УДК 624.139.2

Анализ причин возникновения деформаций инженерных сооружений объектов газового комплекса в криолитозоне

Г.Г.ВАСИЛЬЕВ¹, А.А.ДЖАЛЯБОВ², И.А.ЛЕОНИЧ¹✉¹ РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, Москва, Россия² ООО «Газпром инвест» «Надым», Надым, Россия

Как цитировать эту статью: Васильев Г.Г. Анализ причин возникновения деформаций инженерных сооружений объектов газового комплекса в криолитозоне / Г.Г.Васильев, А.А.Джалябов, И.А.Леонович // Записки Горного института. 2021. Т. 249. С. 377-385. DOI: 10.31897/PMI.2021.3.6

Аннотация. Строительство объектов нефтегазовой инфраструктуры на многолетнемерзлых грунтах является важнейшей задачей наращивания сырьевой базы всего топливно-энергетического комплекса России. Многолетнемерзлые грунты представляют собой сложную, многокомпонентную систему, состояние которой зависит от множества факторов. Построенные в таких условиях здания и сооружения с одной стороны оказывают на многолетнемерзлые грунты сложное теплотехническое воздействие, а с другой – воспринимают последствия изменения характеристик таких грунтов. Такая ситуация приводит к тому, что в процессе жизненного цикла здания и сооружения на многолетнемерзлом грунте подвергаются сложным и плохо предсказуемым деформациям. В статье представлены результаты исследования различных процессов деградации многолетнемерзлых грунтов, которые могут реализовываться на объектах строительства промышленных объектов. Проведен анализ причин возникновения деформаций инженерных сооружений газового комплекса в криолитозоне. Исследован комплекс причин, вызывающих такие деформации. Предложен комплексный критерий оценки изменений мерзлотно-геологических условий промышленных площадок. Для мониторинга и оценки условий теплообмена и прогнозирования изменения геокриологических условий многолетнемерзлого грунта предложено применять методику расчета индивидуальной характеристики температурного режима территории.

Ключевые слова: многолетнемерзлый грунт; деформации; мониторинг деформаций; строительство в криолитозоне; термокарст; морозное пучение

Введение. В криолитозоне Крайнего Севера эксплуатируются несколько десятков месторождений углеводородов, однако основной объем добычи природного газа приходится на Уренгойское, Ямбургское, Медвежье, Юбилейное, Ямсовейское и Бованенковское месторождения, в геологическом разрезе которых распространены многолетнемерзлые грунты. Например, для полуострова Ямал характерно сплошное распространение многолетнемерзлых грунтов с мощными включениями пластового и жильного льда, широкое распространение опасных экзогенных мерзлотно-геологических процессов, которые иногда развиваются с исключительно высокой скоростью.

Для мерзлого состояния таких грунтов характерны высокая прочность, практически полное отсутствие сжимаемости, а также наличие высокой несущей способности, в тоже время при оттаивании таких грунтов и переходе их в пластичное или текучее состояние они практически полностью утрачивают несущую способность. В работах [18, 27] представлены исследования различных характеристик мерзлого грунта, в том числе с учетом процессов фазовых переходов [19].

На рис.1 показан характерный для антропогенного ландшафта пример эрозионного разрушения многолетнемерзлого грунта.

Реализация различных антропогенных процессов во время эксплуатации объектов, построенных на многолетнемерзлых грунтах, может стать причиной возникновения отклонения фактического температурного режима от проектных значений, что потенциально может привести, а в отдельных случаях и приводит, к реализации аварийных отказов на таких объектах. В работе [4] представлено исследование

Рис.1. Эрозионное разрушение многолетнемерзлого грунта

динамики деформаций надземных трубопроводов в условиях криолитозоны, исследования [16, 29] посвящены анализу причин деформирований подземных трубопроводов, а в работах [1, 12] исследуются причины и последствия деформаций фундаментов зданий и сооружений площадочных объектов на многолетнемерзлых грунтах, последствия деформаций непосредственно для фундаментов НПС магистральных нефтепроводов показаны в работе [15].

Широкий спектр работ посвящен анализу практики эксплуатации объектов нефтегазового комплекса в условиях возникновения процессов деградации многолетнемерзлых грунтов, в том числе при повышении среднегодовых температур и оттаивании их с поверхности, такая ситуация характерна для строительной практики Заполярья. В исследованиях [2, 7, 14] представлены авторские комплексные подходы к геотехническому мониторингу зданий в криолитозоне, отдельные работы [5, 9] посвящены анализу практики эксплуатации зданий и сооружений непосредственно в условиях месторождений, в том числе при проектировании [28]. Исследованию наиболее эффективных конструкционных решений фундаментов зданий и сооружений в криолитозоне посвящены работы [3, 13], в работе [8] исследуется оптимальная конструкция фундамента резервуара, в работе [20] – конструкция коридоров коммуникаций. Отдельные исследования [21, 25] посвящены вопросу сохранения мерзлотного состояния грунта, моделированию [6] и поддержания [11] проектного температурного режима, в том числе с применением систем термостабилизации [10, 22]. Рассматриваются способы контроля и оценки осадок и деформаций зданий и сооружений [17, 23] и трубопроводов [26, 29] на объектах в криолитозоне, а также методы контроля и наблюдения, в том числе с элементами управления данным процессом [24].

Исследователи отмечают совместное негативное воздействие на мерзлое состояние грунта как климатических факторов (многолетнюю тенденцию роста среднегодовых температур), так и факторов техногенной и антропогенной природы. Совокупное воздействие указанных факторов становится причиной возникновения и развития процессов деформации и отклонения от проектного положения зданий и сооружений на Крайнем Севере, а также приводит к внедрению в процессы проектирования и строительства решений по глубинному или поверхностному промораживанию грунтов, в том числе с применением систем поддерживающих температурный режим грунта на протяжении всего жизненного цикла объекта.

Система добычи, транспорта и хранения углеводородов на участках распространения многолетнемерзлых пород включает инженерные площадные и линейные сооружения различного назначения. В качестве примеров конструкционных решений, разработанных для объектов на многолетнемерзлых грунтах, можно привести принудительно-вентилируемые грунтовые основания, на которых размещены здания и сооружения каркасно-панельного типа, вентилируемые подполья с естественным проветриванием под резервуарами, размещение трубопроводов и других линейных сооружений в тепловой изоляции на эстакадах. На рис.2 приведен пример реализации таких решений.

Рис.2. Здания и сооружения месторождений с естественно проветриваемым подпольем

Методология. На практике использование участков со сплошным распространением многолетнемерзлых грунтов в качестве оснований осуществляется по первому принципу строительства (методологические основы установления принципов эксплуатации многолетнемерзлых грунтов изложены в СП 25.13330.2012), предусматривающему сохранение их в мерзлом состоянии на весь период эксплуатации. Например, первый принцип использования грунтов в мерзлом состоянии принят для зданий и сооружений на время строительства и в период эксплуатации объектов с учетом мерзлотно-грунтовых условий и температурного состояния грунтов основания объектов на всей территории Бованенковского НГКМ. При использовании вечномерз-

лых грунтов по первому принципу вертикальная планировка территории решается путем устройства общепланировочной насыпи под все сооружения объекта. Насыпь служит искусственным основанием под здания и сооружения и препятствует техногенному воздействию на структурно-неустойчивые вечномерзлые грунты. С помощью насыпи выполняется организация рельефа и поверхностный водоотвод площадок.

Второй принцип использования мерзлых грунтов в качестве основания предполагает их частичное или полное оттаивание, применение этого принципа возможно, например, в условиях площадок, на которых выявлено обширное распространение талых пород, или в случае значительной толщины кровли мерзлой породы (не менее 5-7 м) даже при наличии линз мерзлоты малого масштаба. По характеру теплового взаимодействия инженерных сооружений с грунтом оснований различают:

- объекты, конструкция которых предусматривает наличие технологических элементов, позволяющих принудительно поддерживать установленный проектный принцип использования грунта основания, охлаждая грунт при строительстве по первому принципу, либо регулируя тепловой поток при строительстве по второму принципу (рис.3, а);
- объекты, на которых не предусмотрено проектом наличие конструктивных элементов, обеспечивающих поддержание температурного режима грунтов, фактически определяемого средне-статистической реализацией факторов, формирующих условия теплообмена на поверхности (рис.3, б).

Основными криогенными процессами и явлениями, вызывающими деформации инженерных сооружений объектов газового комплекса в криолитозоне, являются: термокарст, склоновые процессы (солифлюкция, сплывы, оползание грунта), криогенное пучение, термоэрозия, криогенное растрескивание. При разрушении напочвенных растительных покровов все эти процессы развиваются с высокой скоростью.

При строительстве явление термокарста реализуется в условиях изменения условий теплообмена многолетнемерзлого грунта с атмосферой и окружающим грунтом, причинами такого нарушения могут стать как естественные процессы деградации поверхностных слоев грунта при климатических изменениях, так и антропогенные процессы разрушения грунтов в процессе строительства инженерных объектов. Последствием нарушений является процесс интенсивного оттаивания льдонасыщенных грунтов или ледяных линз в массиве грунта, практика показывает, что уничтожение почвенного покрова, избыточное обводнение поверхности, а также изменение конфигурации снежных наносов за 4-5 лет могут привести к повышению средней годовой температуры грунта на 1 град. и увеличению ареала сезонного оттаивания грунта на 30-50 %. В результате этих процессов на поверхности грунта возникают локальные участки термопросадки глубиной от 0,3 до 0,5 м.

Формирование термокарстовых просадок приводит к возникновению осадки фундаментов зданий и сооружений и появлению деформированных участков трубопроводов, что в свою очередь

Рис.3. Примеры реализации механизмов теплового взаимодействия инженерных сооружений с грунтом с применением сезонно-действующих охлаждающих устройств (а); без конструктивных элементов, обеспечивающих искусственное поддержание температурных режимов грунтов (б)

ведет к возникновению и росту изгибных напряжений в стенке. Наблюдение за термокрастовыми процессами на месторождении Медвежье показывает, что локальные термопросадки находятся в очень широком диапазоне от нескольких сантиметров до 1,5-2,0 м. Интенсивность просадки грунтов под инженерными сооружениями может возрастать при наличии пластично-мерзлых и талых грунтов с низкой несущей способностью, особенно при воздействии на такие грунты вибрационных нагрузок от оборудования с динамическими характеристиками.

При наличии склонов и выраженного рельефа на участках распространения многолетнемерзлых грунтов возможно развитие криогенных оползней и сплывов, которые приводят к движению обводненного и растепленного грунта по поверхности мерзлого массива вниз по склону. Среди основных факторов, влияющих на возникновение и развитие криогенных оползней, необходимо выделить силу тяжести массива грунта и интенсивность солнечной инсоляции. К повышению риска реализации криогенного оползня также приводят антропогенные процессы изменения водного баланса территорий, нарушения растительного слоя поверхности и появление повышенных нагрузок на склон. К зонам с опасностью возникновения криогенных оползней относятся склоны с крутизной от 1 до 10 град. и протяженностью от 100 до 1500 м. Для оценки опасности оползней выделяют их условную классификацию по размерам на малые, средние, крупные и очень крупные, критерием оценки является площадь оползня, не превышающая для малых – 0,2-0,3 га; для средних – 1-2,5 га, для крупных – 3-5 га, для очень крупных – более 5 га. Толщина массива сползающего грунта в таких случаях определяется значением глубины сезонного растепления и составляет от 0,4 до 0,8 м. Для текучепластичных грунтов толщина существенно меньше и обычно имеет значение не более 0,2-0,4 м.

Скорость движения оползней обычно зависит от угла наклона склона, интенсивности инсоляции, льдистости грунтов, фракционного состава грунта и имеет значение от долей метра до нескольких метров в сутки.

При наличии неблагоприятных условий миграции влаги в массиве грунта при процессах оттаивания и промерзания могут реализовываться процессы криогенного пучения грунта.

Криогенное пучение может оказывать на инженерные сооружения как значительные, так и незначительные негативные воздействия, поскольку толщина слоя пучиноопасных грунтов лимитируется глубиной сезонного протаивания. Многолетние бугры пучения достигают высоты до 8 м, в поперечном разрезе – нескольких десятков метров. На рис.4 приведен характерный пример формирования бугра пучения на территории площадочного объекта нефтегазового комплекса.

Практический опыт эксплуатации зданий и сооружения на месторождении Медвежье показывает, что наиболее частой причиной деформации фундаментов и конструкций является процесс криогенного пучения грунта. Сезонное перемещение свай в таких условиях может достигать 100-150 мм, а характерный эффект постоянно нарастающего пучения, которое приводит к тому, что ежегодно, после зимнего цикла сваи не успевают вернуться в исходное положение, вызывает деформации до 200-300 мм, в локальных точках – до 1 м.

Рис.4. Пример бугра пучения многолетнемерзлого грунта

Поверхностные воды, в том числе появившиеся в результате антропогенной деятельности, могут негативно воздействовать на многолетнемерзлые дисперсные породы, разрушая их и формируя новые типы рельефа. Данные процессы известны как термоэрозия и термоабразия. В условиях озерно-аллювиальных грунтов или льдистых аллювиальных грунтов при наличии стока по склону местности интенсивно реализуется процесс термоэрозии, который приводит к образованию характерных оврагов, врезов и промоин. Процесс термоабразии реализуется по берегам водоемов в виде водноприбойных ниш, которые в процессе развития приводят к обрушению и отступлению береговой линии.

Повышение напряжений в поверхностном слое грунта может привести к формированию сетки трещин и явлению криогенного растрескивания. Обычной причиной возникновения криогенного растрескивания является рост напряжений в процессе замерзания сезонно талого грунта и последующего охлаждения мерзлого грунта. Особенно интенсивно данный процесс реализуется на местности с небольшой мощностью снежного покрова. Трещины первоначально возникают на поверхности и растут в глубину на протяжении всего сезона промерзания, глубина трещин может достигать 3–4 м, а ширина лежит в широком диапазоне от нескольких сантиметров до нескольких метров.

Обсуждение. Причины деформаций при строительстве и эксплуатации площадных и линейных объектов в результате развития криогенных процессов достаточно хорошо изучены проектными, строительными и специализированными научными организациями. Для проектирования площадных и линейных объектов в криолитозоне на практике проводятся комплексные инженерно-геологические изыскания, которые позволяют:

- оценить сложность инженерно-геокриологических условий для строительства и эксплуатации площадных и линейных объектов, характер и распространение многолетнемерзлых пород, глубины сезонного протаивания, водонасыщенность слоя сезонного протаивания грунтов в летний период, мощность водонасыщенного слоя, среднегодовые температуры грунтов, льдистость отложений, засоленность грунтов, присутствие соленых отрицательно-температурных напорных вод и химический состав солей в рассолах, развитие повторно-жильных льдов и ледяных пластовых залежей, наличие морозобойного растрескивания и пучения грунтов, проявление склоновых процессов, наличие межмерзлотных и подмерзлотных вод;
- оценить риск проявления опасных криогенных процессов при строительстве и эксплуатации площадных и линейных объектов;
- определить граничные условия для допустимых техногенных нарушений;
- обосновать мероприятия по защите территорий и сооружений от опасных криогенных процессов;
- выбрать проектные решения строительства объектов на мерзлых грунтах;
- прогнозировать развитие опасных криогенных процессов;
- создать сеть геотехнического мониторинга, которая, как правило, включает в себя грунтовые реперы, деформационные марки, термометрические и гидрогеологические скважины.

В качестве примера необходимо рассмотреть реализуемые на месторождении Медвежье регулярные и системные наблюдения за осадками в рамках режимного нивелирования, которое охватывает объекты девяти УКПГ и девяти ДКС, в том числе межпромысловые коллекторы, а общее число наблюдаемых деформационных марок превышает 5500. Наблюдения показали, что около 20 % контролируемых свай или кустов свай были подвержены различным деформациям. Выявлено, что 12 % от общего числа свай подвергаются деформациям, превышающим принятые в проекте допустимые значения, что приводит к необходимости проведения досрочных внеплановых капитальных ремонтов, реконструкций, а в определенных ситуациях и остановки промыслов.

Наиболее частой причиной появления деформаций зданий, сооружений и трубопроводов на месторождениях Крайнего Севера в начальные периоды их эксплуатации является недоучет свойств многолетнемерзлых грунтов в процессе проектирования и строительства объектов, результатом которого является процесс нарушения теплообмена в системе сооружение – грунты основания.

Проекты, составленные с учетом результатов предварительной комплексной геокриологической съемки участка строительства и с соблюдением существующих норм и правил строительства на мерзлых основаниях, не должны сопровождаться деформациями инженерных сооружений при их эксплуатации и должны обеспечивать успешное многолетнее безаварийное функционирование объектов. Опыт строительства и эксплуатации нефтегазовых сооружений в криолитозоне показывает, что имеется ряд сложностей, связанных с обеспечением устойчивости сооружений при изменении условий теплообмена многолетнемерзлых грунтов с атмосферой и, как следствие, возникновением и увеличением амплитуд деформаций, таких как перекосы каркасов зданий и оборудования, изгибы трубопроводов, повышенная вибрация агрегатов. Основными причинами, вызывающими развитие таких деформаций, если исключить ошибки изысканий и проектирования, являются изменения мерзлотно-геологических условий, происходящие после завершения

строительства вследствие изменения состава грунтов активного слоя, величины снежного покрова, возможности поступления прямой и рассеянной солнечной радиации, нарушения или ликвидации напочвенных покровов, повышения влажности грунтов, отклонения температурного режима грунтов оснований от проектных решений и, как следствие, изменения условий теплообмена на поверхности.

Изменение условий теплообмена на поверхности может трансформировать направленность мерзлотного процесса, который может идти либо в том же направлении, что и климатический тренд, усиливая его, либо в противоположном, ослабляя климатический тренд, и привести к развитию или деградации мерзлых толщ. Благодаря своей низкой удельной теплопроводности, снег действует как теплоизолирующий слой и поэтому уменьшает как глубину промерзания в течение зимы, так и глубину оттаивания летом. Снежный покров также уменьшает количество солнечной радиации, получаемой поверхностью земли, тем самым влияя на разность между среднегодовой температурой воздуха и температурой поверхности земли.

Нарушения поверхностного органического слоя и растительного покрова в области распространения многолетнемерзлых грунтов вне зависимости от того, связаны они с природными или техногенными причинами, обычно приводит к увеличению мощности деятельного слоя. Изменение мерзлотно-геологических условий промышленных площадок наблюдается после создания насыпи. Положение зданий и сооружений в рельефе может изменять характер снегонакопления и пространственную солнечную экспозицию и определять пространственную дифференциацию температурного поля. Поскольку прочностные и деформационные свойства грунтов напрямую зависят от температуры, деградация мерзлых пород приводит к резким изменениям в условиях функционирования оснований и фундаментов. В результате неопределенность свойств грунтов основания порождает возможность превышения расчетных деформаций и усилий в фундаменте, а также возникновения аварийных ситуаций. Поэтому для всего комплекса технологического оборудования в системе добычи и транспорта природного газа на месторождениях в районах Заполярья одной из важнейших проблем является проблема поиска и реализации наиболее эффективных технических решений по недопущению потери эксплуатационной надежности зданий, сооружений и трубопроводов из-за деформаций, возникших при нарушении свойств и характера взаимодействия многолетнемерзлого грунта с окружающей природной и антропогенной средой.

Результаты. Поскольку параметры промерзания и оттаивания зависят от величины и продолжительности действия положительных или отрицательных температур, для контроля за изменениями и прогноза развития отклонений температурного режима грунтов оснований от проектных решений можно использовать индексы промерзания и оттаивания в качестве индикаторных показателей.

Колебания температур можно оценить количеством градусов температуры воздуха или температуры поверхности почвы выше или ниже 0°C , а продолжительность действия этого отклонения выражается в единицах времени. Индексы промерзания I_n и оттаивания I_o выражаются суммой градусо-суток за сезон промерзания или оттаивания. Для конкретных суток значение градусо-суток непосредственно эквивалентно среднесуточной температуре, выраженной в градусах Цельсия. Индекс промерзания представлен площадью кривой распределения температуры ниже линии 0°C (рис.5). Индекс оттаивания представлен площадью, определяемой частью, расположенной выше

Рис.5. График зависимости температуры грунта в течение года

линии 0°C за время, равное продолжительности соответствующего сезона (рис.5). На рис.6 приведен пример фактических температур грунта и динамика их изменения в течении года для Якутска. Особенностью расчетов индексов промерзания и оттаивания является необходимость решения задачи определения оптимальной глубины измерения, при большой глубине заложения измерительной точки (рис.6, кривая для 1,6 м) или при расположении точки измерения слишком близко к поверхности (рис.6, кривая для 0,8 м) значения индексов промерзания могут значительно колебаться от сезона к сезону даже при отсутствии антропогенных факторов.

Отношение индексов промерзания $I_{\text{п}}$ и оттаивания $I_{\text{о}}$ образует индивидуальную характеристику температурного режима территории T_i :

$$T_i = \frac{I_{\text{п}}}{I_{\text{о}}} = \frac{\sum_{i=1}^n |t_i| z_i}{\sum_{j=1}^m t_j z_j},$$

$$I_{\text{п}} = \int_0^{-\infty} f(t) dt = \sum_{i=1}^n |t_i| z_i,$$

$$I_{\text{о}} = \int_0^{+\infty} f(t) dt = \sum_{j=1}^m t_j z_j.$$

где $f(t)$ – зависимость температуры грунта от времени; n – количество суток с температурой ниже 0°C ; m – количество суток с температурой выше 0°C ; t_i – температура ниже 0°C в i -е сутки; z_i – количество суток с температурой t_i ; t_j – температура выше 0°C в j -е сутки; z_j – количество суток с температурой t_j .

Индивидуальная характеристика температурного режима территории T_i лежит в диапазоне значений от 0 до $+\infty$. Нулевое значение соответствует грунту, температурный режим которого не предполагает промораживания, а значение $+\infty$ – грунту, температурный режим которого не предполагает размораживания – многолетнемерзлому грунту (пример представлен на рис.7). Для сезонно замораживаемых грунтов со среднегодовой температурой (на глубине измерения) ниже 0°C значение T_i больше 1, для сезонно замораживаемых грунтов со среднегодовой температурой (на глубине измерения) выше 0°C значение T_i меньше 1. Оптимальной точкой для измерения является такая глубина, где среднегодовая температура грунта близка или равна 0°C , при устоявшемся тепловом режиме для данной глубины значение T_i близко к 1.

При стационарном теплотехническом состоянии грунтов значение T_i каждый сезон остается практически постоянным ($T_i = \text{const}$), с незначительными колебаниями год к году, если значение T_i растет ($T_i \uparrow$), это сигнализирует о том, что грунт начинает аккумулировать холод и промерзать, глубина растепления будет уменьшаться, а температура мерзлого грунта понижаться, в случае если значение T_i понижается ($T_i \downarrow$), в грунте происходит процесс растепления, температура мерзлого грунта понижается, а глубина ежегодного оттаивания повышается.

Поскольку сбор данных о температуре воздуха обычно проводится на всех метеорологических станциях, а измерения температурного состояния грунтов основания объектов на всей территории является составной частью геотехнического мониторинга, формирование индексов промерзания $I_{\text{п}}$ и оттаивания $I_{\text{о}}$ в разрезе территории в рамках годового цикла не представляет большой сложности. Модели изменения индивидуальной характеристики температурного режима территории

Рис.6. Фактические температуры грунта в течение года на различных глубинах, м: 0,8 ($T_i = 2,1$); 1,2 ($T_i = 3,61$); 1,6 ($T_i = 11,9$)

Рис.7. Модели изменения индивидуальной характеристики температурного режима территории T_i

приведены на рис. 7, непосредственный алгоритм реализации методики принятия управленческих решений, базирующийся на моделях изменения индивидуальной характеристики температурного режима территории будет представлен в последующих работах.

Заключение. Изменение мерзлотных характеристик многолетнемерзлого грунта техногенной природы является важнейшим фактором безаварийной эксплуатации инженерных сооружений газового комплекса в криолитозоне. Перед эксплуатирующими организациями стоят задачи эффективного и своевременного обнаружения предпосылок к возникновению данных процессов, отслеживанию интенсивности и прогнозу развития в ближайшей перспективе. Анализ индексов промерзания и оттаивания может быть использован как комплексный критерий оценки изменений мерзлотно-геологических условий промышленных площадок. Анализ численных значений индексов промерзания и оттаивания позволяет оценить итоговое воздействие всего спектра техногенных и природных факторов на состояние многолетнемерзлого грунта.

Численные значения индекса промерзания и оттаивания, выраженные посредством расчета индивидуальной характеристики температурного режима территории, должны применяться в качестве сигнальных критериев начала процесса изменения мерзлотного состояния грунта под сооружениями и для принятия решений об изменении уровня контроля, внедрении той или иной системы термостабилизации или иных методов стабилизации мерзлотных процессов. Наблюдения за индексами промерзания и оттаивания позволяют зафиксировать момент проявления трендов в процессах постепенного изменения условий теплообмена многолетнемерзлых грунтов с атмосферой и температурного режима грунтов оснований инженерных сооружений объектов газового комплекса в криолитозоне. Такая информация позволяет своевременно планировать проведение мероприятий деформационного мониторинга зданий и оборудования, чтобы исключить возможность их отказов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бабелло В.А. Оценка причин деформаций зданий железнодорожных вокзалов, возведенных на многолетнемерзлых грунтах / В.А.Бабелло, С.В.Смолич // Геотехника. 2011. № 2. С. 42-48.
2. Березняков А.И. Научное обоснование и промышленное внедрение комплексного геотехнологического мониторинга систем добычи газа на месторождениях севера Западной Сибири: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук: М.: Институт проблем нефти и газа РАН, 2005. 48 с.
3. Ботвинцева Н.Ю. Фундаменты на структурно-неустойчивых грунтах / Н.Ю.Ботвинцева, И.С.Буракова, О.Г.Фоменко // Современная наука и инновации. 2016. № 2 (14). С. 133-139.
4. Витченко А.С. Контроль деформированного состояния надземных трубопроводов в криолитозоне: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий, 2008. 22 с.
5. Геотехнический мониторинг Ямбургского нефтегазоконденсатного месторождения в условиях сплошного распространения многолетнемерзлых грунтов / Ш.Г.Балтабаев, Е.П.Серебряков, М.С.Лебедев, Е.Т.Лебедева // Инженерные изыскания. 2015. № 1. С. 64-69.
6. Голубин С.И. Математическое моделирование теплового взаимодействия подземного газопровода с многолетнемерзлыми грунтами полуострова Ямал // Инженерная геология. 2009. № 4. С. 20-27.
7. Грива Г.И. Геоэкологические условия разработки газовых месторождений полуострова Ямал: Автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук: Томск: Томский государственный архитектурно-строительный университет, 2006. 46 с.
8. Ибрагимов Э.В. Оптимизация устройства оснований и фундаментов в криолитозоне (на примере вертикального стального резервуара РВС-20000 м³) / Э.В.Ибрагимов, Я.А.Кроник // Геотехника. 2018. Т. 10. № 5-6. С. 52-61.
9. Инженерная защита объектов Бованенковского НГКМ от воздействия опасных экзогенных процессов / С.Н.Меньшиков, И.С.Морозов, И.В.Мельников и др. // Наука и техника в газовой промышленности. 2014. № 2 (58). С. 14-22
10. Колосков Г.В. К вопросу выбора оптимальных систем термостабилизации грунтов при строительстве в криолитозоне / Г.В.Колосков, Э.В.Ибрагимов, Р.Г.Гамзаев // Геотехника. 2015. № 6. С. 4-11.
11. Крылов Д.А. Температурный режим вечномерзлого грунта под зданием со свайным фундаментом / Д.А.Крылов, А.А.Федотов // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э.Баумана. Серия Естественные науки. 2013. № 3(50). С. 106-116.
12. Набережный А.Д. Анализ причин снижения несущей способности оснований и фундаментов в геокриологических условиях Якутии / А.Д.Набережный, Г.П.Кузьмин, Ф.Ф.Посельский // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 8. С. 64-69.
13. Осокин А.Б. Современные технологии строительства оснований и фундаментов для освоения нефтегазовых месторождений в криолитозоне / А.Б.Осокин, Г.К.Смолов // Наука и техника в газовой промышленности. 2015. № 4 (62). С. 89-96.
14. Попов А.П. Управление геотехническими системами газового комплекса в криолитозоне: прогноз состояния и обеспечение надежности: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Тюмень: Институт криосферы Земли Сибирского отделения Российской академии наук, 2005. 48 с.

15. Причины раскрытия деформационных швов фундаментов станции НПС-2 нефтепровода Куюмба – Тайшет / Л.И.Кошелева, С.П.Миусов, Д.Г.Рязанцев, С.С.Ковыршин // Строительные материалы. 2018. № 12. С. 55-60. DOI: 10.31659/0585-430X-2018-766-12-55-60
16. Проблема пучения в трубопроводном строительстве и методы ее устранения / Д.А.Гулин, Э.В.Файзуллина, Э.И.Шарипова и др. // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2020. № 4 (126). С. 60-72. DOI: 10.17122/ntj-oil-2020-4-60-72
17. Пространственные модели, разрабатываемые с применением лазерного сканирования на газоконденсатных месторождениях северной строительно-климатической зоны / С.Н.Меньшиков, А.А.Джалябов, Г.Г.Васильев и др. // Записки Горного института. 2019. Т. 238. С. 430-437. DOI: 10.31897/PMI.2019.4.430
18. Санников Г.С. Изменения морфометрических показателей термокарстовых озер западного Ямала как индикатор динамики геологической среды и ее реакции на техногенное воздействие (на примере Бованенковского месторождения): Автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Тюмень: Институт криосферы Земли Сибирского отделения Российской академии наук, 2016. 25 с.
19. Скатинцев А.Е. Геоэкологическое обоснование инженерной защиты и геотехнического мониторинга строительства трубопроводов в криолитозоне: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: Московский государственный строительный университет, 2013. 20 с.
20. Соколов С.М. Проектирование промысловых трубопроводов в коридорах коммуникаций в сложных условиях / С.М.Соколов, С.В.Кисев // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2014. № 4. С. 77-79.
21. Способы борьбы с морозным пучением сезоннопромерзающих грунтов в основаниях фундаментов зданий и сооружений / Д.С.Скворцов, А.Н.Краев, А.Н.Краев, Е.А.Жайсамбаев // Вестник евразийской науки. 2019. Т. 11. № 5. С. 1-12.
22. Стабилизация грунтов методом «холодного ресайклинга» в условиях многолетнемерзлых грунтов для обустройства нефтегазовых месторождений / В.А.Горьков, А.Н.Коркишко, А.В.Набоков и др. // Фундаментальные исследования. 2017. № 7. С. 20-24.
23. Стрижков С.Н. Снижение техногенного воздействия зданий и сооружений на грунтовые основания и их геомониторинг в криолитозоне // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 11. С. 8-12.
24. Управление гидрогеологическим режимом с целью предупреждения деформаций свайных фундаментов в результате морозного пучения грунтов (на примере Ямбургского нефтегазоконденсатного месторождения) / Ш.Г.Балтабаев, Е.П.Серебряков, Е.Т.Лебедева, М.С.Лебедев // Геотехника. 2015. № 6. С. 24-33.
25. Huijun J. Design and construction of a large-diameter crude oil pipeline in Northeastern China: A special issue on permafrost pipeline // Cold Regions Science and Technology. 2010. Vol. 64. Iss. 3. P. 209-212. DOI: 10.1016/j.coldregions.2010.04.016
26. Pipeline-permafrost interaction monitoring system along the China – Russia crude oil pipeline / F.Wang, G.Li, M.Wei et al. // Engineering Geology. 2019. Vol. 254. P. 113-125. DOI: 10.1016/j.enggeo.2019.03.013
27. Shur Y. Climate Change and Foundations of Buildings in Permafrost Regions / Y.Shur, D.Goering // Permafrost Soils. 2009. Vol. 16. P. 251-260. DOI: 10.1007/978-3-540-69371-0_17
28. Utkin V.S. The reliability analysis of existing reinforced concrete piles in permafrost regions / V.S.Utkin, L.A.Sushev // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2017. Vol. 13. № 2. P. 64-72. DOI: 10.22337/2587-9618-2017-13-2-64-72
29. Wilkie S.A. Northern Canadian pipeline deals with effects of soil movement / S.A.Wilkie, R.M.Doblancko, S.J.Fladager // Oil & Gas Journal. 2001. Vol. 99. № 20. P. 62-66.

Авторы: Г.Г.Васильев, д-р техн. наук, заведующий кафедрой, srgnp@gubkin.ru (РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М.Губкина, Москва, Россия), А.А.Джалябов, директор филиала, adzhalyabov@invest.gazprom.ru (ООО «Газпром инвест» «Надым», Надым, Россия), И.А.Леонович, канд. техн. наук, доцент, leonovich.i@gubkin.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9054-1537> (РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М.Губкина, Москва, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 20.01.2021.

Статья принята к публикации 29.03.2021.