

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В МЕРЗЛОМ ГРУНТЕ ВБЛИЗИ ПОДЗЕМНОГО ТРУБОПРОВОДА

**Б.В. Григорьев, П.Ю. Михайлов, А.Б. Шабаров**

*ФГБОУ ВПО «Тюменский государственный университет»,  
г. Тюмень*

*Рецензент д-р физ.-мат. наук, профессор А.А. Кислицын*

**Ключевые слова и фразы:** мерзлый грунт; незамерзшая вода; поля влажности и температуры; экспериментальная установка.

**Аннотация:** Описана экспериментальная установка и приведены результаты проведенного экспериментального исследования полей влажности и температуры в мерзлом грунте вблизи подземного трубопровода.

Напряженно-деформированное состояние подземного трубопровода во многом определяется силовым воздействием на него окружающего грунта. Формирование напряжений в грунте может быть вызвано морозным пучением. Определяющим фактором величины пучения является суммарная влажность грунта, изменению которой способствуют процессы миграции.

В настоящее время разработаны модели теплопереноса, позволяющие прогнозировать распределение температур и влажности в грунте. Однако проверить достоверность получаемых по расчетным моделям данных в реальных условиях не всегда представляется возможным, так как это влечет большие экономические затраты.

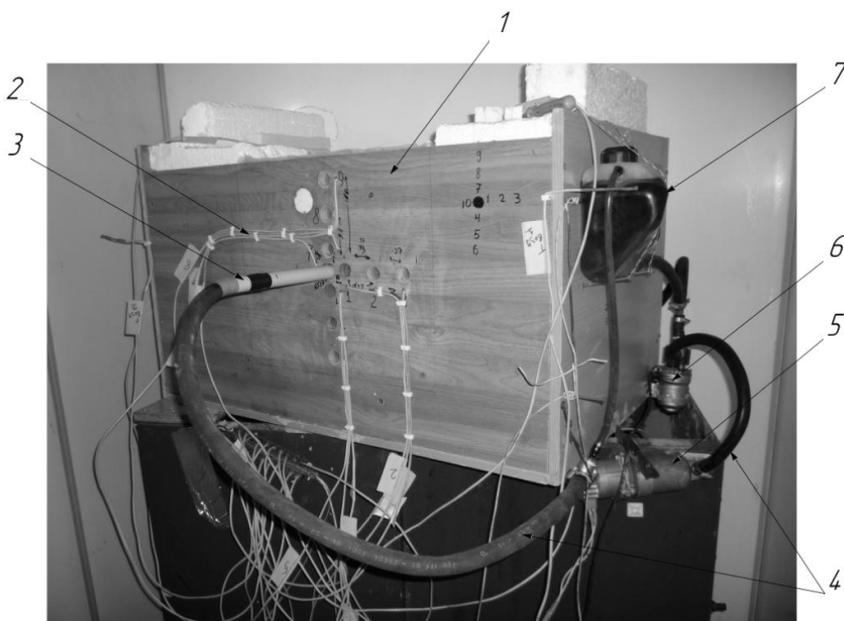
Рассмотрим автоматизированный стенд, позволяющий в лабораторных условиях проводить измерения нестационарных полей температуры и влажности грунта при различных температурных режимах работы модельного трубопровода.

Внешний вид экспериментального стенда представлен на рис. 1.

Основным элементом экспериментального стенда является прямоугольный лоток, расположенный в криокамере. Размер лотка составляет  $940 \times 615 \times 515$  мм.

---

Григорьев Борис Владимирович – научный сотрудник, e-mail: Raskatov\_@mail.ru; Михайлов Павел Юрьевич – научный сотрудник, e-mail: Pav8436@yandex.ru; Шабаров Александр Борисович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой механики многофазных систем, e-mail: TU3818@mail.ru, ФГБОУ ВПО «Тюменский государственный университет», г. Тюмень



**Рис. 1. Экспериментальный стенд:**

1 – лоток; 2 – датчики температуры; 3 – трубопровод; 4 – элементы циркуляционного контура; 5 – нагреватель; 6 – помпа; 7 – расширительный бак

Внутренняя поверхность стенок и дна лотка теплоизолирована пенопластом. Верхняя часть лотка оставлена открытой для свободного теплообмена между воздухом в криокамере и исследуемым грунтом.

В проведенном эксперименте, в качестве исследуемого грунта был выбран суглинок. Это сделано из следующих соображений: глина – мелкодисперсный грунт, диаметр частиц которого менее 0,005 мм. Будучи плотно уложенной в лоток, глина будет препятствовать движению флюида в любом направлении. Однако при этом ввиду малого диаметра частиц слагающих этот грунт, а следовательно и высокой удельной поверхности, глина содержит значительное количество незамерзшей воды, особенно в диапазоне температур от 0 до  $-4^{\circ}\text{C}$ . Песок – грунт, размеры порового пространства которого сопоставимы с диаметром частиц, данный тип грунта не препятствует движению влаги, однако, по причине наличия частиц с размером от 2 до 0,05 мм, содержание незамерзшей воды в нем наблюдается лишь в узком температурном интервале от 0 до  $-1^{\circ}\text{C}$ . Суглинок занимает промежуточное положение между этими двумя типами грунта, поэтому выбор был остановлен на нем. Это позволило, с одной стороны, увеличить проницаемость по сравнению с глиной, и в то же время повысить содержание незамерзшей воды относительно песка.

По центру на всю длину лотка устанавливался трубопровод, внешний диаметр которого 27 мм. Для циркуляции и подогрева теплоносителя, в качестве которого выбран тосол, был собран циркуляционный контур, позволяющий выбирать и поддерживать температуру теплоносителя.

Разработанная программа эксперимента включает следующие этапы.

На терморегуляторе криокамеры выставляется требуемое значение отрицательной температуры, теплообмен между грунтом и воздухом, со-

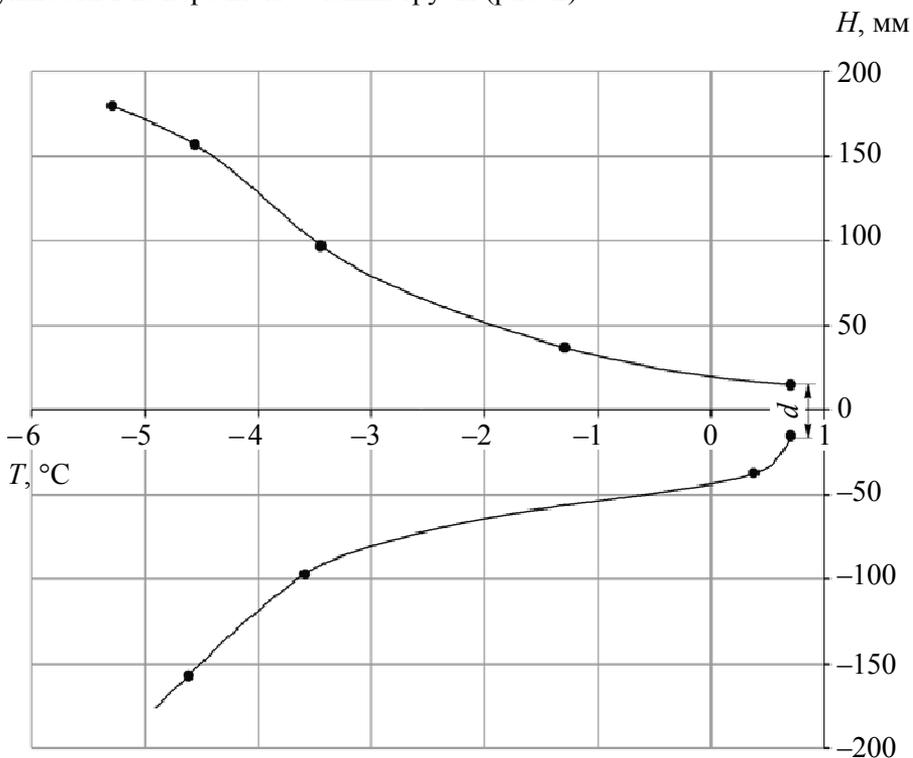
гласно описанному выше, осуществляется только через верхнюю часть лотка, что отражает реальный процесс замерзания грунта.

Замораживание грунта длится 170 ч, в течение которых фиксируются показания температуры по 15 датчикам. Когда разброс значений температуры по объему грунта не превышает  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , включают циркуляционный насос для перекачивания теплоносителя и нагреватель, тепловая мощность которого  $60\text{...}70\text{ Вт}$ .

Циркуляция осуществляется  $8\text{...}9\text{ ч}$ , в течение которых в грунте формируется поле влажности и температуры. Далее необходимо высверлить образцы грунта через заранее подготовленные отверстия в стенке лотка. Высверливание проводится алмазной коронкой диаметром  $25\text{ мм}$  и высотой  $30\text{ мм}$ . Образцы извлеченного грунта нумеруются и взвешиваются на лабораторных весах, после чего высушиваются в течение  $3\text{ ч}$  в сушильном шкафу. По результатам повторного взвешивания определяется вес сухих образцов и по разнице весов вычисляется суммарная влажность извлеченных образцов.

В описанном эксперименте суглинок замораживался до температуры  $(-8\pm 0,5)\text{ }^{\circ}\text{C}$ , после чего по циркуляционному контуру перекачивался теплоноситель с температурой  $3\text{...}5\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

По данным показаний датчиков были построены кривые распределения температур вдоль вертикальной и горизонтальной осей в плоскости поперечного сечения трубопровода. За начало координат взят центр окружности в поперечном сечении трубы (рис. 2).



**Рис. 2. Кривые распределения температуры в грунте:**

$H$  – линейный размер внутреннего пространства лотка (высота), мм;

$T$  – изменение температуры вдоль вертикальной оси над трубопроводом ( $H > 0$ ) и под трубопроводом ( $H < 0$ ),  $^{\circ}\text{C}$ ;  $d$  – линейный размер трубопровода по вертикали (диаметр), мм

Максимальные значения температуры для обеих кривых наблюдаются на границе контакта «грунт – труба». Из графика видно, что изменение температур относительно оси  $X$  неодинаково, так, вблизи нижней образующей трубопровода наблюдается зона повышенной температуры, заметно бóльшая, чем над трубой, с течением времени эта область увеличивается, при этом вид верхней кривой остается практически неизменным. Область с положительной температурой грунта формирует зону протаивания, рост которой наблюдается преимущественно под трубопроводом. Этот факт объясняется тем, что отвод тепла от грунта происходит с открытой поверхности, поэтому протаивание над трубой менее выражено, так как тепло от трубы, переданное части грунта, расположенной над ней, отводится через поверхность теплообмена с воздухом. В то время как снизу лоток ограничен дном с изоляцией, поэтому нет существенного оттока выделяемого с поверхности трубы тепла, тепло накапливается и, как следствие, повышается температура, что приводит к оттаиванию этой части грунта.

Используя ранее полученную экспериментальную кривую зависимости незамерзшей воды от температуры [1] (рис. 3), и утверждение что количество незамерзшей воды практически не зависит от суммарной влажности грунта (при условии, что влажность грунта больше его молекулярной влагоемкости) [2] можно получить кривые распределения влажности за счет незамерзшей воды (рис. 4). Используя любую точку  $(T; H)$  на кривой (см. рис. 2), значение температуры этой точки накладываем на кривую (см. рис. 3), откуда находим значение влажности  $W_n$ , соответствующее этой температуре, после этого полученная точка  $(W_n; H)$  переносится на график (см. рис. 4).

Как следует из рисунка 4, в большей части грунта влажность  $W_n$  крайне низкая, однако, вблизи трубопровода возникает резкий скачок влажности, особенно вблизи поверхности трубопровода, где грунт полностью оттаял (квадратные точки на графике), эта область под трубопроводом распространяется на расстояние, сопоставимое с диаметром – 25...30 мм, в то время как над ним – порядка 5...7 мм.

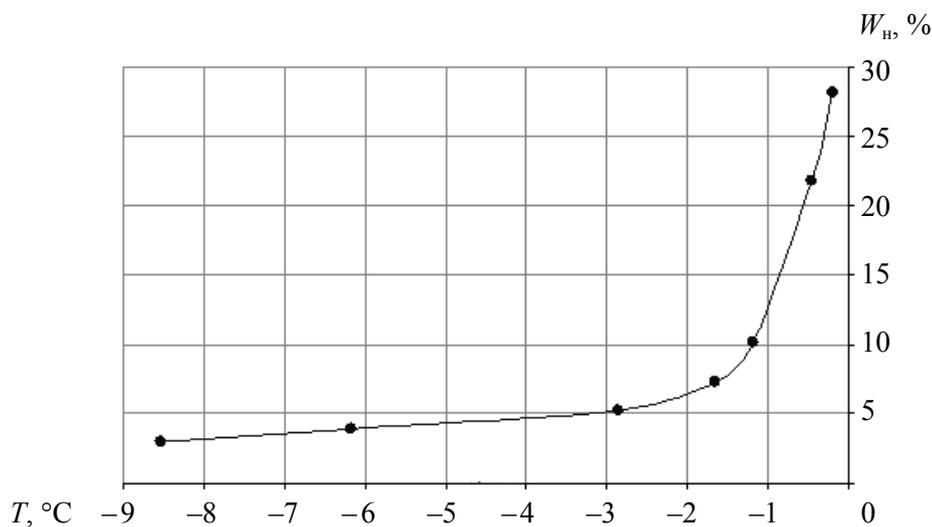
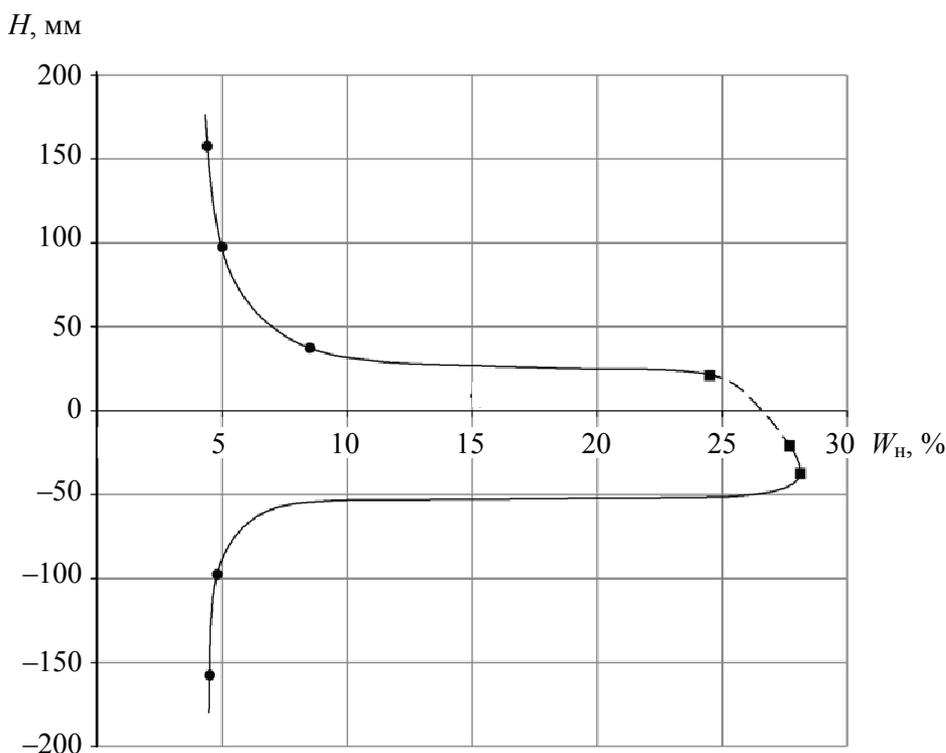


Рис. 3. Кривая зависимости незамерзшей воды от температуры



**Рис. 4.** Распределение влажности за счет незамерзшей воды в грунте, вдоль вертикальной оси

Что касается суммарной влажности, то по полученным в ходе высверливания образцам можно заключить, что в образце, высверленном на расстоянии 10 мм над трубой суммарная влажность составляет 20,10 %, в образце, изъятном на расстоянии 10 мм в горизонтальном направлении от трубы, влажность равна 23,09 %, а влажность образца, изъятого на расстоянии 10 мм под трубой равна 28,14 %. Это свидетельствует о постепенной миграции влаги под действием силы тяжести в зоне высокой влажности  $W_n$  в узкой области вокруг трубы. В зоне низких отрицательных температур (ниже  $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) миграции влаги, в рамках указанного интервала времени, не наблюдалось.

### Заключение

1. Создан экспериментальный стенд, позволяющий изучать процессы теплопереноса в мерзлом грунте, возникающие в условиях термического воздействия трубопровода.
2. Экспериментально исследованы взаимосвязанные поля температуры и влажности в мерзлом грунте вблизи подземного трубопровода.
3. Установлен несимметричный характер распределения влажности грунта вокруг трубопровода. В результате миграции, с течением времени, под трубопроводом влажность в пределах одного диаметра увеличивается в 1,4 раза, в условиях наружной температуры  $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ , трубопровода  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$  и отношения глубины залегания к диаметру трубопровода 10.

### *Список литературы*

1. Григорьев, Б.В. Экспериментальное исследование промерзания-оттаивания грунтов в неравновесных условиях / Б.В. Григорьев, А.Б. Шабаров // Вестн. Тюмен. гос. ун-та. – 2012. – № 4. – С. 53–60.
2. Цытович, Н.А. Механика мерзлых грунтов / Н.А. Цытович. – М. : Высшая школа, 1973. – 448 с.
3. Горелик, Я.Б. Физика и моделирование криогенных процессов в литосфере / Я.Б. Горелик, В.С. Колунин. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, фил. «Гео», 2002. – 317 с.
4. Гаврильев, Р.И. Теплофизические свойства компонентов природной среды в криолитозоне : справ. пособие / Р.И. Гаврильев. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2004. – 146 с.
5. Вакулин, А.А. Основы геокриологии / А.А. Вакулин. – Тюмень : Изд-во Тюм. гос. ун-та, 2011. – 220 с.
6. Руководство по определению физических, теплофизических и механических характеристик мерзлых грунтов / Произв. и науч.-исслед. ин-т по инженер. изысканиям в стр-ве Госстроя СССР ; Науч.-исслед. ин-т оснований и подземных сооружений Госстроя СССР. – М. : Стройиздат, 1973. – 191 с.
7. Ершов, Э.Д. Общая геокриология / Э.Д. Ершов. – М. : Недра, 1990. – 559 с.

---

### **Experimental Study of Heat and Mass Transfer in Frozen Ground near the Underground Pipeline**

**B.V. Grigoryev, P.Yu. Mikhaylov, A.B. Shabarov**

*Tyumen State University, Tyumen*

**Key words and phrases:** experimental system; frozen ground; temperature and humidity fields; unfrozen water.

**Abstract:** The paper describes the experimental system and results of the experimental study of humidity and temperature fields in the frozen ground around the pipeline.

---

© Б.В. Григорьев, П.Ю. Михайлов, А.Б. Шабаров, 2013