

УДК 622.692.4

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОРЕОЛА ОТТАИВАНИЯ ДЛЯ ВЕРИФИКАЦИИ И КАЛИБРОВКИ ПРОГНОЗНЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Е.М. Макарычева¹, В.И. Ларионов², П.А. Новиков²

¹Институт геоэкологии имени Е.М. Сергеева РАН, Москва
e-mail: emakarycheva@gmail.com

²МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва
e-mail: lar@esrc.ru; novikov-p-a@bmstu.ru

Предложена методика проведения натурных обследований, позволяющая установить основные закономерности теплового взаимодействия трубопровода с многолетнемерзлыми грунтами. Результаты обследований могут быть использованы для верификации и калибровки прогнозных математических моделей. Методика апробирована на участках трассы магистрального нефтепровода.

Ключевые слова: трубопровод, многолетнемерзлые грунты, ореол оттаивания, верификация и калибровка математических моделей.

EXPERIMENTAL STUDIES OF THAWING HALO FOR VERIFICATION AND CALIBRATION OF FORECASTING MATHEMATICAL MODELS

Е.М. Makarycheva¹, V.I. Larionov², P.A. Novikov²

¹Sergeev Institute of Geoecology, Russian Academy of Sciences, Moscow
e-mail: emakarycheva@gmail.com

²Bauman Moscow State Technical University, Moscow
e-mail: lar@esrc.ru; novikov-p-a@bmstu.ru

The method for carrying out on-site investigations allowing one to establish main regularity of thermal interaction of the pipeline and the permafrost soil is presented here. The results of experimental studies can be used for verification and calibrating of predictability mathematical models. The method is approved on sites of the route of the main pipeline.

Keywords: pipeline, permafrost, thawing halo, verification and calibration of mathematical models.

Промышленное и транспортное освоение северных районов страны приводит к необходимости решения многочисленных теоретических и практических задач, связанных с изучением инженерно-геологического строения территории, пространственной неоднородности состава и свойств пород, а также характера их изменений в результате техногенного воздействия. Строительство в условиях вечной мерзлоты повышает требования не только к свойствам применяемых материалов, но и к разрабатываемым проектным решениям.

При проектировании, строительстве и эксплуатации тепловыделяющих трубопроводов большое значение имеет изучение процесса оттаивания многолетнемерзлых грунтов (ММГ), который тесно связан

с географическими и инженерно-геологическими условиями территории, а также степенью и характером влияния инженерного объекта. Недостаток вышеуказанной информации может привести к необоснованным проектным решениям и необходимости применения многочисленных дополнительных мероприятий. Развитие ореола оттаивания и последующая просадка грунта влекут за собой изменения планово-высотного положения трубопровода и возникновение аварийных ситуаций.

В литературе широко представлены математические постановки задач оттаивания ММГ и даны методы их решения. Некоторые методики¹ представляют собой инструмент прогнозирования процесса оттаивания и дают информацию о состоянии вмещающего трубопровод грунтового массива на протяжении длительного интервала времени. Вопрос верификации и калибровки прогнозных моделей решается с помощью экспериментальных полевых исследований.

Экспериментальное исследование ореолов оттаивания прилегающих к трубопроводу грунтов, возникающих вследствие природного и техногенного изменения температуры грунта, позволяет помимо оценки достоверности и точности результатов прогнозирования установить качественную картину взаимодействия трубопровода и грунта на участках ММГ, изучить пространственную изменчивость состава и свойств грунтов. Основными этапами такого исследования являются выбор участков трубопровода для выполнения исследований; сбор и анализ информации об участках проведения работ и характеристиках трубопроводной системы; выбор мест шурфовки; проведение полевых работ; подготовка заключения об итогах натурного обследования.

Выбор участков трубопровода для выполнения исследований.

В связи с тем, что основной целью проведения данного вида работ была верификация и калибровка прогнозной модели по расчету ореола оттаивания, выбор места проведения работ был ограничен рядом условий: места оборудования шурфов должны располагаться в сходных ландшафтных условиях с местами установки термоскважин, внутри которых находятся датчики измерения температуры грунта, и они должны быть репрезентативны, т.е. находиться в пределах ключевых ландшафтов, имеющих широкое распространение по трассе трубопровода.

¹Лисин Ю.В., Александров А.А., Ларионов В.И., Козлов М.А. Оценка планово-высотного положения трубопровода на участках с многолетнемерзлыми грунтами // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2012. – № 3. – С. 68–79.

В целях проверки корректного учета льда и высокольдистых отложений при прогнозировании дополнительным условием для выбора участков являлось наличие их признаков. Это обусловлено максимальным развитием ореола оттаивания и, как следствие, наибольшими величинами просадок.

Сбор и анализ информации об участках проведения работ и характеристиках трубопроводной системы. В результате сбора и анализа материалов предыдущих аэровизуальных, дистанционных и полевых работ, а также данных с ближайших метеостанций была получена информация о геолого-географических условиях исследуемых участков. Были определены свойства, строение и температурный режим распространенных в пределах участков грунтов, даны характеристики экзогенных геологических процессов и определены температурные характеристики трубопровода в пределах исследуемой территории.

Выбор и обоснование мест оборудования шурфов. На подготовительном этапе работ были подобраны космо- и аэрофотоснимки территории, топографические карты, анализ которых позволил оценить ландшафтную изменчивость исследуемой территории и наметить места оборудования шурфов в пределах ключевых ландшафтов. В целях определения влияния поверхностных вод на развитие ореола оттаивания часть шурфов была намечена на обводненных участках. При этом в комплекс работ включалось предварительное дренирование территории.

Работы по инструментальному измерению ореолов оттаивания проводились на двух участках трассы магистрального нефтепровода (табл. 1; рис. 1, см. 3-ю полосу обложки), подверженных термокарстовым процессам.

Проведение полевых работ. Во время этого этапа на каждом из участков проводились следующие виды работ²:

1. Ландшафтное описание территории, включающее описание форм рельефа, видового состава растительности; дренированности территории и характера стока; измерение глубины сезонно-талого и/или сезонно-мерзлого слоя; фиксация и описание обводненных участков, встреченных ледяных форм, проявлений экзогенных геологических процессов. Ландшафтное описание проводилось в пределах исследуемого участка по заранее выбранному маршруту и позволило определить оптимальное место оборудования шурфа, выявить факторы, влияющие на теплообмен, и оценить их роль в развитии процесса оттаивания.

²Для натурального обследования ореолов оттаивания полевые работы целесообразно проводить дважды в год — в периоды максимального промерзания (июнь) и максимального оттаивания грунтовых пород (октябрь).

Описание участков трассы трубопровода

Параметр	Участок	
	I	II
Сооружения в полосе участка	Трубопровод, вдольтрассовый проезд, линия электропередач	Трубопровод, вдольтрассовый проезд
Местоположение	Первая надпойменная терраса реки	Пойма реки
Особенности рельефа	Увлажненная низинно-равнинная поверхность с мелкобугристым рельефом	Ровная заболоченная поверхность
Растительность в полосе землеотвода	Травяной покров, состоящий из разнотравных луговых сообществ, осоки с отдельными редкостоящими кустарниками; проективное покрытие мха не превышает 20–40 %	Травяной покров, состоящий из осоки, разнотравных луговых сообществ; проективное покрытие мха до 80 %
Растительность за пределами полосы землеотвода	Смешанный лес	Марь
Инженерно-геологический разрез	Насыпные грунты, супеси, пески, суглинки, галечниковые и щебенистые грунты (в талом и мерзлом состоянии)	Насыпные грунты, супеси, пески, суглинки, галечниковые грунты (в талом и мерзлом состоянии)
Наличие слоя ММГ	Есть	Есть
Наличие полигонально-жильных льдов	Есть	Не обнаружены
Наличие термокарстовых форм	Есть	Есть
Причина образования термокарста	Хозяйственная деятельность человека (строительство трубопровода)	

2. Изучение характеристик термокарстовых явлений — размеров, формы, характера береговой линии и степени ее изрезанности. Полученные данные позволяют определить направление дальнейшего развития термокарстового процесса.

3. Оборудование шурфа с целью измерение температур пород по разрезу; определение и фиксация границ между мерзлыми и тальми породами; исследование строения и свойств грунта; измерение фактической температуры трубопровода.

В соответствии с поставленными задачами и требованиями техники безопасности предлагаются следующие характеристики шурфа: глубина шурфа должна позволить зафиксировать нижнюю границу ореола оттаивания; одна из поперечных трубопроводу стенок – вертикальная (для удобства измерения параметров ореола оттаивания); вторая и третья стенки параллельны оси трубопровода и располагаются на максимально допустимом расстоянии к боковой образующей трубопровода (не менее 4,0 м); четвертая стенка располагается перпендикулярно оси трубопровода на расстоянии не менее 2,5 м от первой вертикальной стенки. Последовательность действий по оборудованию шурфа:

1) уточнение при помощи контрольной шурфовки местоположения трубопровода, при необходимости – корректировка места разработки шурфа;

2) удаление почвенно-растительного покрова, перемещение его за пределы зоны проведения работ для сохранения его целостности и последующего восстановления после окончания проведения работ;

3) послойная разработка шурфа с остановками каждые 0,5–1,0 м в зависимости от литологической неоднородности разреза, с целью проведения температурных измерений. При этом в ходе разработки грунт сортируется по литологическим разностям и раскладывается по отдельным отвалам за пределами зоны проведения работ для восстановления естественного сложения толщи после окончания работ.

4) восстановление, при возможности, естественного сложения толщи и почвенно-растительного покрова обратной послойной засыпкой с уплотнением и укладкой почвенно-растительного покрова на поверхности с целью минимизации воздействия на окружающую среду.

При послойной разработке шурфа для измерения температуры грунта в вертикальной стенке шурфа устанавливаются термодатчики в точках, удаленных от трубопровода на расстояния 0,1; 0,5; 1,0; 2,0; 3,5 м. Указанный шаг измерений вблизи трубопровода позволяет оценить степень влияния трубопровода на температуру пород.

На расстоянии одного метра от боковой образующей трубопровода на глубине не менее 0,3 м в грунте располагается контрольный датчик, показания которого снимаются ежеминутно на протяжении всего периода измерений. Установка контрольного датчика позволяет оценить изменения температуры грунтов, возникающие при теплообмене с воздухом. Измерения с остальных датчиков снимаются однократно.

В ходе послойной разработки шурфа также проводится фиксация границ(ы) мерзлых и талых пород. Для этого определяются следующие показатели: наличие кристаллов льда, твердость грунтов и их температура.

Результаты измерений температуры³, координаты мест установки термодатчиков и границ(ы) талых и мерзлых пород заносятся в журнал, причем точки выполненных измерений привязываются к условной системе координат (УСК).

Также производится измерение температуры на поверхности трубопровода.

Измеряемые параметры и средства измерений представлены в табл. 2.

Таблица 2

Измеряемые параметры и средства измерений

Параметр	Наименование применяемого средства измерений	Предел основной погрешности
Температура на поверхности трубопровода	Термометр	Не более $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$
Температура грунта	Термометр	Не более $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$
Положение границы раздела талых и мерзлых пород относительно дневной поверхности	Тахеометр	2 мм на км хода
Координаты точек измерений в УСК	Тахеометр	2 мм на км хода
Дневная поверхность в УСК	Тахеометр	2 мм на км хода

После разработки шурфа до необходимой глубины проводится описание грунтового разреза с разделением его на инженерно-геологические элементы, включающее описание криогенных текстур и фиксацию ледяных включений, а также отбор проб на влажность, гранулометрический состав и плотность. По окончании полевых работ все отобранные образцы передаются в грунтовую лабораторию для дальнейшего анализа.

Результаты инструментально измеренных границ ореола оттаивания, сезонно-талых и сезонно-мерзлых слоев фиксируются на схеме с целью их последующего сравнения с расчетными, примеры представлены на рис. 2 и 3. Также на схеме отображаются точки измерения температур грунтов и местоположение трубопровода.

³При обработке результатов измерений необходимо учитывать растепление грунта, связанное с нарушением естественных условий и температурного режима при разработке шурфа. Показания датчиков, за исключением контрольного, пересчитываются с поправкой на растепление.

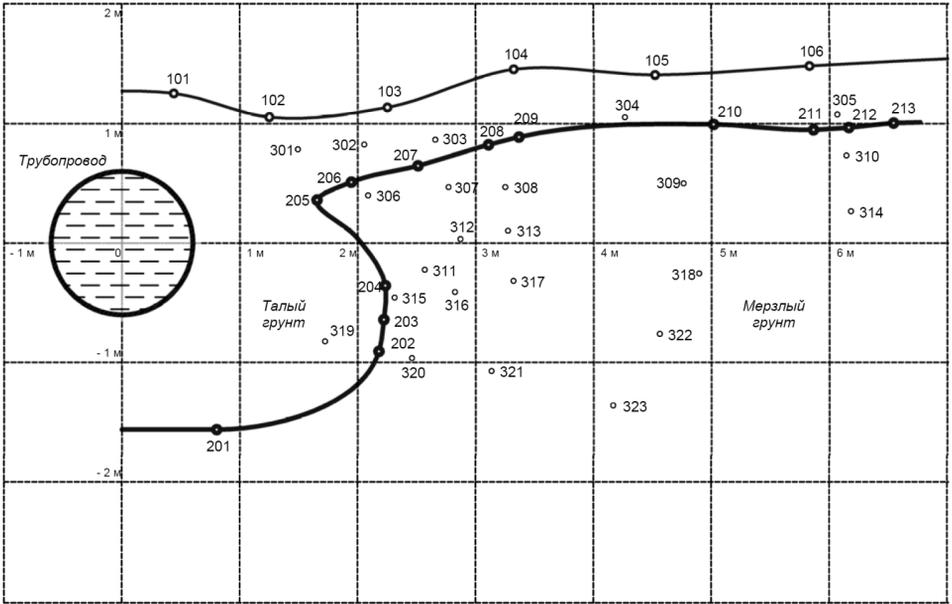


Рис. 2. Схема расположения точек измерений в стенке шурфа относительно трубопровода в период максимального промерзания грунтовых пород (июнь): 101–106 – дневная поверхность; 201–213 – граница ореола оттаивания; 301–323 – точки замеров температур грунта

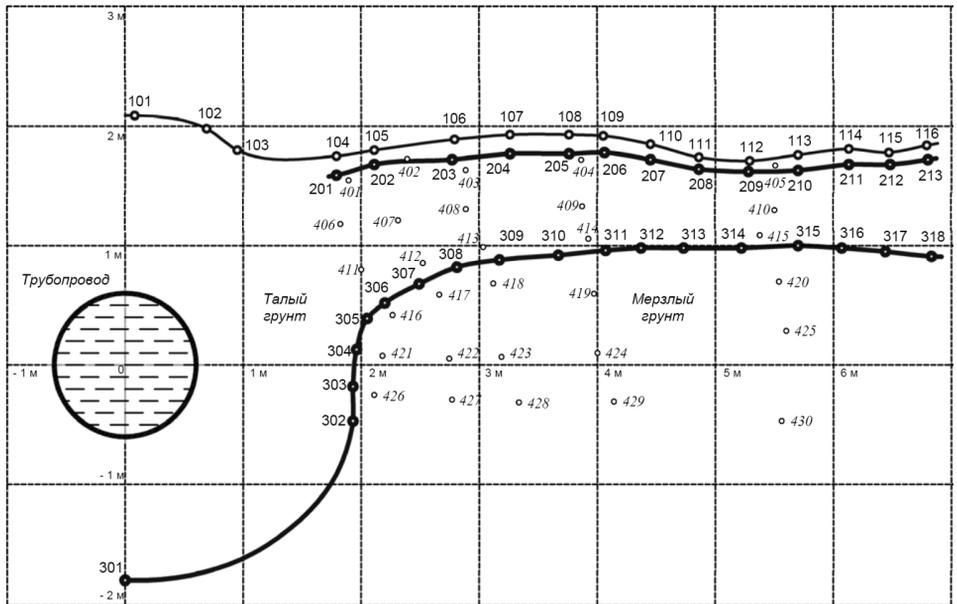


Рис. 3. Схема расположения точек измерений в стенке шурфа относительно трубопровода в период максимального оттаивания грунтовых пород (октябрь): 101–116 – дневная поверхность; 201–213 – граница сезонно-мерзлого слоя; 301–318 – граница ореола оттаивания; 401–430 – точки замеров температур грунта

Грунтовые работы позволяют определить фактическую границу ореола оттаивания с целью ее последующего сравнения с прогнозной, определить характер пространственной изменчивости строения, температуры, состава и свойств пород в пределах исследуемого участка, а также помогают оценить необходимую степень учета пространственной изменчивости грунтовых характеристик при прогнозировании процесса оттаивания.

Выводы. 1. Предложена методика экспериментального исследования ореола оттаивания.

2. Экспериментальное обследование ореола оттаивания способствует формированию реальной картины теплового взаимодействия трубопровода с грунтом на участках с ММГ и может быть использовано для верификации и калибровки прогнозных математических моделей по расчету ореола оттаивания и планово-высотного положения трубопровода.

3. Полученные данные позволяют оценить необходимую степень учета пространственной изменчивости грунтовых характеристик при разработке моделей развития ореола оттаивания.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках договора № 13.G25.31.0053 от 7 сентября 2010 года.

Статья поступила в редакцию 27.12.2012

Макарычева Елизавета Михайловна — младший научный сотрудник учреждения Российской академии наук Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева. Специализируется в области геологии, геокриологии, криогенных процессов.

E.M. Makarycheva — junior researcher of the Sergeev Institute of Geoecology of the Russian Academy of Sciences. Specializes in the field of geology, geocryology, cryogenic processes.

Ларионов Валерий Иванович — д-р техн. наук, профессор. Зам. директора по научной работе Научно-образовательного центра исследований экстремальных ситуаций МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 200 научных работ в области теории рисков и промышленной безопасности потенциально опасных объектов.

V.I. Larionov — D. Sc. (Eng.), professor, deputy director for scientific work of the Scientific and Educational Center of Study of Extreme Situations of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 200 publications in the field of theory of risks and industrial safety of potentially dangerous objects.

Новиков Павел Александрович — научный сотрудник Научно-образовательного центра исследований экстремальных ситуаций МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 10 научных работ в области промышленной безопасности и эксплуатации опасных производственных объектов.

P.A. Novikov — researcher of the Scientific and Educational Center of Study of Extreme Situations of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 10 publications in the field of industrial safety and exploitation of dangerous industrial objects.