эксперимента составляла 85 см (рис. 4.34, 4.35).

Таблица 4.5. Технические характеристики геосетки

Наименование	Стеклосетка ГЕО СТ 50/50
Длина рулона, м	100
Ширина рулона, м	4
Размер ячейки, мм	25×25
Прочность на разрыв, кН/м продольная (основа)	50
Прочность на разрыв, кН/м поперечная (уток)	50
Относительное удлинение при разрыве, %	≤3%
Допустимая потеря прочности на растяжение после 25 циклов промораживания - оттаивания, не более %	10%
Температурный диапазон применения	от -100° до +280°С
Содержание связующего вещества	≤20%
Пропитка	Полимерно битумная эмульсия
Материал	Стекловолокно



Рис.4.34. Подготовительные работы: очистка от снега, формирование бортика для удержания воды



Рис. 4.35. Распределение сетки (с перехлестом 30 см), заливка водой; толщина льда над сеткой 7 см после эксперимента и 12 см окончательная, после повторного пролива водой на второй день

Стоимость. На каждые 100 п.м переправы удорожание за счёт армирования геосеткой составило 66,8 тыс. руб. При повторном применении геосетки стоимость армирования составит 20 тыс. руб./100 п.м (стоимость геосетки в Архангельске 57 руб./м², доставка 1 т груза в Мезень 4471 руб., укладка 1000 м² сетки – 25,13 тыс. руб.)».

Кроме описания опытного строительства мы получили и выводы по эксперименту, составленные в Мезенском дорожном управлении, приводим их без редакционной правки.

«Здравствуйте, Ольга Владимировна!

Рады, что наш опыт показался Вам интересен.

Выводы по эксперименту с применением геосинтетических материалов были сделаны и в двух словах они сводятся к тому, что материал дает определенный эффект, но он должен быть экономически оправдан, т.е. применяться не на дорогах общего пользования с финансированием 16-19 % от нормативного и грузоподъемностью по техническому заданию 15 т, а на лесовозных дорогах с большой интенсивностью, нефтепромыслах и т.д., где идет речь о максимальных грузоподъёмностях и хороших экономических стимулах.

В приложении материалы выводов по эксперименту.

С уважением, Лыков Игорь Николаевич.

Инженер ППО ОАО «Мезенское дорожное управление»

«Выводы по эксперименту

- 1. На практике установлена возможность применения геосинтетических материалов для армирования ледовых переправ.*
- 2. Выявлены особенности в технологии применения геоматериалов.*
- 3. Армированию подвергалась верхняя треть ледяной плиты, что позволит упростить процесс извлечения геосинтетики путём оттаивания весной.*
- 4. До укладки геосетки ледяной покров был покрыт раскрытыми трещинами (до 4-5 см ширина раскрытия, рис.4.36).*
- 5. Через 1,5 месяца обследование экспериментального участка показало лишь наличие сетки мелких нераскрытых трещин (рис. 4.37).*
- 6. Как следствие сплошного ледового покрова, без раскрытых трещин, можно отметить и повышение несущей способности ледовой переправы, армированной геосинтетическими материалами.*



Рис.4.36. Температурные трещины на неармированном участке

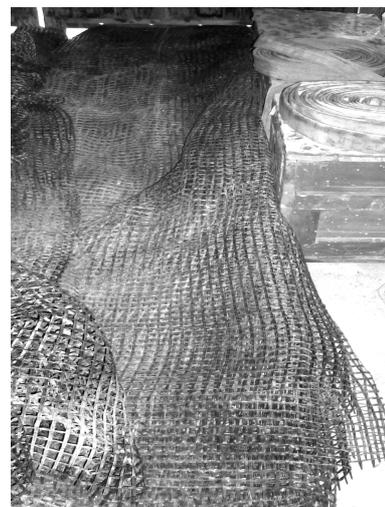


Рис.4.37. Сетка мелких нераскрывшихся трещин на армированном участке

7. Извлечение геосинтетического материала производилось вручную после закрытия движения на ледовой переправе и последующего самопроизвольного оттаивания геосетки. Работы были выполнены в конце апреля и не вызвали трудностей. Материал уложен и отправлен на склад для хранения (рис.4.38).»

Рис.4.38. Геосинтетический материал на хранении

Вышеприведённые результаты «независимой экспертизы» подтвердили наши рекомендации, а именно, что наиболее простая технология – «верхнее армирование» существенно уменьшает трещинообразование в ледовом покрове, что повышает несущую способность переправы.



Дорожники подсчитали экономику вопроса и пришли к выводу, что армирование эффективно только при определённой интенсивности движения и грузоподъёмности переправы (что следует и из наших выводов). При этом следует отметить, что вопрос о повышении несущей способности не учитывался при сравнении. Но самое главное – не учитывался важнейший вопрос (который пока мы в России не умеем оценить по достоинству) повышения безопасности движения людей и транспортных средств по армированной переправе.

Опыт строительства ледовой переправы на р. Иртыш

В 2014 г. нам удалось заинтересовать руководителей Министерства развития транспортного комплекса Омской области и добиться поддержки и содействия в строительстве опытного участка с армированием ледяного покрова на крупной судоходной реке Иртыш в районе п. Черлак.

Ввиду того, что денег на приобретение геосинтетического материала у наших дорожников не оказалось, нам удалось договориться с фирмами, производящими потребные армирующие геосинтетические материалы в г. Красноярске и г. Владимире, о поставке материалов для опытного участка без оплаты (кафедра «Проектирование дорог» СибАДИ выражает благодарность руководителям фирм ЗАО «Техполимер» (г. Красноярск) и ООО «Дорстройматериалы» (г. Владимир) за бесплатно предоставленные геосинтетические материалы для строительства опытного участка). Свойства геосинтетических материалов, используемых на опытном участке, приведены в табл. 4.6 и 4.7.

Таблица 4.6. **Геокompозит марки «Георешетка стеклянная клееная АРМДОР®-К 70/50/240 по СТО 70950163-001-2012» без пропитки битумом**

Наименование показателей	Фактические значения
Материал	Стекловолокно
Поверхностная плотность, г/м ²	450 ± 50
Прочность при растяжении, кН/м:	
- в продольном направлении	100
- поперечном направлении	100
Относительное удлинение при максимальной нагрузке, %	
- в продольном направлении	3
- поперечном направлении	3
Стойкость к агрессивным средам, %	95
Устойчивость к ультрафиолетовому излучению, %	95
Размер ячеек, мм	50x50
Ширина рулона, см	240

Таблица 4.7. Георешетка дорожная армированная РД-60 50x50

Наименование показателей	Фактические значения
Количество металлических жил, шт.	6
Прочность при растяжении, кН/м, не менее (вдоль/поперёк)	60/60
Относительное удлинение при разрыве, %, не более (вдоль/поперёк)	3/3
Повреждаемость при укладке, %, не более	2
Гибкость на бруске: - при минус 20°С - минус 60°С	Отсутствие трещин и расслоений на лицевой стороне материала
Стойкость к многократному замораживанию и оттаиванию (морозостойкость), %, не ниже	99
Коэффициент армирования, %	58
Коэффициент уменьшения общей осадки, %	38
Условный модуль деформации, кН/м, не менее	5100
Размер рулона: - ширина, м - длина, м	6 50

Непосредственно на опытном участке работы выполнялись 23 декабря 2014 г. силами Черлакского ДРСУ под руководством директора М.Х. Смаилова при активном участии представителей кафедры – О.В. Якименко, Г.М. Левашова, А.А. Захаренко.

Впервые армировалась не только ледяная плита, но и наиболее слабое место на любой переправе – стык ледяной плиты с берегом. Для армирования этого участка использовалась специальная георешетка (с металлическими струнами), которая производится фирмой ЗАО «Теполимер» в г. Красноярске.

Уже в процессе работ мы наблюдали повышение уровня воды (и льда) на реке с образованием трещин во льду (рис. 4.39).

Поверх ледового покрова укладывали специально стеклосетку, обладающую повышенными гидрофильными свойствами и хорошо смерзающуюся со льдом. Службы, надзирающие за речными переправами, разрешили нам уложить геосетку только на участке протяжённостью 30 м от берега шириной 20 м, т.к. все опасались проблемы, связанной с извлечением геосетки из льда весной (остальная часть переправы не армирована). Стеклосетку прикрепляли к береговой георешётке, служащей ещё и анкером для гарантированного извлечения стеклосетки из льда.

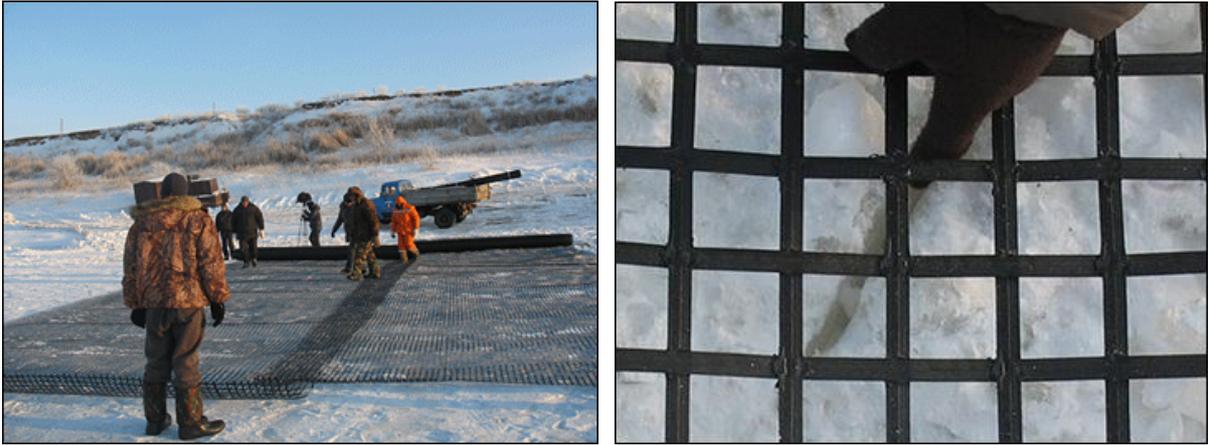


Рис. 4.39. Укладка георешётки на стыке ледяной плиты с берегом

Береговую часть георешётки засыпали снегом, затем весь армирующий материал заливали водой из проруби (рис. 4.40).



Рис. 4.40. Укладка стеклосетки, поливка армирующего материала водой

Не всё удалось реализовать должным образом. Основная причина – тёплая погода (от 0 °С до минус 3 °С), из-за которой вморажива-

ние геосетки в лёд на нужную глубину происходило очень медленно.

Открытие переправы осуществлялось 25 декабря (температура воздуха была около $0\text{ }^{\circ}\text{C}$), средняя толщина льда 25 см. Поэтому переправа пропускала автотранспорт весом до 2 т. Во время открытия переправы мы обнаружили, что стеклосетка хорошо заморожена в лёд, а береговая часть, засыпанная снегом и политая водой, не промёрзла за двое суток и георешётка местами видна в колее (рис. 4.41).



Рис. 4.41. Состояние армированных участков во время открытия переправы

Первое обследование и испытания опытного участка производили 16 января 2015 г. при температуре воздуха минус $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ сотрудники кафедры с помощью Черлакского ДРСУ. Выполняли разметку (рис. 4.42), взвешивание грузового автомобиля (5 т), измерение толщины льда.



Рис. 4.42. Разметка на опытном участке

Затем выполняли испытания посредством определения величины изменения высотных отметок поверхности льда с помощью высо-

коточного нивелира и рейки. Определяли отметки до заезда на точку грузового автомобиля, после заезда и стабилизации отметки, после разгрузки льда в контролируемой точке (рис.4.43).



Рис. 4.43. Испытания – измерение прогибов ледяной плиты под нагрузкой и сравнение показателей на армированном и неармированных участках

Испытание показало, что в целом ледовая переправа находится в удовлетворительном состоянии, толщина льда к моменту испытания увеличилась в среднем до 40 см, а разрешённый вес транспортных средств – до 5 т. При этом установлены существенные различия на армированном и неармированных участках.

На неармированных участках (рис. 4.44):



Рис. 4.44. Характерные проблемы на неармированной части ледового покрова

- колебания уровня воды в Иртыше и низкие температуры привели к образованию трещин в ледяном покрове;

- на некоторых участках через сквозные широкие трещины на лёд выступает вода;

- наибольшие проблемы возникают в местах сопряжения ледяного покрова с берегом.

На армированном участке:

- сопряжение ледового покрова с берегом не вызывает проблем;

- во льду имеются только тонкие волосяные трещины;

- воды на льду нет.

Испытания под нагрузкой (измерение чаши прогибов ледяной плиты от гружёного автомобиля) показали, что армированный участок ледовой переправы обладает несущей способностью на 30 % больше, чем неармированные. При этом прогиб армированного льда восстанавливается быстрее, чем неармированного.

Второе обследование и испытание опытного участка производили 4 марта 2015 г. при температуре воздуха минус 10 °С. Порядок и методика работ не отличалась от первого обследования, за исключением веса грузового автомобиля, который увеличили до 10 т.

Толщина льда на переправе составляла к этому времени 90 см. Интенсивность движения транспортных средств по переправе изменялась в пределах от 20 до 70 авт. в час. Ввиду ограничения разрешённой грузоподъёмности на переправе до 10 т, в основном это были легковые и грузовые автомобили с малой грузоподъёмностью (рис. 4.45).



Рис. 4.45. Движение по переправе

Измерения показали, что на армированном участке ледовой плиты прогибы меньше всего на 10 %, по сравнению с неармированным. То есть с увеличением толщины льда с 40 см (при первом испытании) до 90 см эффективность геосетки, замороженной в верхнюю часть плиты всего на 4-5 см, снизилась, что вполне логично. Как и при первом испытании, на армированном участке сопряжение ледяного покрова с берегом не вызывает проблем, во льду имеются только тонкие волосяные (безззорные) трещины, воды на льду нет.

Извлечение армирующих материалов из льда осуществлялось 23 марта 2015 г. силами Черлакского ДРСУ при участии сотрудников кафедры.

Руководители МЧС области были серьёзно озабочены прогнозом высокого поднятия уровня воды в р. Иртыш с подтоплением поселений ввиду обильного снегового покрова. Поэтому сценарий извлечения армирующего материала, предложенный нами, был существенно изменён по настоянию МЧС.

Во-первых, поверхность льда на опытном участке была «затемнена» тонким слоем песка ещё до закрытия переправы, что вызвало более интенсивное таяние льда (рис. 4.46).



Рис. 4.46. Распределение песка и последующее интенсивное таяние льда

Во-вторых, т.к. переправа ещё работала, а геосинтетический материал уже вытаял из льда, поэтому он подвергся интенсивному воздействию шипованных шин автомобилей и был частично повреждён (4.47).

В-третьих, часть геосетки и береговая часть георешётки были закрыты снегом и снежным накатом. Для ускорения извлечения ар-

мирующего материала верхняя часть снега была удалена автогрейдером, что также привело к его частичному повреждению (рис. 4.48).



Рис. 4.47. Движение машин по вытягнутому геосинтетическому материалу



Рис. 4.48. Очистка поверхности автогрейдером с повреждением георешётки

Удаление геосинтетического материала со льда и береговой части выполняли рабочие ДРСУ под контролем сотрудников МЧС (рис. 4.49).



Рис. 4.49. Удаление геосинтетических материалов

На участках переправы, где геосинтетический материал не подвергался непосредственному механическому воздействию колёс автотранспорта и ножа автогрейдера, он сохранился в удовлетворительном состоянии (рис. 4.50).



Рис. 4.50. Состояние геосинтетического материала при извлечении

Поэтому применение этого материала для армирования переправы во второй раз возможно только выборочно, после просушки, осмотра, испытания и отбраковки повреждённых частей.

Таким образом, по объективным и субъективным причинам далеко не всё удалось сделать так, как планировалось перед строительством опытного участка. Но в целом результаты опытного строительства получили положительную оценку у администрации и работников ДРСУ Черлакского района и руководителей дорожного хозяйства Омской области. При этом возникли вопросы экономического плана: как оценить получаемый экономический эффект от армирования ледовых переправ и обеспечить финансирование для широкого внедрения этого инновационного решения на остальных восьми переправах в Омской области?

Выводы по четвёртой главе

1. При строительстве опытных участков апробировано три конструктивно-технологических решения (метода) усиления ледового покрова с использованием трёх видов геосинтетических материалов:

- укладка армирующего материала на поверхность льда с последующим намораживанием дополнительных слоёв льда;
- усиление льда способом предзимнего «притапливания» армирующего материала;

- усиление льда способом «подныривания» армирующего материала под тонкий лёд.

Причём второй и третий методы армирования ледового покрова ранее не описаны в публикациях и не встречались в мировой практике (на новые способы армирования ледового покрытия получен патент на изобретение и свидетельство на полезную модель).

2. Строительство опытных участков позволило установить, что наиболее технологичными методами являются укладка армирующего материала на поверхность льда с последующим намораживанием дополнительных слоёв льда и усиление льда способом «подныривания» армирующего материала. Предложенные технологии могут быть применимы для многослойного армирования льда.

Технология предварительного предзимнего «притапливания» армирующего ГМ применима только на нешироких водоёмах со стоячей водой, к которым не будет «закрыт» доступ в предзимний период. Кроме того, для укладки армирующего материала в проектом положении этим методом требуется значительное количество времени и трудовых ресурсов.

В процессе опытного строительства отработаны технологические операции по усилению ледового покрова и извлечению армирующего материала весной.

3. Наблюдения и испытания, выполненные на опытных участках с использованием тяжёлых колёсных и гусеничных машин, позволили впервые получить опытные данные об эффективности усиления ледового покрова геосинтетическими армирующими материалами.

Сопоставление результатов испытаний с данными, полученными на базе математического моделирования, подтвердили достоверность этих моделей и возможность применения их для расчёта и прогнозирования несущей способности ледового покрова, армированного геосинтетическими материалами.

4. Установлено, что армирование верхней части ледового покрова ГМ снижает трещинообразование, что является основной причиной повышения несущей способности льда до 30 % (в зависимости от вида ГМ). При увеличении толщины естественного ледового покрова до 90 см и более повышение несущей способности при верхнем армировании снижается до 10 %.

Армирование нижней части ледового покрова менее эффективно с точки зрения снижения температурного трещинообразования, но

в большей степени увеличивает несущую способность ледовой переправы – до 70 % (в зависимости от вида применяемых ГМ).

Наибольший эффект даёт двухслойное армирование верхней и нижней частей ледяной плиты.

5. Эффективность армирования возрастает с увеличением общей массы транспортных средств, проходящих по ледовой переправе. При этом армирование снижает вероятность резкого пролома льда под избыточной нагрузкой, что способствует повышению безопасности движения транспортных средств по ледовому покрову переправы.

6. Эффективность армирования возрастает с увеличением прочности при растяжении и уменьшением деформативности армирующего ГМ. Желательно применение гидрофильных армирующих материалов, т.к. они лучше «смерзаются» (объединяются) с армируемым льдом.

Наибольшее увеличение несущей способности даёт применение стеклосеток. Однако, т.к. эти ГМ тонут в воде, то их применение для «нижнего» армирования возможно только при условии прикрепления к сетке поплавков, удерживающих её на плаву, и прижимающих к нижней поверхности армируемой ледяной плиты для вмораживания в лёд.

Применение для «нижнего» армирования георешёток из полипропилена менее эффективно с точки зрения увеличения несущей способности ледового покрова, но более технологично, т.к. эти ГМ обладают положительной плавучестью и в меньшей степени повреждаются при неаккуратном обращении.

7. Установлено, что геосетки и георешётки экологически безопасны, они могут извлекаться из льда в весенний период, храниться на тёмном складе и повторно применяться для армирования ледового покрова.

8. Техничко-экономическая оценка конструктивно технологических решений с армированием ледового покрова ГМ производилась в сравнении с традиционными способами увеличения несущей способности ледовых переправ: «верхнее» намораживание дополнительных слоёв льда и укладка на лёд деревянного настила.

Сравнение показало следующее:

а) усиление ледового покрова деревянным настилом является наименее эффективным конструктивно-технологическим решением ввиду высокой стоимости и трудоёмкости как строительства, так и обязательного извлечения деревянного настила в весенний период.

При этом сохранность древесины составляет не более 30 %. Этот способ усиления может быть эффективен при наличии местного строительного материала и высокой интенсивности движения тяжёлых транспортных средств;

б) в случае, если ледовая переправа должна обеспечить максимальную несущую способность до 20 т и при достаточно низком грузообороте (до 100 авт./сут), усиление льда геосинтетическим материалом уступает традиционному способу усиления – намораживанию дополнительных слоев льда;

в) армирование ледового покрова ГМ даёт большее увеличение несущей способности по сравнению с намораживанием дополнительных слоёв льда. При этом практически исключаются несчастные случаи, связанные с резким проломом льда под автотранспортом. ГМ может повторно применяться для армирования. Армирование ледового покрова может увеличить срок службы ледовой переправы от 10 до 20 дней.

Поэтому армирование ледового покрова ГМ оказывается наиболее эффективным при необходимости увеличения несущей способности переправы до величины более 20 т и при высоком грузообороте (более 100 авт./сут).

9. Опытное строительство ледовых переправ на реальных объектах (р. Пеза в Архангельской обл. и р. Иртыш в Омской обл.) подтвердило результаты наших исследований, что позволяет рекомендовать предлагаемые конструктивно-технологические решения для усиления ледовых автозимников и переправ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Впервые разработана классификация способов увеличения несущей способности ледового покрова на переправах.

2. Установлено, что при снижении температуры до минус 20 °С и высокой влажности происходит:

– увеличение предела прочности на растяжение до 5 % для ГМ на основе полипропилена и до 1 % для ГМ на основе стекловолокна;

– снижение общей относительной деформация ГМ на основе полипропилена на 30÷35 %, а на основе стекловолокна – до 7 %;

– снижение ползучести ГМ и увеличение длительной прочности ГМ на основе полипропилена до 46 %.

При испытаниях на замораживание-оттаивание максимальное снижение прочности (до 13 %) наблюдается у ГМ из полипропилена, а минимальное (4 %) – у стеклосетки.

3. Теоретические исследования напряжённого состояния армированных ледяных образцов-балок при их работе на первой и второй стадиях позволили установить закономерности разрушения армированного материала под воздействием нагрузки. Установлено, что наклон и зона локализации трещин в армированных образцах хорошо совпадают с аналогичными характеристиками изолиний, полученных в результате расчётов. Это подтверждает адекватность выбранной модели армированного образца и возможность применения этой модели для прогнозирования деформативно-прочностных показателей льда, армированного ГМ, на наиболее опасных участках – при зависании льда над поверхностью воды.

4. Установлено, что наиболее приемлем для расчёта армированной ледяной плиты метод Матвеева – Немировского, позволяющий определять параметры многослойной плиты, лежащей на упругом основании, и учесть армирующую прослойку из ГМ. В результате расчётов по этому методу получено, что введение в ледяную плиту геосеток и плоских георешёток увеличивает её несущую способность от 14 до 56 %.

5. Рекомендован упрощённый способ (формула) определения грузоподъёмности ледового покрова, усиленного геосинтетическими материалами. Наличие ГМ предложено учитывать введением в известную формулу коэффициента армирования, численные значения которого определены в зависимости от свойств геосинтетического материала и его места расположения в армируемом материале.

6. Достоверность результатов расчётов по предлагаемым математическим моделям подтверждается удовлетворительным совпадением экспериментальных и теоретических данных. Различия величин уменьшения прогибов, полученных теоретически и при опытно-производственной проверке, составляют от 5 до 20 %.

7. На основании экспериментальных исследований, моделирующих наиболее опасные участки льда, зависшего над водой, установлено, что ГМ, вмороженные в нижнюю часть ледяных балок, изменяют кинетику разрушения образцов с увеличением прочности не более 15 %. Выявлены два этапа потери несущей способности ледяных образцов, армированных ГМ. Определено, что работа, потребная для разрушения балок, увеличивается в 3÷5 раз. Это позволяет прогнозировать повышенную безопасность ледовых переправ ввиду отсутствия резкого хрупкого разрушения армированного льда.

8. На основании теоретических и экспериментальных исследований предложены требования к ГМ, рекомендованным для армирования льда:

- прочность на растяжение – не менее 40 кН/м;
- относительное удлинение при разрыве (при отрицательной температуре) – не более 8 %;
- снижение прочности при воздействии отрицательных температур – не более 10 %;
- отсутствие снижения прочности при длительном водонасыщении;
- снижение прочности при действии циклов замораживания – оттаивания – не более 10 %;
- стойкость к ультрафиолетовому излучению – не менее 90 %;
- обеспечение гибкости материала на бруске радиусом (5 ± 1) мм при температуре – не выше минус 10 °С.

9. При строительстве опытных участков апробированы три конструктивно-технологических решения (метода) армирования ледового покрова (два из них являются новыми) с использованием трёх видов ГМ. Наиболее технологичными методами являются укладка армирующего материала на поверхность льда с последующим намораживанием дополнительных слоёв льда и усиление льда способом «подныривания» армирующего материала. Предложенные технологии могут быть применимы для многослойного армирования льда.

10. Получены достоверные опытные данные об эффективности усиления ледового покрова геосинтетическими армирующими мате-

риалами. Установлено, что армирование верхней части ледового покрова ГМ снижает трещинообразование и повышает несущую способность льда от 5 до 30 % (в зависимости от вида применяемых ГМ). Армирование нижней части ледового покрова увеличивает несущую способность ледяной плиты от 10 до 70 %.

Эффективность армирования возрастает с увеличением массы транспортных средств, проходящих по ледовой переправе, и уменьшается до 10 % с увеличением толщины ледяной плиты до 90 см.

11. Установлено, что геосетки и георешётки экологически безопасны, они могут извлекаться из льда в весенний период, храниться на тёмном складе и повторно применяться для армирования ледового покрова.

12. Технико-экономическая оценка конструктивно-технологических решений показала, что усиление ледового покрова деревянным настилом является наименее эффективным конструктивно-технологическим решением ввиду высокой стоимости и трудоёмкости как строительства, так и обязательного извлечения деревянного настила в весенний период.

В случае если ледовая переправа должна обеспечить грузоподъёмность до 20 т при низком грузообороте (до 100 авт./сут), усиление льда геосинтетическим материалом уступает традиционному способу усиления намораживанием дополнительных слоёв льда.

Армирование ледового покрова ГМ даёт большее увеличение грузоподъёмности по сравнению с намораживанием дополнительных слоёв льда. При этом практически исключаются несчастные случаи, связанные с резким проломом льда под автотранспортом (этот эффект нами не оценивался).

Армирование ледового покрова может увеличить срок службы ледовой переправы до 20 дней. Поэтому армирование ледового покрова ГМ оказывается наиболее эффективным при необходимости увеличения грузоподъёмности переправы до величины более 20 т и при высоком грузообороте (более 100 авт./сут).

13. ГМ может повторно применяться для армирования при условии недопущения движения транспортных средств непосредственно по армирующему материалу и аккуратному извлечению полотен весной, после закрытия переправы.

Библиографический список

1. О состоянии сети автомобильных дорог в районах Крайнего Севера и приравненных к ним местностей и её развитии в свете реализации задач, поставленных в Послании Президента Российской Федерации Федеральному Собранию Российской Федерации на 2007 год : информационно-аналитическая записка [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.severcom.ru/analytics/page2.html> (дата обращения к ресурсу: 04.10.2010).
2. ОДН 218.010 – 98. Инструкция по проектированию, строительству и эксплуатации ледовых переправ [Электронный ресурс]. – Введён 1998-10-01 // Кодекс. Право / ЗАО «Информационная компания "Кодекс"». – СПб., 2010.
3. ВСН 137 – 89. Проектирование, строительство и содержание зимних автомобильных дорог в условиях Сибири и Северо-Востока СССР [Электронный ресурс]. – Введён 1990-01-01 // Кодекс. Право / ЗАО «Информационная компания "Кодекс"». – СПб., 2010.
4. Песчанский, И.С. Ледоведение и ледотехника / И.С. Песчанский. – Л. : Изд-во «Морской транспорт», 1963. – 321 с.
5. Брегман, Г.Р. Ледяные переправы / Г.Р. Брегман, Б.В. Проскуряков // Труды научно-исследовательских учреждений ГУГМС КА / Гидрометеиздат. – М., 1943. – Серия V. – Вып. 5. – 218 с.
6. Наставление по инженерному делу для советской армии. – М. : Военное издательство, 1984. – 575 с.
7. Инструкция по устройству ледовых переправ. – М. : Штаб инженерных войск Красной армии, 1942. – 56 с.
8. Наставления по гидрологическому рекогносцированию рек, озёр, болот / ред. Я.Е. Джаган. – Л. : Гидрометеиздат, 1942. – 89 с.
9. Наставление по инженерному делу для пехоты РККА. – Ташкент : Госиздат Узб. ССР, 1941. – 154 с.
10. Наставления для инженерных и дорожных войск. Военные дороги и колонные пути. – М. : Военное издательство Министерства обороны СССР, 1958. – 440 с.
11. Порожняков, В.С. Ледяные переправы / В.С. Порожняков. – М. : НТИ Министерства автомобильного транспорта и шоссейных дорог РСФСР, 1963. – 87 с.
12. Инструкция по устройству ледовых переправ. – М. : Военное издательство Министерства обороны СССР, 1970. – 138 с.
13. ВСН 51 – 1 – 97. Правила производства работ при капитальном ремонте магистральных газопроводов [Электронный ресурс]. – Введён 1997-10-01 // Кодекс. Право / ЗАО «Информационная компания "Кодекс"». – СПб., 2009.
14. Макаров, В.И. Термосифоны в северном строительстве / В.И. Макаров. – Новосибирск : Наука, 1985. – 169 с.
15. Пат. 2170790 РФ. МПК7 Е 01 D 15/14. Способ создания ледяной переправы / В.М. Козин ; Государственное учреждение «Институт машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения РАН». – № 99109278/28 ; заявл. 07.05.1999 ; опубл. 20.07.2001.
16. Пат. 2137877 РФ. МПК6 Е 01 D 15/14, Е 02 D 27/52. Способ создания ледяной переправы / В.М. Козин; Государственное учреждение «Институт маши-

- новедения и металлургии ДВО РАН». – № 2000109012/03 ; заявл. 19.10.1998 ; опубл. 20.09.1999.
17. Пат. 2171332 РФ. МПК7 Е 01 D 15/14, Е 02 D 27/52. Способ создания ледяной переправы / В.М. Козин ; Государственное учреждение «Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН». – № 2000108979/03 ; заявл. 10.04.2000 ; опубл. 27.07.2001.
 18. Пат. 2164975 РФ. МПК7 Е 01 D 15/14, Е 02 D 27/52. Способ создания ледяной переправы / В.М. Козин ; Государственное учреждение «Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН». – № 2000102928/28 ; заявл. 04.02.2000 ; опубл. 10.04.2001.
 19. Пат. 2132898 РФ. МПК6 Е 01 D 15/14, Е 02 D 27/52. Способ создания ледяной переправы / В.М. Козин ; Государственное учреждение «Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН». – № 98118963/28 ; заявл. 19.10.1998 ; опубл. 10.07.1999.
 20. Пат. 2171335 РФ. МПК7 Е 01 D 15/14, Е 02 В 17/00. Способ создания ледяной грузонесущей платформы / В.М. Козин, А.Н. Кустов, В.С. Морозов ; Государственное учреждение «Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН». – № 2000109014/13 ; заявл. 10.04.2000 ; опубл. 27.07.2001.
 21. Заявка 2003128705 РФ. МПК7 Е 01 D 15/00. Устройство для создания ледяной переправы / В.М. Козин, А.В. Видякин, В.В. Лысенко, С.Г. Скрипников ; Государственное учреждение «Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН». – № заявл. 25.09.2003 ; опубл. 27.03.2005.
 22. Пат. 2132900 РФ. МПК6 Е 01 D 15/14, Е 02 D 27/52. Способ создания ледяной переправы / В.М. Козин ; Государственное учреждение «Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН». – № 98118969/28 ; заявл. 19.10.1998 ; опубл. 10.07.1999.
 23. Пат. 2149945 РФ. МПК7 Е 01 D 15/14, Е 02 D 27/52. Способ создания ледяной переправы / В.М. Козин ; Государственное учреждение «Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН». – № 99110594/28 ; заявл. 20.05.1999 ; опубл. 27.05.2000.
 24. Пат. 2350711 РФ. МПК Е 01 D 15/14. Способ создания ледяной переправы / Н.Ф. Вербух, А.И. Герасимов, А.С. Кондаков, В.А. Кулагин, С.Н. Попов, Х.Н. Семенов, Н.П. Старостин ; Институт проблем нефти и газа СО РАН, ОАО «Транс Дор Проект» ; – № 2006138235/03 ; заявл. 10.08.2006 ; опубл. 27.03.2009.
 25. Пат. 2281357 РФ. МПК Е 01 D 15/14. Устройство для создания ледяной переправы / В.М. Козин, А.В. Видякин, Н.А. Попова, С.Г. Скрипников, В.М. Козин ; Государственное учреждение «Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН». – № 2005113017/03 ; заявл. 28.04.2005 ; опубл. 10.08.2006.
 26. Пат. 2132901 РФ. МПК6 Е01D15/14, Е02D27/52. Способ создания ледяной переправы / В.М. Козин, А.В. Милованова, В.Д. Жесткая, И.Д. Черепюк, Ю.Я. Усольцев ; «Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН». – № 99118970/28 ; заявл. 19.10.1998 ; опубл. 10.07.1999.

27. Пат. 487202 СССР. М. Кл. Е 01 Н 4/00. Способ возведения ледяной переправы / В.Б. Прокопенко ; Брянский технологический институт. – № 1954442/29-33 ; заявл. 21.08.1973 ; опубл. 26.03.1976, Бюл. № 37.
28. Пат. 2125136 РФ. МПК6 Е 01 Н 4/00. Способ и устройство для создания ледовых переправ / А.А. Цернант, Н.А. Ефремов, Н.Г. Богданов, Н.В. Абрамов, Г.В. Хомутов, Г.С. Соловьева ; ОАО НИИ Транспортного строительства, ОАО НПО «Наука». – № 96118042/28 ; заявл. 03.09.1996 ; опубл. 20.01.1999.
29. Пат. 2379409 : МПК7 Е01D15/14. Способ создания ледовой переправы / В.В. Сиротюк, О.В. Якименко, А.А. Захаренко ; ГОУ ВПО «СибАДИ». – № 2008130212/03 ; заявл. 21.07.2008 ; опубл. 20.01.2010, Бюл. № 2.
30. Полез. модель 93820 РФ : МПК7 Е01D15/14. Ледовая переправа / В.В. Сиротюк, О.В. Якименко ; ГОУ ВПО «СибАДИ». – № 2008130266/22 ; заявл. 21.07.2008 ; опубл. 10.05.2010, Бюл. № 13.
31. Заявка 2005115933 РФ. Способ создания ледяной переправы / В.С. Поскачин, С.К. Лукин, П.П. Пермьяков, В.С. Поскачин. – заявл. 25.05.2005 ; опубл. 27.11.2006.
32. Пат. 487202 СССР : М. Кл. Е 01 Н 4/00. Способ возведения ледяной переправы / В.Б. Прокопенко ; Брянский технологический институт. – № 1954442/29-33 ; – заявл. 21.08.1973 ; опубл. 26.03.1976, Бюл. № 37.
33. Bearing capacity tests of ice reinforced with geogrid: Special report 92-28 / US Army Corps of Engineers; F. Donald Haynes, Charles M / Collins, Walter W. Olson. – Philadelphia, 1992. – 12 p.
34. Васильев, Н.К. Упрочнение льда для ледяных переправ / Н.К. Васильев // Автомобильные дороги. – 1988. – № 11. – С. 20–21.
35. Заявка 2009147045 РФ. Способ создания ледяной переправы / В.М. Козин, А.В. Видякин, Н.В. Папенко. – заявл. 17.12.2009 ; опубл. 27.06.2011.
36. Якименко, О.В. Классификация способов увеличения несущей способности ледовых автозимников / О.В. Якименко, Е.А. Вагнер // Межвузовский сборник трудов молодых учёных, аспирантов и студентов / СибАДИ. – Омск, 2010. – С. 237 – 241.
37. Якименко, О.В. Некоторые предпосылки для выбора материалов для эффективного армирования ледовых переправ / О.В. Якименко // Развитие дорожно-транспортного комплекса и строительной инфраструктуры на основе рационального природопользования : материалы III Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, 21–22 мая 2008 г. / СибАДИ. – Омск, 2008. – Книга 1. – С. 119 – 124.
38. Сиротюк, В.В. Применение геосинтетических материалов для армирования автозимников и ледовых переправ / В.В. Сиротюк, О.В. Якименко, А.А. Захаренко // Автомобильные дороги. – 2009. – № 11(936). – С. 64 – 67.
39. Якименко, О.В. Техничко-экономическое обоснование строительства ледовых переправ, армированных геосинтетическими материалами / О.В. Якименко // Развитие дорожно-транспортного комплекса и строительной инфраструктуры на основе рационального природопользования: материалы V Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, 19–21 мая 2010 г. / СибАДИ. – Омск, 2010. – Книга 1. – С. 34 – 37.

40. Пат. 2170789 РФ. МПК7 E 01 D 15/14, E 02 D 27/52. Способ создания ледяной переправы / В.М. Козин ; Государственное учреждение «Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН». – № 2000102858/28 ; заявл. 04.02.2000 ; опубл. 20.07.2001.
41. ОДН 218.5.005–2010. Классификация, термины, определения геосинтетических материалов применительно к дорожному хозяйству [Электронный ресурс]. – Введён 2010-06-16 // Кодекс. Право / ЗАО «Информационная компания "Кодекс"». – СПб., 2010.
42. Крашенинин, Е.Ю. Развитие конструктивно-технологических решений для продления срока службы асфальтобетонных покрытий, армированных геосинтетическими материалами : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.11 / Крашенинин Евгений Юрьевич. – Омск : СибАДИ, 2009. – 22 с.
43. Щербина, Е.В. Геосинтетические материалы в строительстве / Е.В. Щербина. – М. : Издательство ассоциации строительных вузов, 2004. – 111 с.
44. Сиротюк, В.В. Особенности конструирования дорожных одежд с армированным асфальтобетонным покрытием в условиях Сибири и Крайнего Севера / В.В. Сиротюк, Е.Ю. Крашенинин // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии (СибАДИ). – Омск : Полиграфический центр «КАН», 2008. – Вып. 8. – С. 38 – 45.
45. Юмашев, В.М. Современный мировой опыт применения геосинтетики в дорожной отрасли / В.Д. Казарновский, Ю.М. Львович // Труды СоюздорНИИ. – М., 1998. – Вып. 196. – С. 6–21.
46. Tensar International [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.tensar.co.uk/> (дата обращения к ресурсу: 05.11.2011).
47. Официальный сайт Huesker / HUESKER Synthetic GmbH & Co [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.huesker.com/> (дата обращения к ресурсу: 05.11.2011).
48. Официальный сайт Tencate : / Tencate [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.tencate.com/> (дата обращения к ресурсу: 05.11.2011).
49. Официальный сайт ООО Армдор / ООО «Армдор» [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.armdor.ru/> (дата обращения к ресурсу: 05.11.2011).
50. Официальный сайт ОАО Стеклонит / ОАО «Стеклонит» [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.steklonit.com/> (дата обращения к ресурсу: 05.11.2011).
51. Официальный сайт ООО Славрос Геосинтетика / ООО «Славрос Геосинтетика» [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.slavrosgeo.ru/> (дата обращения к ресурсу: 05.11.2011).
52. Официальный сайт ООО Миаком / ООО "Миаком" [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.miakom.ru/> (дата обращения к ресурсу: 05.11.2011).
53. Официальный сайт Компании Макафферри / Компания «Макафферри» [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.massafferri.ru/> (дата обращения к ресурсу: 05.11.2011).
54. Бычковский, Н.Н. Ледовые строительные площадки, дороги и переправы / Н.Н. Бычковский, Ю.А. Гурьянов. – Саратов : Саратовский ГТУ, 2005. – 260 с.

55. Песчанский, И.С. Ледоведение и ледотехника / И.С. Песчанский. – 2-е изд. – Л. : Гидрометеиздат, 1976. – 461 с.
56. Шумский, П.А. Основы структурного ледоведения / П.А. Шумский. – М. : Изд-во АН СССР, 1955. – 275 с.
57. Черепанов, Н.В. Классификация льдов природных водоёмов / Н.В. Черепанов // Труды ААНИИ. 1976. – Т. 331. – С. 77 – 99.
58. Симаков, В.П. Обоснование конструктивных параметров лесовозных автомобильных дорог для условий Западной Сибири : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.21.01 / Симаков Владимир Павлович. – Химки : ЦНИИМЭ, 1984. – 21 с.
59. Богородский, В.В. Физика пресноводного льда / В.В. Богородский. – Л. : Гидрометеорологическое издательство, 1971. – 228 с.
60. Паундер, Д. Физика льда / Д. Паундер. – М. : Мир, 1967. – 190 с.
61. Горчаков, Г.И. Коэффициенты температурного расширения и температурных деформаций строительных материалов / Г.И. Горчаков, И.И. Лифанов, Л.Н. Терехин // Серия : Монографии, № 2. – М. : Госстандарт, 1968. – 167 с.
62. Пехович, А.И. Основы гидроледотермики / А.И. Пехович. – Л. : Энергоатомиздат, 1983. – 200 с.
63. Войтковский, К.Ф. Механические свойства льда / К.Ф. Войтковский. – М. : Изд-во АН СССР, 1960. – 99 с.
64. Ewing M., Crary A. and Thorne A. Propagation of elastic waves in ice. Phys., №5, 1934.
65. Fletcher N.H. Surface structure of water and ice. Phil. Mag., Vol. 7, №74, – 1962.
66. Бакакин, В.П. Лёд в качестве материала для закладки выработанного пространства / В.П. Бакакин. – М. : Издательство «Москва», 1955. – 84 с.
67. Бутягин, И.П. Прочность льда и ледяного покрова / И.П. Бутягин. – Новосибирск : Наука, 1966. – 155 с.
68. Коржавин, К.Н. Влияние скорости деформирования на величину прочности льда при сжатии / К.Н. Коржавин // Труды НИИЖТ. – Новосибирск, 1955. – Вып. 11. – С. 28 – 34.
69. Гопеев, С.И. Использование естественного холода в дорожно-строительных целях / С.И. Гопеев. – М. : Дориздат, 1951. – 125 с.
70. Морозов, В.С. Использование ледяного покрова внутренних акваторий в качестве взлётно-посадочных полос : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 01.02.04 / Морозов Виктор Степанович. – Комсомольск-на-Амуре : Государственный технический университет, 2007. – 32 с.
71. Доброхотов, С.И. Прогнозирование сроков службы ледовых автомобильных дорог и переправ : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.14 / Доброхотов Сергей Иванович. – Л. : ЛИСИ, 1986. – 20 с.
72. Лавров, В.В. Деформация и прочность льда / под ред. В.В. Лаврова. – Л. : Гидрометеорологическое издательство, 1969. – 208 с.
73. Панфилов, Д.Ф. Экспериментальные исследования грузоподъёмности ледяного покрова / Д.Ф. Панфилов // Изв. ВНИИГ. – 1960. – Т. 64. – С. 25 – 34.

74. Панфилов, Д.Ф. К расчёту грузоподъёмности ледяного покрова при стоянке грузов на льду / Д.Ф. Панфилов // Изв. вузов Мин-ва высш. и средн. специального образования СССР. Строительство и архитектура. – 1961. – № 6. – С. 48 – 56.
75. Панфилов, Д.Ф. Изгиб полубесконечного ледяного поля нагрузкой, приложенной к кромке льда / Д.Ф. Панфилов // Изв. вузов Мин-ва высшего и среднего спец. образования СССР. Строительство и архитектура. – 1963. – № 11–12. – С. 17 – 25.
76. Критерии прочности льда для сложного напряжённого состояния / Г.А. Гениев, К.П. Пятикрестовский, В.И. Колчунов, Н.В. Ключева // Изв. вузов. Строительство. – 2003. – № 11. – С.20 – 23.
77. Вейнберг, В.П. Лёд. Свойства, возникновение и исчезновение льда / В.П. Вейнберг. – М. : АН СССР, 1960. – 99 с.
78. Савельев, Б.А. Строение, состав и свойства ледяного покрова морских и пресных водоёмов / Б.А. Савельев. – М. : Изд-во МГУ, 1963. – 541 с.
79. Пинегин, В.Н. Об изменениях модуля упругости и коэффициента Пуассона у речного льда при сжатии / В.Н. Пинегин // Наука и техника. – 1927. – № 3–4. – 23 с.
80. Берденников, В.П. Изучение модуля упругости льда / В.П. Берденников // Труды Гос. гидрологического института. – Л., 1948. – Вып. 7 (61). – С. 120–134.
81. Сериков, М.И. Определение модуля упругости льда резонансным методом / М.И. Сериков // Проблемы Арктики : сборник. – Л., 1959. – Вып. 6. – С. 18–25.
82. Шуйский, П.А. Основы структурного ледоведения / П.А. Шуйский. – М. : Изд-во АН СССР, 1955. – 289 с.
83. Пролом и грузоподъёмность льда / П.П. Кобеко, Н.И. Шишкин, Ф.И. Марей, Н.С. Иванов // ЖТФ. – 1946. – Т. 16. – Вып. 3. – С. 15 – 17.
84. Иванов, К.Е. Грузоподъёмность ледяного покрова и устройство дорог на льду / К.Е. Иванов, И.С. Песчанский // Труды Арктического НИИ Главсевморпути. – М. : Изд-во «Главсевморпуть», 1949. – Т. 23. – С. 36–47.
85. Хейсин, Д.Е. Динамика ледяного покрова / Д.Е. Хейсин. – Л. : Гидрометеопиздат, 1967. – 215 с.
86. Александров, А.В. Основы теории упругости и пластичности / А.В. Александров, В.Д. Потапов. – М. : Высшая школа, 1990. – 400 с.
87. Кудзис, А.П. Железобетонные и каменные конструкции : учеб. для строит. спец. вузов / А.П. Кудзис : в 2 ч. Ч.1 : Материалы, конструирование, теория и расчёт. – М. : Высшая школа, 1988. – 287 с.
88. Якименко, О.В. Моделирование напряжённого состояния армированных ледовых образцов-балок / О.В. Якименко, С.А. Матвеев // Вестник СибАДИ. – 2011. – Вып. 3 (21). – С. 55 – 61.
89. Телов, В.И. Наплавные мосты, паромные и ледяные переправы / В.И. Телов, И.М. Кануков. – М. : Транспорт, 1978. – 384 с.
90. Доброхотов, С.И. Исследование прочности ледяного покрова / С.И. Доброхотов, Е.К. Лесков, А.Е. Катомин // Актуальные вопросы строительства и эксплуатации автомобильных дорог в условиях Сибири. – Омск : СибАДИ, 1983. – С. 108 – 110.

91. Методическое пособие по расчёту ледяных переправ / сост. М.М. Корунов. – Красноярск : Сибирский технологический институт, 1972. – 19 с.
92. Панфилов, Д.Ф. Изгиб неограниченного ледяного поля кратковременной статической нагрузкой / Д.Ф. Панфилов // Известия высших учебных заведений. Строительство и архитектура. – 1963. – № 6. – С. 60 – 70.
93. Моделирование и расчёт многослойной армированной плиты на упругом основании / С.А. Матвеев // Образование, наука и техника : XXI век / ЮГУ. – Ханты-Мансийск, 2008. – С. 121– 126.
94. Матвеев, С.А. Армированные дорожные конструкции : моделирование и расчёт / С.А. Матвеев, Ю.В. Немировский. – Новосибирск : Наука, 2006. – 348 с.
95. Матвеев, С.А. Моделирование и расчёт многослойной армированной плиты на упругом основании / С.А. Матвеев // Образование, наука и техника / ЮГУ. – Ханты-Мансийск, 2008. – Вып. 6. – С. 121– 126.
96. Уточнение зоны прогибов бесконечной плиты на упругом основании / С.А. Матвеев, Н.Н. Литвинов // Современные научные исследования в дорожном и строительном производстве : материалы Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных с международным участием, 19–20 мая 2011 г. – Пермь, 2011. – Том 2. – С. 112 – 116.
97. Малофеев, А.Г. Несущая способность ледовых переправ / А.Г. Малофеев, О.В. Якименко // Вестник СибАДИ. – 2009. – Вып. 1(11). – С. 32 – 36.
98. ОДМ 218.5.003 – 2010. Рекомендации по применению геосинтетических материалов при строительстве и ремонте автомобильных дорог [Электронный ресурс]. – Введён 2010-02-01 // Кодекс. Право / ЗАО «Информационная компания "Кодекс"». – СПб., 2011.
99. ГОСТ Р 51232 – 98. Вода питьевая. Общие требования к организации и методам контроля качества (взамен ГОСТ 2874 – 82) – Введ. 1999-07-01. – Режим доступа: http://www.stroyoffis.ru/gost_voda/gost_r_51232_98/gost_r_51232_98.php.
100. Якименко, О.В. Лабораторные испытания ледяных балок, армированных геосинтетическими материалами / О.В. Якименко, В.В. Сиротюк // Вестник СибАДИ. – 2008. – Вып. 3(9). – С. 45 – 48.
101. Басин, М.М. Испытание ледяного покрова р. Свири на прочность при сжатии, скалывании и изгибе в период таяния весной 1934 г. / М.М. Басин. – Л. : Изд-во ВНИИГ, 1935. – 76 с.
102. Коржавин, К.Н. Наблюдения над изменением прочности льда р. Оби у г. Новосибирска к периоду весеннего ледохода 1934 г. / К.Н. Коржавин // Тр. Новосибирского института военных инженеров транспорта. – 1938. – Вып. 3. – С. 215 – 264.
103. Коржавин, К.Н. Исследование механических свойств речного льда / К.Н. Коржавин // Тр. Новосибирского института военных инженеров транспорта. – 1940. – Т. 4. Вып. – С. 114 – 118.
104. Карташкин, Б.Д. Экспериментальные исследования физических свойств льда / Б.Д. Карташкин. – М. : Изд-во «Бюро новой техники», 1947. – 42 с.

105. Цытович, Н.А. Механика мёрзлых грунтов / Н.А. Цытович. – М. : Высшая школа, 1973. – 448 с.
106. Будников, А.Н. Прочность ледового покрова при строительных работах / А.Н. Будников // Санитарная техника. – 1932. – С. 8 – 9.
107. Вялов, С.С. Зависимость между напряжением и деформацией льда с учётом фактора времени / С.С. Вялов, В.А. Чернигов // Советская антарктическая экспедиция 10 : сборник. – 1960. – С. 213 – 223.
108. Крицкий, С.Н. Зимний термический режим водохранилищ, рек и каналов / С.Н. Крицкий, М.Ф. Менкель, К.И. Российский. – М. ; Л. : Госэнергоиздат, 1947. – 99 с.
109. Шуляковский, Л.Г. Появление льда и начало ледостава на реках, озерах и водохранилищах / Л.Г. Шуляковский. – М. ; Л. : Гидрометеиздат, 1960. – 106 с.
110. Близняк, Е.В. Инженерная гидрология / Е.В. Близняк, Б.В. Поляков. – М. ; Л., 1939. – 96 с.
111. Комаровский, А.И. Структура и физические свойства ледяного покрова пресных вод / А.И. Комаровский. – М. ; Л. : Госэнергоиздат, 1932. – 389 с.
112. Савельев, Б.А. Руководство по изучению свойств льда / Б.А. Савельев. – М. : Изд-во МГУ, 1963. – 189 с.
113. Савельев, Б.А. Строение, состав и свойства ледяного покрова морских и пресных водоёмов / Б.А. Савельев. – М. : Изд-во МГУ, 1963. – 541 с.
114. Вейнберг, Б.П. Лед. Свойства, возникновение и исчезновение льда / Б.П. Вейнберг. – М. ; Л. : ГИЗ, тех.-теорет. лит., 1940. – 112 с.
115. Шишов, Н.Д. О прочности льда / Н.Д. Шишов // Метеорология и гидрология. – 1947. – № 2. – С. 12 – 14.
116. Лавров, В.В. Вопросы физики и механики льда / В.В. Лавров. – Л. : Изд-во «Морской транспорт», 1962. – 176 с.
117. Бутягин, И.П. О прочности ледяного покрова при изгибе // Труды ТЭИ ЗСФАН. – Новосибирск, 1955. – Вып. 5.
118. Бутягин, И.П. Прочность ледяного покрова в ледовых нагрузках на гидросооружения / И.П. Бутягин // Труды ТЭИ СО АН СССР. – Новосибирск, 1961. – Вып. 11.
119. Зажигаев, Л.С. Методы планирования и обработки результатов физического эксперимента / Л.С. Зажигаев, А.А. Кишьян, Ю.И. Романиков. – М. : Атомиздат, 1978. – 232 с.
120. Строительство и испытание опытного участка ледовой переправы, армированной геосинтетическими материалами / В.В. Сиротюк, О.В. Якименко, Е.Ю. Крашенинин, А.Н. Щербо // Вестник ТГАСУ. – 2008. – Вып. 4. – С. 157 – 165.
121. Сиротюк, В.В. Анализ результатов строительства и испытаний опытных участков ледовой переправы, армированной геосетками и плоскими георешетками / В.В. Сиротюк, О.В. Якименко, А.Н. Щербо // Дороги и мосты / РосдорНИИ. – 2009. – Вып. 2(22). – С 47 – 60.
122. Матвеев, С.А. Использование геосинтетических материалов для армирования дорожных конструкций / С.А. Матвеев, В.В. Сиротюк. – Ханты-Мансийск : ООО «Издательство "Печатное дело"», 2010. – 490 с.

123. Развитие новых технологий использования геосинтетики в дорожном строительстве / В.В. Сиротюк, О.В. Якименко, Г.М. Левашов, А.А. Захаренко // Дороги России XXI века. – 2008. – № 5. – С. 75.
124. Якименко, О.В. Армирование ледовых переправ / О.В. Якименко // Материалы VII Международной научно-технической конференции, 10–12 ноября 2009 г. – Омск : Издательство ОмГТУ, 2009. – Книга 2. – С. 465 – 468.
125. Бюллетень информационных материалов для строителей № 54 2009 г. : в 4 ч. Часть 1 / Сибирский региональный центр ценообразования в строительстве. – Омск, 2009.
126. Бюллетень информационных материалов для строителей № 54 2009 г. : в 4 ч. Часть 2 / Сибирский региональный центр ценообразования в строительстве. – Омск, 2009.
127. Бюллетень информационных материалов для строителей № 54 2009 г. : в 4 ч. Часть 3 / Сибирский региональный центр ценообразования в строительстве. – Омск, 2009.
128. Бюллетень информационных материалов для строителей № 54 2009 г. : в 4 ч. Часть 3 / Сибирский региональный центр ценообразования в строительстве. – Омск, 2009.

