

## СТАНОВЛЕНИЕ И РАЗВИТИЕ ИНЖЕНЕРНОГО МЕРЗЛОТОВЕДЕНИЯ В ЯКУТИИ

Р.М. Каменский

*Институт мерзлотоведения им.П.И.Мельникова СО РАН, 677010, Якутск, Россия*

Доклад посвящен формированию в Якутии инженерного мерзлотоведения и его развитию на протяжении почти шестидесяти лет. Основы его были заложены П.И. Мельниковым. Он был идейным вдохновителем, научным руководителем и организационной опорой большей части работ, выполненных на мерзлотной станции, в Северо-Восточном отделении Института мерзлотоведения им. В.А. Обручева, Институте мерзлотоведения СО АН СССР и в его региональных подразделениях.

Основными направлениями инженерных исследований в Якутии являются: изучение физико-механических свойств мерзлых грунтов, экспериментальные и теоретические работы по механике грунтов, фундаменты на мерзлом основании, гидротехнические сооружения и мелиоративные системы, взаимодействие сооружений с мерзлыми грунтами и средой, замораживание талых и охлаждение мерзлых грунтов в основании сооружений или при формировании противофильтрационных завес, газопроводы и другие линейные сооружения, подземные сооружения в криолитозоне.

Этот доклад — выражение благодарности основателям новой науки и нашим учителям.

*Мерзлый грунт, свойства, прочность, фундамент, сооружения, взаимодействие*

### FORMATION AND EVOLUTION OF PERMAFROST ENGINEERING IN YAKUTIA

R.M.Kamensky

*Permafrost Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Yakutsk 677010, Russia*

The paper is devoted to the formation of permafrost engineering and its development over the last sixty years in Yakutia. P.I. Melnikov laid the groundwork for this area of research. He was an inspirer, scientific guide and support in the greater part of the research conducted at the permafrost station, the North-Eastern Department of the Obruchev Permafrost Institute, the Permafrost Institute USSR Ac.Sci. and its regional divisions.

The basic lines of engineering research in Yakutia are investigations of physical and mechanical properties of frozen soils, experimental and fundamental studies on soil mechanics, foundations of buildings and structures on frozen bearing soils, hydroengineering structures and amelioration systems, interaction of structures with frozen soils and environment, freezing of thawed soils and cooling of frozen soils in the base of structures or for creation of impermeable screens, gas pipelines and other linear structures, underground facilities in permafrost.

This paper is the appreciation to the founders of the new discipline and to our teachers.

*Frozen soil, properties, stability, foundation, structures, interaction*

Становление и развитие инженерного мерзлотоведения в Якутской Республике началось в 1932 г. Именно в этом году в Якутске было начато, а в 1938 г. завершено, строительство первого крупного промышленного сооружения на вечной мерзлоте, — Якутской центральной электростанции (ЯЦЭС). ЯЦЭС впервые проектировалась и возводилась по первому принципу — с сохранением мерзлого состояния грунтов основания. Фундаменты здания были запроектированы и рассчитаны по методу Николая Александровича Цытовича, а производством фундаментных работ руководил известный инженер-мерзлотовед Владимир Фёдорович Жуков. С января 1939 г. были организованы наблюдения за изменением температуры грунтов основания ЯЦЭС в

процессе ее эксплуатации. Режимные наблюдения непрерывно проводились Якутской научно-исследовательской мерзлотной станцией Института мерзлотоведения им. В.А. Обручева АН СССР.

В первые годы становления инженерного мерзлотоведения в Якутии шло накопление и анализ данных о влиянии инженерно-геокриологических условий на выбор принципа использования грунтов оснований и разрабатывались новые оптимальные конструкции фундаментов сооружений. Одновременно организовывались и велись многолетние комплексные наблюдения за динамикой состояния грунтов в основании различных зданий и сооружений, а также проводились эксперименты по определению влияния

различных теплоизоляционных покрытий на формирование температурного режима подстилающих пород.

Нельзя не отметить и пионерные разработки по восстановлению и сохранению мерзлого состояния грунтов в основании исторических зданий города Якутска. Этот этап развития инженерного мерзлотоведения в Якутии подробно освещен в кандидатской диссертации П.И. Мельникова и в его монографии „Мерзлотно-геологические условия возведения гражданских и промышленных зданий на территории Центральной Якутии и опыт строительства“ [Мельников, 1951].

На Якутской мерзлотной станции в течение многих лет велись теоретические и экспериментальные работы в области механики мерзлых пород — фундаментальной основы оценки прочностных свойств грунтов и несущей способности фундаментов. Начало им было положено исследованиями Александра Ефимовича Федосова, который рано ушел из жизни, но внес заметный вклад в инженерное мерзлотоведение. А.Е. Федосов в статье „Механические процессы в грунтах при замерзании в них жидкой фазы“ [1940] вплотную подошел к проблеме термореоалогии мерзлых грунтов, которая в последующем получила развитие в монографии Иннокентия Николаевича Вотякова [Вотяков, 1975].

В 1941 г. при изысканиях в пос. Покровск А.Е. Федосов [1942] создал собственную методику расчета осадок при оттаивании, так как о работе Н.А. Цытовича „Расчет осадок фундаментов“, изданной в 1941 г. в Якутске, узнали лишь во второй половине 1942 г.

Систематические исследования физико-механических свойств многолетнемерзлых грунтов Якутии начались в 1948 г. в связи с приходом на мерзлотную станцию И.Н. Вотякова. Они проводились и в подземной, и в обычной лабораториях, а также в полевых условиях. Обширный экспериментальный материал обрабатывался методами теории вероятности и статистики, и, в результате, были предложены эмпирические зависимости для определения физических свойств многолетнемерзлых грунтов и их осадки при оттаивании на основании только одной характеристики — суммарной влажности. Методы расчета И.Н. Вотякова [1975] и в настоящее время используются изыскательскими и проектными организациями.

В конце 50-х — начале 60-х гг. Кириллом Фабиановичем Войтковским [Войтковский, 1963] и Станиславом Евгеньевичем Гречищевым [Гречищев, 1963] в лабораторных условиях исследовались реологические свойства мерзлых грунтов, в том числе и при сложном напряженном состоянии. В тот же период К.Ф. Войтковский подготовил монографию „Механические свойства льда“ [Войтковский, 1960].

В подземной лаборатории Северо-Восточного отделения Института мерзлотоведения им. В.А. Обручева очень сложные в методическом отношении экспериментальные работы проводил Андрей Александрович Жигульский. Он исследовал распределение касательных напряжений вдоль боковой поверхности свай, установил роль ее торца в передаче нагрузки на мерзлый массив и предложил методы расчета несущей способности свай [Жигульский, 1966]. Исследования П.И. Мельникова [Мельников, 1958] и А.А. Жигульского послужили основой для пересмотра региональных нормативных характеристик прочности мерзлых грунтов при их взаимодействии с фундаментом. В 1968 г. опыт проектирования и возведения фундаментов зданий и сооружений на мерзлых грунтах в Якутии был обобщен в известной коллективной монографии, при активном участии П.И. Мельникова [Войтковский и др., 1968].

В начале 70-х гг. Институт мерзлотоведения СО АН СССР по инициативе П.И. Мельникова вновь вернулся к исследованию работы фундаментов зданий и сооружений в районах распространения вечномерзлых грунтов [Гайденоко, 1978; Каменский, 1990]. Были исследованы возможности применения буронабивных свай, возводимых с использованием электроподогрева.

Необходимо особенно подчеркнуть, что в конце 50-х и начале 60-х гг. в инженерном мерзлотоведении наметились новые подходы и методы оценки работы сооружений в криолитозоне.

Аналитические методы расчета теплового, а на его основе механического взаимодействия сооружений с мерзлыми грунтами исчерпали себя из-за необходимости значительного упрощения физической и математической моделей. Поэтому инженеры-мерзлотоведы стали активно и результативно использовать метод гидротепловой аналогии — гидроинтегратор Владимира Сергеевича Лукьянова, который позволял просчитать десятки вариантов конкретной задачи, причем в режиме нестационарного теплообмена и с учетом тепла, выделяемого (поглощаемого) при фазовом переходе грунтовой влаги.

Прогнозные оценки взаимодействия сооружений со средой в значительной мере стали опираться на данные наблюдений за тепловыми и механическими процессами на реальных сооружениях или эксперименты в натуре. Для инженерного мерзлотоведения это была революция, и в этом есть весомый вклад якутских мерзлотоведов.

Хочу прежде всего отметить ранние работы Анатолия Феликсовича Зильберборда. Он со своими коллегами провел серии наблюдений на шахтах Сангарская, Джебарики-Хая, Чульманская, Согинская и др. и, используя расчеты на

гидроинтеграторе, разработал методы прогноза теплового режима шахт. В 1963 г. в издательстве АН СССР была опубликована его монография „Тепловой режим шахт в области распространения многолетнемерзлых горных пород“ [Зильберборд, 1963], которая явилась дальнейшим развитием исследований родоначальника нового горного направления в инженерном мерзлотоведении Валентина Петровича Бакакина.

В связи с освоением алмазных месторождений на западе Якутии и строительством г. Мирный со всей его сложной инфраструктурой сотрудниками Северо-Восточного отделения Николаем Филипповичем и Людмилой Сергеевной Блиновыми было положено начало исследованиям на гидротехнических сооружениях Якутии. В частности, с 1958 по 1961 г., они вели наблюдения за состоянием и динамикой термического режима плотины водохозяйственного назначения, которая относилась к типу талой, фильтрующей, но на мерзлом основании. Результаты работ и их анализ послужили основой для уточнения принципов и методов строительства подобных сооружений в Мирнинском районе.

В начале 60-х гг. на территории Северо-Восточного отделения были организованы и выполнены полупроизводственные экспериментальные исследования теплообмена подземных водопроводов [Каменский, 1964] и канализационных коллекторов [Константинов, 1968] с мерзлыми грунтами при стационарном режиме, результаты которых легли в основу нормативных документов того времени.

В связи со строительством на р. Вилюй первой в мире ГЭС на вечной мерзлоте, по инициативе П.И. Мельникова, в пос. Чернышевский (Якутская АССР) была организована Вилюйская научно-исследовательская мерзлотная станция (ВНИМС), коллектив которой провел многолетние наблюдения за динамикой термического режима плотины, ее основания, водохранилища и его ложа, а также выполнил исследования процессов переработки берегов [Каменский, 1977; Оловин, Медведев, 1980; Константинов, 1984]. Кроме того, на станции был разработан метод теплотехнического расчета льдогрунтовой противофильтрационной завесы плотин с учетом взаимного влияния колонок при принудительной вентиляции наружного воздуха [Каменский, 1971]. Проблемы замораживания талых и охлаждения мерзлых грунтов разрабатывались на ВНИМС и в последующие годы.

Жидкостные термосифоны, идея и первые конструктивные разработки которых принадлежат Степану Ивановичу Гапееву [Гапеев, 1969], были в модернизированном виде (коаксиальная система) использованы в Мирном в качестве охлаждающего элемента холодных свай. На станции же были исследованы внутренние и

внешние процессы теплообмена одиночного термосифона с грунтами и предложены конструктивная и технологическая схемы их использования для создания противофильтрационных элементов плотин различного назначения [Макаров, 1985].

Северная гидротехника всегда привлекала внимание якутских мерзлотоведов. Они принимали активное участие в изысканиях на площадках сооружений различных гидроузлов и внесли значительный вклад в научно-техническое обоснование конструкции, методов строительства и эксплуатации плотин, в том числе и мелиоративного назначения [Проектирование..., 1976]. Под научным руководством Софии Григорьевны Цветковой были организованы и проведены комплексные инженерно-геокриологические исследования на действующих мелиоративных системах, а в последующем разработан атлас температурных полей земляных плотин низкого напора [Чжан, 1983].

В связи с научно-техническим обоснованием и подготовкой проектов по подземной добыче алмазов на известных кемберлитовых трубках были предложены нестандартные решения фундаментов для обеспечения устойчивости башенных копров, которые при большой сосредоточенной нагрузке оказываются расположенными в зоне приствольного талика [Гурьянов, 1988]. Параллельно велись исследования деформаций оттаявших грунтов в кольцевом ореоле при взаимодействии с изгибаемыми конструкциями [Guryanov, 1983].

П.И. Мельников уделял большое внимание проблемам разработки газовых месторождений в Якутии и транспорту газа. Именно по его настоянию впервые в СССР часть газопровода Таас Тумус — Якутск была проложена под землей. Этот опыт был использован при прокладке газопроводов большого диаметра на Тюменском Севере.

В середине 70-х гг. на подземном участке Якутского газопровода были организованы и проведены комплексные наблюдения за его теплообменом с мерзлыми грунтами и разработаны рекомендации для проекта транспорта газа к бухте Ольга [Каменский, 1987], который так и не был реализован. В последующие годы и по 1996 г. геокриологический мониторинг на газопроводе продолжала лаборатория инженерных сооружений института [Гайденоко, Константинов, 1989]. Причем изучение проблемы транспорта газа в криолитозоне дало толчок к поиску нетрадиционных методов. В институте мерзлотоведения была экспериментально оценена возможность использования для этих целей туннелей, пройденных в многолетнемерзлой толще и работающих под давлением. Идея принадлежала Всесоюзному научно-исследовательскому институту

по строительству магистральных трубопроводов, была поддержана П.И. Мельниковым, а научно-техническая проверка ее выполнена лабораторией физики и механики мерзлых грунтов института. Для этих целей на глубине 22 м была пройдена экспериментальная выработка диаметром 3,2 м и длиной 50 м. В ней, а также в лабораторных условиях исследовались процессы выветривания открытой поверхности мерзлого массива и оценивалась возможность инфильтрации газа в сопредельный массив. На основе экспериментальных данных были разработаны методы расчета устойчивости горных выработок в мерзлых грунтах при расположении их вблизи поверхности земли. Эксперимент показал, что при достижении рабочего давления в полости происходит разрушение кровли вследствие развития прогрессирующего течения — деформации мерзлых грунтов с увеличивающейся скоростью. Относительно главной цели — возможности транспорта газа в туннелях — исследования дали отрицательный результат, но позволили решить ряд сопутствующих инженерных проблем [Кузьмин, 1977].

В одном ряду с этими исследованиями стоят теоретические и практические разработки по использованию подземного пространства криолитозоны — строительство подземных резервуаров в толще мерзлых дисперсных грунтов. Этой проблеме в Институте мерзлотоведения СО АН СССР было уделено особое внимание, и ее научным руководителем в течение 15 лет был П.И. Мельников.

На первом этапе были выполнены эксперименты по созданию полости в многолетнемерзлых грунтах объемом 1250 м<sup>3</sup> методом скважинного гидроразрыва. В последующем на основе опытных данных была детально разработана технология строительства подземных резервуаров, а также и способы выдачи на поверхность разработанного грунта, исследованы особенности их взаимодействия с мерзлыми грунтами, предложены и испытаны средства охлаждения мерзлого массива. Не менее значительны были научно-технические разработки по использованию созданных подземных резервуаров в практических целях. В Центральной Якутии по заказам сельхозпроизводителей было построено несколько резервуаров — аккумуляторов холода для охлаждения в летний период молока, для создания запасов воды и предложены методы хранения в подземных резервуарах жидких нефтепродуктов [Кузьмин, 1992]. Заметим, что в первом экспериментальном подземном резервуаре уже в течение 25 лет находится дизельное топливо, сохранившее все исходные свойства. В настоящее время готовится проект создания в Якутске крупного подземного хранилища газа.

За последнее десятилетие резко снизился объем исследований в области инженерного мерзлотоведения из-за невозможности проведения экспериментальных работ в природных условиях. Нет и крупных хозяйственных объектов для проведения наблюдений за их взаимодействием со средой. В настоящее время Институт продолжает научные разработки в области мелиоративной гидротехники, ведет исследования структурных преобразований мерзлых грунтов под нагрузкой и изучает закономерности деформирования мерзлых грунтов.

За пределами Якутии проблемы регионального инженерного мерзлотоведения решаются в двух подразделениях института — на Северо-Восточной научно-исследовательской мерзлотной станции (в г. Магадан) и в Забайкалье в Читинском отделе Института мерзлотоведения.

### Литература

- Войтковский К.Ф. Механические свойства льда. М., Изд-во АН СССР, 1960, 100 с.
- Войтковский К.Ф. Некоторые закономерности ползучести мерзлых скелетных грунтов // Прочность и ползучесть мерзлых грунтов. М., Изд-во АН СССР, 1963, с. 125—139.
- Войтковский К.Ф., Мельников П.И., Порхаев Г.В. и др. Фундаменты сооружений на мерзлых грунтах в Якутии. М., Наука, 1968, 176 с.
- Вотяков И.Н. Физико-механические свойства мерзлых и оттаивающих грунтов Якутии. Новосибирск, Наука, 1975, 176 с.
- Гайденко Е.И. О несущей способности буронабивных свай в вечномерзлых грунтах // Основания и фундаменты при строительстве в районах Сибири и Крайнего Севера: строительство в районах Восточной Сибири и Крайнего Севера. Красноярск, 1978, вып. 45, с. 32—40.
- Гайденко Е.И., Константинов И.П. Особенности работы газопровода Мастах—Якутск // Газовая промышленность, 1989, № 7, с. 39—41.
- Гапеев С.И. Укрепление мерзлых оснований охлаждением. Л., Стройиздат, 1969, 104 с.
- Гречищев С.Е. Ползучесть мерзлых грунтов при сложном напряженном состоянии // Прочность и ползучесть мерзлых грунтов. М., Изд-во АН СССР, 1963, с. 55—124.
- Гурьянов И.Е. Принципы фундирования надшахтных зданий на вечномерзлых грунтах // Проблемы геокриологии. М., Наука, 1988, с. 164—174.
- Жигульский А.А. Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния грунта около сваи // Мат-лы VIII Всесоюзного междуведомственного совещания по геокриологии (мерзлотоведению). Якутск, 1966, вып. 5, с. 210—222.
- Зильберборд А.Ф. Тепловой режим шахт в области распространения многомерзлотных горных пород. М., Изд-во АН СССР, 1963, 95 с.
- Каменский Р.М. Тепловое взаимодействие водопроводов с мерзлыми грунтами // Колыма, 1964, № 7, с. 41—48.
- Каменский Р.М. Теплотехнический расчет льдогрунтовой противофильтрационной завесы плотин с учетом взаимного влияния колонок // Гидротехническое строительство, 1971, № 4, с. 38—42.
- Каменский Р.М. Термический режим плотины и водохранилища Вилюйской ГЭС. Якутск, Ин-т мерзлотоведения СО РАН, 1977, 92 с.

- Каменский Р.М. Исследования теплообмена газопровода с мерзлыми грунтами. Якутск, Ин-т мерзлотоведения, 1987, 56 с.
- Каменский Р.М. Экспериментальные исследования теплового взаимодействия буронабивных свай с мерзлыми грунтами // Геокриологические исследования на севере Западной Сибири. Новосибирск, Наука, 1990, с. 65—72.
- Константинов И.П. Тепловой расчет периодически действующих безнапорных трубопроводов в условиях вечной мерзлоты // Водоснабжение и санитарная техника, 1968, № 8, с. 15—20.
- Константинов И.П. Динамика берегов водохранилища Вилюйской ГЭС в период наполнения и начальной эксплуатации // Береговые процессы в криолитозоне. Новосибирск, Наука, 1984, с. 38—50.
- Кузьмин Г.П. Исследования устойчивости напорных выработок в мерзлых грунтах. Якутск, Ин-т мерзлотоведения СО РАН, 1977, 112 с.
- Кузьмин Г.П. Подземные резервуары в мерзлых грунтах. Якутск, Ин-т мерзлотоведения СО РАН, 1992, 152 с.
- Макаров В.И. Термосифоны в северном строительстве. Новосибирск, Наука, 1985, 169 с.
- Мельников П.И. Мерзлотно-геологические условия возведения гражданских и промышленных зданий на территории Центральной Якутии и опыт строительства. М., Изд-во АН СССР, 1951, 136 с.
- Мельников П.И. Об особенностях проектирования железобетонных фундаментов, закладываемых в многолетнемерзлые грунты // Тр. Северо-Восточного отделения Ин-та мерзлотоведения. Якутск, 1958, вып. 1, с. 13—20.
- Оловин Б.А., Медведев Б.А. Динамика температурного режима плотины Вилюйской ГЭС. Новосибирск, Наука, 1980, 48 с.
- Проектирование плотин для оросительных мелиораций / Под ред. Р.М. Каменского. Якутск, Кн. изд-во, 1976, 235 с.
- Федосов А.Е. Механические процессы в грунтах при замерзании в них жидкой фазы // Тр. Ин-та геол. наук АН СССР, сер. инж. геол., 1940, вып. 4, 42 с.
- Федосов А.Е. Прогноз осадки сооружения при оттаивании грунтов в основании // Исследование вечной мерзлоты в Якутской Республике. Якутск, Якутское гос. изд-во, 1942, вып. 1, с. 52—67.
- Цытович Н.А. Расчет осадок фундаментов. Л.—М., Госстройиздат, 1941, 124 с.
- Чжан Р.В. Прогноз температурного режима низко- и средненапорных грунтовых плотин в Якутии. Якутск, Ин-т мерзлотоведения СО АН СССР, 1983, 43 с.
- Guryanov I.E. Analysis of interactions between lined shafts, pipes and thawing permafrost // Permafrost: Forth International Conference Proceedings. Academy Press, Washington, 1983, p. 405—408.

Поступила в редакцию  
24 апреля 1998 г.