



Научная статья

Геотехнология и инженерная геология

Исследование и разработка технологии строительства снежных аэродромов для приема колесных самолетов в Антарктиде

С.П.Поляков¹, С.В.Попов^{2,3}✉¹ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия² ВНИИОкеангеология, Санкт-Петербург, Россия³ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Как цитировать эту статью: Поляков С.П., Попов С.В. Исследование и разработка технологии строительства снежных аэродромов для приема колесных самолетов в Антарктиде // Записки Горного института. 2025. Т. 273. № 16489. С. 159-168. [EDN EKGJNF](#)

Аннотация

Строительство нового зимовочного комплекса на антарктической станции Восток потребовало оперативной доставки строителей и механиков на станцию Прогресс для их дальнейшего следования в район работ. Для решения этой важной логистической задачи в период с марта по август 2022 г. на месте прежней посадочной площадки в районе станции Прогресс была подготовлена новая, впоследствии названная «Зенит», сертифицированная для приема тяжелых самолетов на колесном шасси. Была сформирована снежная плита покрытия общей площадью 350 тыс. м² и толщиной от 100 до 120 см. Она создавалась путем нанесения снежных слоев с последующим их уплотнением, для чего применялась специально разработанная уплотняющая платформа для создания снежных аэродромов, пригодных для тяжелых самолетов на колесном шасси. В итоге подготовлено покрытие с твердостью поверхности не менее 1 МПа. Слой от 30 до 60 см имеет твердость не менее 0,8 МПа, а нижний слой – не менее 0,6 МПа. Первый борт самолета Ил-76ТД-90ВД российской компании «Волга-Днепр» был принят на новую взлетно-посадочную полосу 7 ноября 2022 г. Посадка самолета прошла в штатном режиме. Глубина колеи от колес шасси после посадки не превысила 3 см. В ходе исследований получены углубленные представления о механизмах формирования опорного основания взлетно-посадочной полосы из снежно-ледового материала в условиях Антарктиды. Полученный опыт может быть использован при решении подобных задач в районах Крайнего Севера.

Ключевые слова

посадочная площадка Зенит; взлетно-посадочная полоса; снежно-ледовый аэродром; физико-механические свойства; снежный покров; штамповые испытания; станция Прогресс; Антарктида

Поступила: 11.05.2024

Принята: 28.01.2025

Онлайн: 21.03.2025

Опубликована: 07.07.2025

Введение

Основная причина создания аэродрома в районе российской станции Прогресс в Восточной Антарктиде – вступление в основную фазу строительства нового зимовочного комплекса (НЗК) Восток, который в начале 2024 г. принят в эксплуатацию в Центральной Антарктиде на российской станции Восток [1]. Важность и актуальность обновления станции связаны с изучением подледникового озера Восток, с реализацией Мероприятия 21 «Комплексные исследования подледникового озера Восток и палеоклимата Земли в районе российской антарктической станции Восток», в рамках «Стратегии развития деятельности Российской Федерации в Антарктике до 2030 года», утвержденной Распоряжением Правительства РФ от 21 августа 2020 г. № 2143-р. Возведение НЗК позволит не только улучшить бытовые условия полярников [2], но и приступить к исследованию водной среды озера и его донных отложений [3-5].

На первом этапе строительства в район станции Прогресс судами были завезены блоки, из которых создавался НЗК Восток, техника для доставки, а также необходимое топливо. Главной задачей следующего этапа стала своевременная транспортировка строителей и механиков в район станции Прогресс для последующей доставки на станцию Восток, чтобы как можно эффективнее



использовать каждый день короткого антарктического лета, когда погодные условия в центральной части материка благоприятствуют выполнению работ. На этом этапе блоки НЗК Восток от места хранения доставлялись к месту строительства тягачами на санях, после чего строители приступали к сборке конструкций. Следует отметить, что в начале весеннего периода припайный лед у берегов Антарктиды характеризуется наибольшей мощностью, что затрудняет использование судов для доставки людей и грузов. В связи с этим было принято решение организовать доставку грузов и личного состава на станцию Прогресс тяжелыми самолетами типа Ил-76, способными на беспосадочный перелет с Африканского континента в Антарктиду. Для осуществления плана на станции Прогресс необходимо было подготовить посадочную площадку, способную принимать самолеты на колесном шасси. Технически сложная задача была выполнена, а посадочная площадка получила название «Зенит». Цель настоящей работы заключается в описании этапов подготовки и строительства этого уникального объекта российской логистической инфраструктуры.

Следует обратиться к авиационной терминологии, изложенной в статье 40 действующей (2022 г.) редакции Воздушного кодекса РФ, а также к Федеральным авиационным правилам «Требования, предъявляемые к аэродромам, предназначенным для взлета, посадки, руления и стоянки гражданских воздушных судов», утвержденным приказом Министерства транспорта России от 25 августа 2015 г. № 262:

- взлетно-посадочная полоса (ВПП) – определенный прямоугольный участок сухопутного аэродрома, подготовленный для посадки и взлета воздушных судов;
- посадочная площадка (ПП) – участок земли, льда, поверхности сооружения, в том числе поверхности плавучего сооружения, либо акватория, предназначенные для взлета, посадки или для взлета, посадки, руления и стоянки воздушных судов;
- аэродром – участок земли или акватория с расположенными на нем зданиями, сооружениями и оборудованием, предназначенный для взлета, посадки, руления и стоянки воздушных судов;
- перрон – определенная площадь сухопутного аэродрома, предназначенная для размещения воздушных судов в целях посадки или высадки пассажиров, погрузки или выгрузки почты или грузов, заправки, стоянки или технического обслуживания ВПП.

Важно обратиться еще к двум терминам – прочность и твердость. Прочность – это предельная нагрузка, при которой среда разрушается, ввиду превышения предела пластичности, т.е. по достижении предельных напряжений. Под твердостью в данной работе понимается способность среды оказывать сопротивление проникновению другого тела до возникновения остаточных деформаций. Твердость определялась по методике, разработанной в работе [6], путем вдавливания штампа в исследуемую среду. Указанные величины выражаются в паскалях.

Как правило, аэродромы или посадочные площадки вблизи станций на Антарктическом континенте строятся на леднике^{1,2} или морском льду [7-9]. Не является исключением и ситуация в районе станции Прогресс, расположенной в оазисе Холмы Ларсеманн, рельеф поверхности которого абсолютно не пригоден для организации грунтового аэродрома. Основная проблема строительства посадочной площадки на леднике в этом районе – отсутствие в разумной близости зон голубого льда (участков, где на леднике нет постоянного снежного покрова) – существенно усложняет решение поставленной задачи. Место строительства посадочной площадки выбрано в 6 км от станции Прогресс на леднике, мощность снежного покрова варьировалась от 3 до 10 м, а рельеф поверхности позволял выбрать участок, пригодный для строительства ВПП длиной не менее 3000 м, требуемой для посадки и взлета самолетов типа Ил-76 (рис.1).

Выбранный район хорошо изучен, так как многие годы здесь располагалась посадочная площадка сначала Советской, а затем и Российской антарктической экспедиции, принимавшая самолеты малой авиации на лыжном шасси. С середины 80-х годов прошлого века она использовалась для выполнения отечественных комплексных геолого-геофизических исследований [10-12], а также для доставки грузов и личного состава на станцию Восток самолетами Douglas (Basler)

¹ Kovacs A., Abele G. Runway site survey. Pensacola Mountains, Antarctica. Special Report 77-14. Hanover: Corps of Engineers, U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1977. 49 p.

² Blaisdell G.L., Lang R.M., Crist G. et al. Construction, Maintenance, and Operation of a Glacial Runway, McMurdo Station, Antarctica. Monograph 98-1. U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1998. 139 p.



BT-67 и Turbo-67 (DC-3). Среднегодовое снегонакопление в этом районе составляет около 30 см, а среднегодовая скорость перемещения ледника не превышает 2 м/год [13]. По международной классификации [14] участок ледника можно отнести к инфильтрационной зоне. Ранее здесь наблюдалось эпизодическое образование трещин [15], но, как правило, не более полуметра шириной, что позволяло их оперативно бутить и восстанавливать таким образом целостность снежно-ледового покрытия.

Во второй половине прошлого века при участии сотрудников ААНИИ была разработана методика строительства ПП на глубоком снегу для приема тяжелых самолетов на колесном шасси (Инструкция по проектированию, строительству и оценке эксплуатационной пригодности снежных и снежно-ледовых аэродромов Антарктиды ВСН37-76. Л., 1976) [16]. В частности, она успешно применялась для организации взлетно-посадочной полосы на станции Молодежная в течение многих лет. Методика предполагала строительство ВПП сроком не менее двух лет с обязательным использованием минимум одного летнего сезона. В это время температура снежной поверхности приближается к температуре фазового перехода, что значительно облегчает уплотнение снега. В рассматриваемом случае ставилась задача строительства аэродрома за полгода, причем в зимний период, поскольку решение об организации было принято в конце февраля 2022 г., а начать полеты на станцию Прогресс требовалось не позднее начала ноября того же года.

Методы

Самым простым и эффективным способом строительства ВПП на глубоком снегу для самолетов на колесном шасси является метод послойного уплотнения снега до необходимой прочности [16, 17]. Основой вновь разработанной методики послужили комплексные исследования, проведенные на станции Восток в течение летних полевых сезонов 2006-2008 гг. [18]. В ходе этих работ выполнены штамповые испытания снежного покрова для выяснения возможности уплотнения холодного снега до твердости 1 МПа и более, необходимой, чтобы выдержать нагрузку от колес шасси тяжелых самолетов. В результате исследований была получена зависимость плотности образующегося снега от оказанного на покров воздействия штампа с различным давлением для разных исходных характеристик снега при температуре около -30°C . Она представлена на рис.2.

При достижении снежным материалом плотности 550 кг/м^3 его прочность на одноосное сжатие, измеренная при температуре -10°C , может достигать 0,85 МПа, а при плотности свыше 600 кг/м^3 может превышать 1 МПа. Также в ходе экспериментов по уплотнению снега на станции Восток была обнаружена принципиально важная зависимость изменения прочности с течением времени. Сразу после уплотнения прочность снега может даже уменьшиться по сравнению с исходной [1, 18]. Это связано с разрывом связей между гранулами и кристаллами снега. Однако

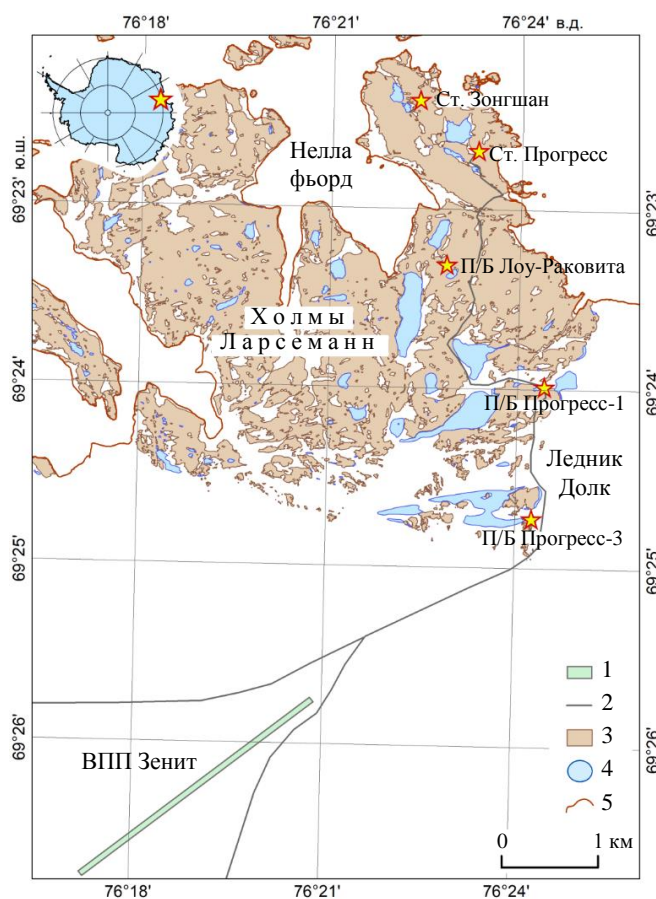


Рис.1. Положение посадочной площадки Зенит

1 – ВПП Зенит; 2 – трассы следования санно-гусеничных походов;
3 – горные выходы; 4 – водоемы; 5 – береговая линия
(3-5 – по Antarctic Digital Database (ADD). Cambridge: British Antarctic Survey, 2023. Ver. 7.8. URL: <https://www.bas.ac.uk/project/add/>
(дата обращения 07.10.2024)

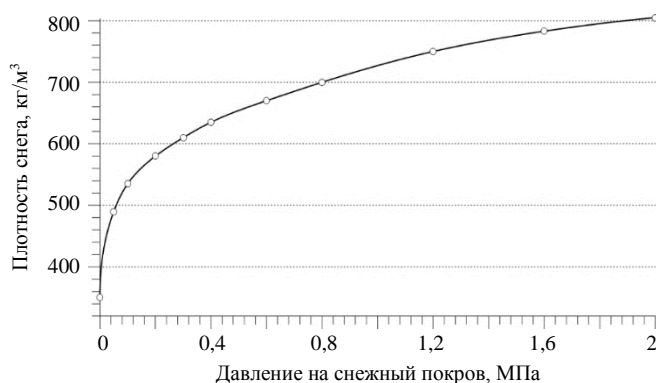


Рис.2. Зависимость плотности образующегося снега от давления штампа при температуре снега около -30°C

позднее под воздействием механизма диффузионного спекания кристаллов и гранул снега его прочность возрастает и через несколько дней достигает нового значения, превышающего исходное.

Штамповые испытания в районе станции Восток проводились как на естественном снежном покрове, так и на снежном аэродроме для самолетов на лыжном шасси, размером 4000×100 м, где можно было выбрать площадки с различными исходными характеристиками снега. В качестве штампа использовалась металлическая пластина, в которую упирался гидравлический домкрат с измерителем

силы на штоке. В качестве верхнего упора для домкрата применялась тяжелая техника (тягач весом около 40 т). Далее подбирались площадки с различными характеристиками снега (плотность и твердость). При воздействии домкрата на пластину регистрировались сила воздействия и размер деформации снега под пластиной. Длительность воздействия составляла порядка 20 с. Затем, по истечении некоторого фиксированного времени, в месте воздействия отбирался керн и в гляциологической лаборатории измерялись плотность и прочность образовавшегося в результате уплотнения снега. Также непосредственно в месте воздействия с помощью пенетрометра фиксировалась твердость образовавшегося покрытия.

Штамповый эксперимент, результаты которого приведены на рис.2, проводился при температуре снега -30°C . Измерения прочности и плотности снега после уплотнения проводились по взятым кернам в лаборатории станции Восток, где температура воздуха, а соответственно и образцов, составляла -10°C . Твердость измерялась пенетрометром в пункте штампового эксперимента, т.е. при температуре окружающего воздуха -30°C . Плотность снега от температуры образца практически не зависит, поэтому представленные выводы вполне справедливы.

Кроме того, перед посадкой самолета с помощью фрезы Kässbohrer PristenBully Polar 300 (PB-300) на поверхности ВПП и перрона создавался слой ледяной крошки до 4 см толщиной. Это увеличивает коэффициент сцепления колес шасси с поверхностью до 50 %.

Основным устройством, используемым для уплотнения снежных слоев покрытия посадочной площадки, была уплотняющая платформа. Она сконструирована и изготовлена специально для создания ПП на глубоком снегу в Антарктиде, пригодных для приема тяжелых самолетов на колесном шасси [19]. На рис.3, а представлен фрагмент уплотнения снежного слоя с помощью этого устройства.

Нанесение снежных слоев плиты ВПП производилось с помощью отвалов транспортеров РВ-300. После нанесения слоя исходная плотность снега, равная 350 кг/м^3 , возрастала ориентировочно до 420 кг/м^3 в результате перемешивания. Процесс нанесения был самым трудозатратным

а



б



Рис.3. Фрагмент уплотнения снежного слоя с помощью уплотняющей платформы (а) и автомобиль-кран, используемый в качестве тестовой тележки для проверки прочности покрытия аэродрома (б)



при строительстве посадочной площадки. В частности, пять машин РВ-300, работая по 8 ч в сутки, наносили один снежный слой толщиной около 30 см на всю территорию ВПП примерно две недели. Уплотнение слоев осуществлялось одновременно с нанесением других.

Наиболее важным аспектом подготовки посадочной площадки является контроль качества создаваемого покрытия. Оперативное измерение прочностных свойств создаваемого покрытия производится с помощью пенетromетра с энергией разрушения 8,5 Дж. Подробные характеристики прибора представлены в Инструкции по проектированию... (1976) и в [20]. На конечном этапе формирования покрытия использовалась тестовая тележка с нагрузкой на колесо и характеристиками, схожими с колесами шасси самолета (рис.3, б). Вес машины с дополнительным балластным грузом доведен до 60 т, а давление в колесах – до 0,8 МПа. Автомобиль при необходимости может использоваться в качестве дополнительного самодвижущегося уплотняющего устройства с давлением на поверхность до 0,8 МПа.

Результаты

В ходе проведения испытаний получена зависимость глубины воздействия на снежный покров от оказанного давления штампа для различных исходных характеристик снега. Под глубиной воздействия подразумевается та глубина слоя покрова, на которой изменились физико-механические характеристики снега после оказанного механического воздействия. Полученная зависимость – важный практический результат, который, исходя из технических возможностей уплотняющего устройства, позволял выбрать максимальную толщину наносимого снежного слоя, подлежащего уплотнению. Обязательным условием являлось уплотнение всего нанесенного слоя по толщине, т.е. толщина слоя не должна превышать глубину воздействия. С помощью штамп-овых испытаний также была проведена оценка рассеяния напряжений под колесом шасси самолета с глубиной. Для этого выбирался штамп, размеры которого близки к площади пятна контакта колеса шасси с поверхностью. На предварительно уплотненный снежный покров с известными механическими характеристиками было оказано воздействие этим штампом с различным давлением. Измерялась глубина воздействия на исследуемый снежный покров. На рис.4 представлены зависимости глубины воздействия от приложенного давления для некоторых характеристик снежного покрова. Вертикальной пунктирной линией показано номинальное давление ($P = 0,35$ МПа) на уплотняемую поверхность одного из основных уплотняющих устройств, использованных при строительстве посадочной площадки.

Была получена кривая рассеяния механических напряжений с глубиной для различных характеристик снежного покрова. В качестве примера на рис.5 представлена кривая для снежного покрова плотностью 550 кг/м^3 при размере штампа, близкого к размеру пятна контакта колеса шасси самолета Ил-76ТД. Представленные значения согласуются с аналогичными данными (Инструкция по проектированию..., 1976).

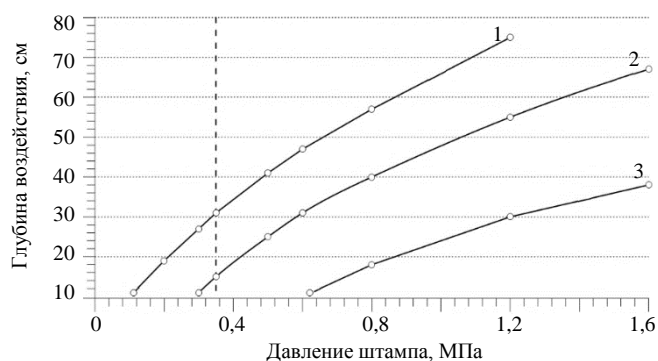


Рис.4. Глубина воздействия на снежный покров в зависимости от давления штампа для исходных характеристик снежного покрова: ρ – плотность снега, кг/м^3 , H_B – твердость снега, МПа

1 – $\rho = 420$, $H_B = 0,045$; 2 – $\rho = 500$, $H_B = 0,2$; 3 – $\rho = 580$, $H_B = 0,45$

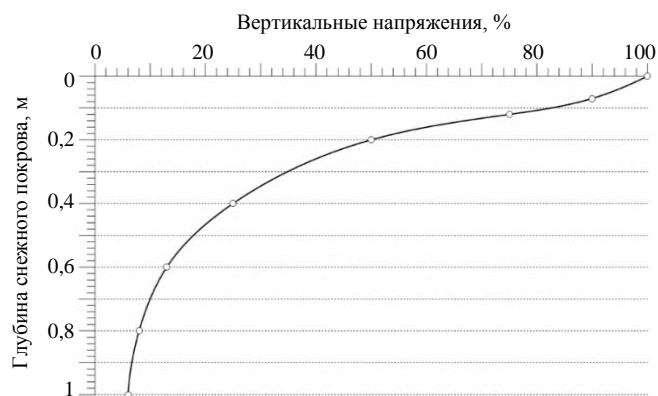


Рис.5. Ослабление механических напряжений с глубиной под колесом шасси самолета для снежного покрова плотностью 550 кг/м^3



Твердость созданного верхнего слоя снежного покрытия глубиной 30 см составила от 1 до 1,5 МПа. Соответственно, для слоя от 30 до 60 см – не менее 0,8 МПа, а для нижнего от 60 до 100 см – не менее 0,6 МПа. По образцам, полученным с помощью кернов, взятых из созданного покрытия, на механическом прессе измерена прочность на одноосное сжатие снежного покрытия, которая показала схожие с твердостью результаты. Расхождение в значениях между твердостью и прочностью не превысило 10 % и находится в пределах погрешности измерений. Плотность снежной плиты определялась стандартным образом взвешиванием образцов снега известного размера. Средняя плотность созданного покрытия составила около 620 кг/м³. Также контролировалась твердость и прочность на сжатие естественного снежного покрова, на который опирается снежная плита покрытия. Минимальная твердость естественного снега составила не менее 0,15 МПа.

Учитывая известное рассеяние вертикальных напряжений под колесами шасси самолета в снежной плите покрытия ВПП, представленное на рис.5, а также то, что плита опирается на твердое основание в виде естественного снежного покрова, твердость которого не менее 0,15 МПа, проведен расчет толщины снежной плиты, достаточной, чтобы выдержать нагрузку от колеса шасси самолета с давлением на поверхность до 1 МПа. Расчет основан на том, что если рассеянное давление от колеса шасси самолета на нижней кромке снежной плиты не превысит прочности материала на сжатие, на который эта плита опирается, то в ней не произойдет изгибных деформаций, и она гарантированно не сломается на изгиб. Как следует из рис.5, на глубине 1 м вертикальные напряжения в плите покрытия уменьшаются с 1 МПа до примерно 0,08 МПа, т.е. более, чем на порядок. Таким образом, толщина плиты в один метр является достаточной.

Для того, чтобы предотвратить внедрение колеса в снежную плиту, достаточно, чтобы твердость поверхности покрытия была выше давления, оказываемого колесом. Твердость верхнего слоя плиты должна быть не менее 0,8 МПа (давление в колесах шасси Ил-76 составляет 0,7 МПа). Похожий результат был получен ранее, при разработке ВПП станции Прогресс. Так, минимально допустимая прочность на одноосное сжатие покрытия снежной ВПП для эпизодической эксплуатации самолета ИЛ-76 для верхнего слоя глубиной 30 см должна составлять не менее 0,9 МПа, для слоя на глубине от 30 до 60 см, – не менее 0,75 МПа, а для нижнего базового слоя, расположенного на глубине от 60 до 100 см – не менее 0,4 МПа. Вся снежная плита покрытия должна опираться на естественный снежный покров прочностью на сжатие не менее 0,15 МПа.

Помимо обладания необходимой прочностью и толщиной покрытия аэродрома, чтобы выдерживать нагрузку от колеса шасси самолета, снежная плита должна выдержать нагрузку от веса всего самолета. Несущая способность плиты рассчитывалась как оценка максимального допустимого веса самолета при заданной геометрии распределения колес шасси. В случае для Ил-76 основной вес сосредоточен на двух задних группах колес шасси, в каждой из которых по 8 колес. Общее пятно касания колес шасси характеризуется размерами 8×3,2 м. Суть оценки заключается в том, что если давление от шасси самолета, которое через плиту покрытия передается на естественный снежный покров, не превысит его прочности на сжатие, то, как следствие, не произойдет и деформации плиты покрытия на изгиб, и она гарантированно не сломается.

Заметное уменьшение напряжений от шасси самолета произойдет на глубине, сравнимой с характерным размером пятна его контакта с поверхностью, т.е. на глубине свыше 4 м. В приведенных расчетах в качестве оценки принято, что рассеяние напряжений внутри плиты покрытия отсутствует, и давление от шасси самолета полностью передается на естественный снежный покров, на который опирается плита. Таким образом, давление от шасси не должно превысить прочность на сжатие естественного снежного покрова. Максимально допустимая масса самолета в этом случае составляет:

$$M = \frac{1}{g} \sigma S, \quad (1)$$

где σ – минимальная прочность на сжатие естественного снежного покрова, на который опирается плита покрытия, $\sigma = 0,15$ МПа; S – площадь пятна опоры шасси самолета, $S = 25$ м²; g – ускорение свободного падения, м/с².

Подставляя соответствующие значения в соотношение (1), получим оценочную величину $M = 375$ т. Покрытие может гарантированно выдержать самолет с геометрией шасси, сходной



с Ил-76, весом до 375 т. Учитывая, что его реальный вес составляет 150 т, имеется более чем двукратный запас прочности несущей способности подготовленной снежной плиты покрытия.

Одна из угроз для любого инженерного сооружения, расположенного на леднике, – возможность образования трещин вблизи поверхности, на которой это сооружение построено. Не является исключением и посадочная площадка. Основным методом проверки наличия трещин или пустот внутри ледника – георадарный контроль [21-23]. Следует отметить, что образование трещин внутри ледника, расположенного в береговой зоне антарктического континента, является обычным делом, так как разные части ледника двигаются с разной скоростью, что является причиной возникновения напряжений. Если они превышают критические значения, то формируются трещины [24, 25]. Перед приемом самолета в проверку готовности ПП, помимо контроля физико-механических характеристик покрытия, также входит георадарный контроль наличия приповерхностных трещин. В случае их возможного выявления в ходе анализа временных георадарных разрезов [15, 26, 27] в пункте производится заверочное бурение для выяснения реальных размеров этих объектов. Для дальнейшей эксплуатации аэродрома важно оценить, насколько обнаруженный внутри ледника объект в виде трещины или пустоты угрожает проведению авиационных операций. Георадарные исследования на посадочных площадках проводятся время от времени. Интервал такого мониторинга зависит от конкретных условий. В частности, на ВПП Зенит подобные работы были выполнены в сезон 68-й Российской антарктической экспедиции (2022/2023 гг.) [28]. В ходе проверки обнаружили небольшие трещины, которые, однако, не препятствуют эксплуатации ВПП.

Трещины в теле ледника периодически возникают вследствие его неравномерного движения [29, 30]. Кроме того, количество трещин в будущем, вероятно, будет увеличиваться в связи с глобальными климатическими изменениями и увеличением скорости движения (растекания) ледника с ростом его температуры [31]. Поэтому целесообразно рассчитать несущую способность снежной плиты покрытия при наличии под ней трещины или пустоты заданного размера. Пусть имеется бесконечная пластина из материала с известными характеристиками Ω_F , которая опирается на нижележащий снежный покров Ω_S , а в нем – трещина известного размера Ω_C (рис.6). На пластину (в рассматриваемом случае – на снежную плиту) опирается колесо шасси самолета с известной нагрузкой. Рассчитаем предельно допустимую ширину трещины в снежном покрове, на который опирается снежная плита, чтобы она не сломалась под указанной нагрузкой.

Для упрощенной оценки представим снежную плиту над трещиной как балку с закрепленными концами, опирающуюся на снежный покров, на котором расположена плита. Пусть F – сила от колеса шасси, действующая на плиту, направленная вниз; h – толщина плиты; $\sigma_{сж}$ и $\sigma_{из}$ – прочность плиты на одноосное сжатие и на изгиб; L – ширина трещины под плитой; b – ширина балки, которая ассоциируется с плитой. Тогда, используя формулу Журавского [32, 33] для расчета предельной прочности балки с закрепленными концами, получим

$$F = \frac{2\sigma_{из}bh^2}{3L}.$$

Для оценки минимальной несущей способности плиты примем $b = h$, а также используем известное соотношение $\sigma_{из} \approx 1/3\sigma_{сж}$. После преобразований получим

$$F \approx \frac{2\sigma_{сж}h^3}{9L}.$$

В этом случае максимально допустимая ширина трещины под плитой покрытия составит

$$L \approx \frac{2\sigma_{сж}h^3}{9F}. \quad (2)$$

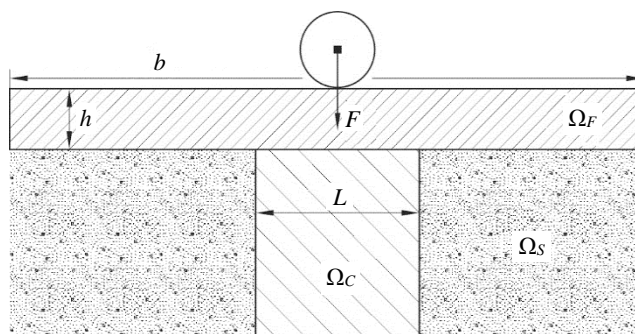


Рис.6. Расчетная схема несущей способности снежной плиты покрытия ВПП Зенит при наличии под ней трещины или пустоты заданного размера

Ω_F – уплотненная снежная плита;
 Ω_S – снежный покров; Ω_C – трещина



В рассматриваемом случае $h = 1$ м; $\sigma_{сж} = 1$ МПа; $F = 100$ кН (сила, с которой колесо шасси самолета Ил-76 опирается на поверхность). Используя соотношение (2), получим оценку максимально допустимой ширины трещины $L \approx 2$ м.

Если ширина трещины меньше, чем толщина плиты, задача сводится к расчетам разрушения балки на срез у краев трещины [32]. В этом случае также аппроксимируем плиту балкой толщиной h и шириной h . Площадь среза у каждого края балки будет равна h^2 . Предполагаем самый худший сценарий, когда нагрузка от колеса подвески самолета F приложена к одному краю балки. Рассчитаем срез с одной из сторон:

$$\sigma_{ср} = \frac{F}{h^2},$$

где $\sigma_{ср}$ – прочность плиты на срез. Тогда формула расчета минимальной толщины балки, которая выдержит нагрузку силой F , имеет вид:

$$h = \sqrt{\frac{F}{\sigma_{ср}}}.$$

Учитывая известное соотношение $\sigma_{ср} = 0,6 \sigma_{сж}$, получим:

$$h = 1,29 \sqrt{\frac{F}{\sigma_{сж}}}. \quad (3)$$

Рассчитаем по соотношению (3) минимальную толщину плиты, которая не сломается на срез при заданной нагрузке. Если $\sigma_{сж} = 1$ МПа, а $F = 100$ кН, то $h = 0,4$ м. Таким образом, сформированная плита для ВПП толщиной 1 м гарантированно выдержит нагрузку от колеса самолета Ил-76 на срез и на изгиб при ширине трещины под ней не более 2 м.

Следует отметить, что расстояние между колесами шасси составляет 1 м, и если трещина под снежной плитой будет параллельна осевой линии ВПП, то на балку, которой аппроксимируем плиту, одновременно могут надавить два колеса шасси, и в соответствии с формулой (2) максимально допустимая ширина трещины под плитой составит 1 м. Для гарантированной безопасности следует ориентироваться на максимально допустимую ширину трещины под плитой в 1 м.

Обсуждение

В ходе работ по подготовке фундамента нового зимовочного комплекса станции Восток [1] были отработаны методические приемы, которые впоследствии использовались при строительстве новой посадочной площадки Зенит. В этом смысле методика уникальна, поскольку, в отличие от ранее используемой, позволяет создать посадочную площадку для приема самолетов на колесном шасси не только в прибрежных, но и во внутренних районах Антарктиды. Для первых характерно относительно теплое лето, в течение которого происходит интенсивное приповерхностное таяние снежной толщи. Оно существенно ускоряет процесс уплотнения снега за счет фильтрации талой воды в снег и последующего ее замерзания. Для внутренних районов Антарктиды характерно полное отсутствие приповерхностного таяния. Поэтому процесс уплотнения снега здесь происходит медленнее, что показали работы по созданию фундамента НЗК Восток [1]. Тем не менее, они же продемонстрировали принципиальную возможность создания посадочной площадки, аналогичной Зениту.

Для ранее использованной технологии создания посадочных площадок данного типа требовалось не менее двух лет с обязательным использованием минимум одного летнего сезона. Новая технология позволила подготовить ВПП менее чем за год, практически не используя летнее таяние.

Заключение

За период с марта по август 2022 г. была полностью сформирована снежная плита покрытия посадочной площадки (ВПП и перрон) общей площадью 350 тыс. м² и толщиной от 100 до 120 см. Верхний слой покрытия 30 см имеет твердость не менее 1 МПа. Слой от 30 до 60 см – не менее 0,8 МПа, нижний слой – не менее 0,6 МПа. Созданная посадочная площадка была сертифицирована для приема самолетов на колесном шасси.



Рис.7. Первое приземление самолета Ил-76ТД-90ВД на посадочную площадку Зенит

Первый борт самолета Ил-76ТД-90ВД компании «Волга-Днепр» был принят на вновь созданной посадочной площадке 7 ноября 2022 г. На рис.7 представлена фотография его первого приземления на ПП Зенит. Посадка самолета прошла в штатном режиме. Глубина колеи от колес шасси не превысила 3 см.

В летний период 2022-2023 гг. было совершено четыре полета Ил-76ТД-90ВД, после чего посадочная площадка Зенит была закрыта для полетов до следующего сезона. В конце октября 2023 г. после тщательной подготовки и проверки, которая включала георадарное профилирование, полеты Ил-76ТД-90ВД из Кейптауна в Антарктиду были возобновлены. Проверка состояния показала, что твердость снежного материала за зимний период возросла почти на 20 %, что соответствует полученным ранее результатам об увеличении прочностных свойств уплотненного снега со временем [1]. В сезон 2023/24 гг. на ПП Зенит было принято семь бортов Ил-76ТД-90ВД. Все авиационные операции прошли в штатном режиме.

Таким образом, создание новой посадочной площадки для приема самолетов на колесном шасси открывает новые перспективы для дальнейшего изучения Антарктиды и реализации планов, которые нашли свое отражение в «Стратегии развития деятельности Российской Федерации в Антарктике до 2030 года», утвержденной Распоряжением Правительства РФ от 21 августа 2020 г. № 2143-р. В ходе проведенных научных исследований были получены новые данные и углубленное представление о механизмах формирования опорного основания ВПП, состоящего из снежно-ледового материала, в условиях Антарктиды. Ценность и уникальность представленных результатов обусловлены возможностью их использования на практике при решении подобных задач, в том числе в нефтедобывающих районах Крайнего Севера.

Совершенствование разработанной уникальной методики подготовки посадочных площадок на снежной поверхности для приема самолетов на колесном шасси является важной задачей для укрепления позиций нашей страны как в Антарктике, так и в Арктике.

Авторы благодарят руководство Российской антарктической экспедиции и сотрудников станции Прогресс за помощь в выполнении работ. Особая благодарность группе строителей из Запсибгазпрома, которые в зимний период 2022 г. осуществили проект строительства аэродрома, а также В.П.Епифанову и А.Н.Маркову за конструктивные замечания в оценке несущей способности плиты, которые улучшили настоящую работу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Поляков С.П., Попов С.В., Клепиков А.В. Основные аспекты строительства снежного фундамента для новых корпусов российской станции Восток, Восточная Антарктида // Проблемы Арктики и Антарктики. 2024. Т. 70. № 4. С. 525-540 (in English). DOI: [10.30758/0555-2648-2024-70-4-525-540](https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-4-525-540)
2. Шемякова А.А., Шваубаускас Р.Й. Особенности проектирования антарктических научно-исследовательских станций // Искусствоведение и дизайн в современном мире: традиции и перспективы: Сборник материалов XV Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых. Тамбов: Державинский, 2022. С. 75-78.



3. Большунов А.В., Васильев Н.И., Тимофеев И.П. и др. Перспективное технологическое решение по отбору проб донных отложений подледникового озера Восток: актуальность и постановка задач исследований // Записки Горного института. 2021. Т. 252. С. 779-787. DOI: [10.31897/PMI.2021.6.1](https://doi.org/10.31897/PMI.2021.6.1)
4. Шишкин Е.В., Большунов А.В., Тимофеев И.П. и др. Модель шагающего пробоотборника для исследования донной поверхности подледникового озера Восток // Записки Горного института. 2022. Т. 257. С. 853-864. DOI: [10.31897/PMI.2022.53](https://doi.org/10.31897/PMI.2022.53)
5. Быстрогович А.А., Клепиков А.В. О развитии российских антарктических исследований // Тезисы докладов международной научной конференции «Комплексные исследования природной среды Арктики и Антарктики», 2-4 марта 2020, Санкт-Петербург, Россия. СПб: Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, 2020. С. 84-86.
6. Орешко Е.И., Уткин Д.А., Ерасов В.С., Ляхов А.А. Методы измерения твердости материалов (обзор) // Труды ВИАМ. 2020. № 1 (85). С. 101-117. DOI: [10.18577/2307-6046-2020-0-1-101-117](https://doi.org/10.18577/2307-6046-2020-0-1-101-117)
7. White G., McCallum A. Review of ice and snow runway pavements // International Journal of Pavement Research and Technology. 2018. Vol. 11. Iss. 3. P. 311-320. DOI: [10.1016/j.ijprt.2017.11.002](https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.11.002)
8. Barthelemy J.L. The Sea-Ice Runway Near McMurdo Station, Antarctica: A Problem of Logistics // The Sixth International Offshore and Polar Engineering Conference, 26-31 May 1996, Los Angeles, CA, USA. OnePetro, 1996. № ISOPE-I-96-150.
9. Kozlov A.I., Logvin A.I., Feoktistova O.G. et al. Ice Structures for Airfield Construction. Springer, 2023. 118 p. DOI: [10.1007/978-981-19-6211-0](https://doi.org/10.1007/978-981-19-6211-0)
10. Голынский А.В., Голынский Д.А., Киселев А.В., Масолов В.Н. Российские магнитометрические исследования в Антарктике // Вопросы географии. 2020. Сборник 150. С. 175-197.
11. Михальский Е.В., Лейченко Г.Л. История геологического изучения Антарктиды: роль и достижения отечественных геологических исследований // Вопросы географии. 2020. Сборник 150. С. 150-174.
12. Popov S. Fifty-five years of Russian radio-echo sounding investigations in Antarctica // Annals of Glaciology. 2020. Vol. 61. Iss. 81. P. 14-24. DOI: [10.1017/aog.2020.4](https://doi.org/10.1017/aog.2020.4)
13. Dirscherl M., Dietz A.J., Dech S., Kuenzer C. Remote sensing of ice motion in Antarctica – A review // Remote Sensing of Environment. 2020. Vol. 237. № 111595. DOI: [10.1016/j.rse.2019.111595](https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111595)
14. Патерсон У.С.Б. Физика ледников. М.: Мир, 1984. 472 с.
15. Florinsky I.V., Bliakharskii D.P. Detection of crevasses by geomorphometric treatment of data from unmanned aerial surveys // Remote Sensing Letters. 2019. Vol. 10. Iss. 4. P. 323-332. DOI: [10.1080/2150704X.2018.1552809](https://doi.org/10.1080/2150704X.2018.1552809)
16. Ключников Г. Создание высокопрочных снежных аэродромов в Арктике и Антарктике // Транспорт Российской Федерации. 2006. № 3. С. 34-36.
17. Шаруха А.В., Кукина М.П., Егоров А.Л. Перспективы строительства аэродромов из снежной массы в арктической зоне // Наземные транспортно-технологические комплексы и средства: Материалы Международной научной-технической конференции, 8 февраля 2019, Тюмень, Россия. Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2019. С. 293-298.
18. Поляков С.П., Иванов Б.В., Клепиков А.В. и др. Физико-механические свойства снежно-фирнового покрытия взлетно-посадочной полосы на станции Восток в Антарктиде // Лед и Снег. 2010. № 1 (109). С. 119-122.
19. Патент № 2459031 РФ / С.П.Поляков, В.В.Харитонов. Устройство для уплотнения снега. Оpubл. 20.08.2012. Бюл. № 23.
20. Войтковский К.Ф. Механические свойства снега. М.: Наука, 1977. 126 с.
21. Arcone S.A., Delaney A.J. GPR images of hidden crevasses in Antarctica // 8th International Conference on Ground Penetrating Radar, 23-26 May 2000, Gold Coast, Australia. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2000. Vol. 4084. P. 760-765. DOI: [10.1117/12.383512](https://doi.org/10.1117/12.383512)
22. Попов С.В., Поляков С.П., Пряхин С.С. и др. Строение верхней части ледника в районе планируемой взлетно-посадочной полосы станции Мирный, Восточная Антарктида (по материалам работ 2014/15 года) // Криосфера Земли. 2017. Т. 21. №1. С. 73-84. DOI: [10.21782/KZ1560-7496-2017-1\(73-84\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2017-1(73-84))
23. Ground Penetrating Radar: Theory and Applications / Ed. by H.M.Jol. Elsevier, 2009. 544 p. DOI: [10.1016/b978-0-444-53348-7.x0001-4](https://doi.org/10.1016/b978-0-444-53348-7.x0001-4)
24. González-Velázquez J.L. A Practical Approach to Fracture Mechanics. Elsevier, 2021. 284 p. DOI: [10.1016/C2019-0-05011-X](https://doi.org/10.1016/C2019-0-05011-X)
25. Jennings S.J.A., Hambrey M.J. Structures and Deformation in Glaciers and Ice Sheets // Reviews of Geophysics. 2021. Vol. 59. Iss. 3. № e2021RG000743. DOI: [10.1029/2021RG000743](https://doi.org/10.1029/2021RG000743)
26. Taurisano A., Tronstad S., Brandt O., Kohler J. On the use of ground penetrating radar for detecting and reducing crevasse-hazard in Dronning Maud Land, Antarctica // Cold Regions Science and Technology. 2006. Vol. 45. Iss. 3. P. 166-177. DOI: [10.1016/j.coldregions.2006.03.005](https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2006.03.005)
27. Tess X.H. Luo, Wallace W.L. Lai, Ray K.W. Chang, Goodman D. GPR imaging criteria // Journal of Applied Geophysics. 2019. Vol. 165. P. 37-48. DOI: [10.1016/j.jappgeo.2019.04.008](https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2019.04.008)
28. Суханова А.А., Банцев Д.В., Шиманчук Е.В., Попов С.В. Гляциологические изыскания в районе антарктической станции Прогресс в сезон 68-й РАЭ // Российские полярные исследования. 2023. № 2. С. 20-22.
29. van der Veen C.J. Crevasses on glaciers // Polar Geography. 1999. Vol. 23. Iss. 3. P. 213-245. DOI: [10.1080/10889379909377677](https://doi.org/10.1080/10889379909377677)
30. Rousseau H., Gaume J., Blatny L., Lüthi M.P. Transition Between Mechanical and Geometric Controls in Glacier Crevassing Processes // Geophysical Research Letters. 2024. Vol. 51. Iss. 9. № e2024GL108206. DOI: [10.1029/2024GL108206](https://doi.org/10.1029/2024GL108206)
31. Lenaerts J.T.M., Medley B., van den Broeke M.R., Wouters B. Observing and Modeling Ice Sheet Surface Mass Balance // Reviews of Geophysics. 2019. Vol. 57. Iss. 2. P. 376-420. DOI: [10.1029/2018RG000622](https://doi.org/10.1029/2018RG000622)
32. Заславский Б.В. Краткий курс сопротивления материалов. М.: Машиностроение, 1986. 328 с.
33. Горюнович С.Б. Расчет на прочность многослойной балки при поперечном изгибе методами сопротивления материалов // Механика XXI века. 2020. № 19. С. 246-251.

Авторы: Сергей Петрович Поляков, главный специалист (Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия), Сергей Викторович Попов, д-р геол.-минерал. наук, ведущий инженер, доцент, s.popov@spbi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1830-8658> (ВНИИОкеангеология, Санкт-Петербург, Россия; Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.