

УДК 624.131: 630\*864

*В. В. КОПТЯЕВ, А. Л. НЕВЗОРОВ*

Архангельский государственный технический университет

Коптяев Виктор Викторович родился в 1971 г., окончил в 1994 г. Архангельский лесотехнический институт, аспирант кафедры инженерной геологии, оснований и фундаментов Архангельского государственного технического университета. Имеет 7 печатных работ в области охраны геологической среды.



Невзоров Александр Леонидович родился в 1954 г., окончил в 1976 г. Архангельский лесотехнический институт, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой инженерной геологии, оснований и фундаментов Архангельского государственного технического университета, член Российского национального комитета по механике грунтов и фундаментостроению. Имеет более 70 печатных работ в области инженерной геологии и фундаментостроения.



## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ГИДРОЛИЗНОГО ЛИГНИНА

Приведены результаты лабораторных исследований теплопроводности гидролизного лигнина при различных значениях плотности, влажности и температуры.

The data of laboratory investigations on thermal conductivity of hydrolytic lignin are presented at different values of density, humidity and temperature.

Теплофизические свойства гидролизного лигнина пока мало изучены. В различных источниках [2, 7] имеются отрывочные данные о теплоемкости и теплоте сгорания этого материала. В работе В. В. Арбузова [1] приводятся значения теплопроводности плит, изготовленных из гидролизного лигнина. Зависимости теплопроводности лигнина от его плотности, влажности и температуры практически не изучены.

Цель нашей работы – лабораторные исследования зависимости теплопроводности гидролизного лигнина от указанных факторов.

В дисперсных материалах в общем случае существует три вида теплопереноса: излучение, конвекция и теплопроводность. Количество теплоты, переносимой излучением, не превышает 1 % от суммарного

теплового потока [8]. Экспериментальным путем было установлено, что при отрицательных температурах конвекция газа и влаги не оказывает существенного влияния на теплоперенос [3]. При положительных температурах необходимость учета влагопереноса возникает только в случае перепада температур  $\Delta t > 15^\circ\text{C}$  (288 К) [6]. Таким образом, в трехфазных дисперсных системах теплоперенос осуществляется преимущественно кондуктивным путем (теплопроводностью).

Методы определения теплофизических характеристик базируются на частных решениях уравнений теплопроводности для образцов простейшей формы (пластина, цилиндр). По временному фактору методы подразделяют на стационарные и нестационарные. Первые характеризуются постоянными во времени температурой или интенсивностью теплового потока, а для вторых характерно изменяющееся во времени температурное поле.

К нестационарным относятся разнообразные зондовые методы, которые используют как в лабораторных, так и в полевых условиях. Принцип действия зонда состоит в том, что он внедряется в грунт и нагревается на несколько градусов. Скорость нагревания характеризует теплопроводность исследуемого грунта. Преимуществами зондовых методов являются относительно небольшие размеры зондов, незначительное нарушение строения массива грунта, малое время измерения (5...10 мин).

Для определения теплопроводности лигнина мы использовали метод игольчатого датчика или цилиндрического зонда, впервые предложенный в Швеции [9]. Он основан на закономерностях изменения температурного поля в массиве грунта вокруг цилиндрического источника тепла постоянной мощности [6].

Конструкция зонда показана на рис. 1. Он состоит из медной трубки длиной 150 мм с наружным диаметром 4 мм (отношение длины к диаметру должно быть не менее 30). Внутри трубки размещен нагреватель из нихромовой проволоки и один из спаев термопары, который прикреплен к стенке трубки зонда посередине его длины. Термопара изготовлена фирмой «Sarlin», тип провода ТЗ0-2-305 2×0,25 Cu/CuNi. Внутреннее пространство трубки залито эпоксидной смолой.

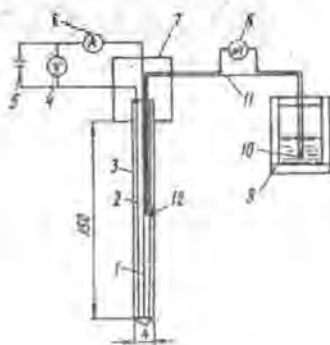


Рис. 1. Конструкция зонда: 1 – нагреватель; 2 – эпоксидная смола; 3 – медная трубка; 4 – вольтметр; 5 – источник питания; 6 – амперметр; 7 – корпус; 8 – милливольтметр; 9 – сосуд Дьюара; 10, 12 – спай термопары; 11 – термопара

Второй спай термопары находится в сосуде Дьюара, заполненном смесью воды со льдом. Для определения напряжения тока в термопаре использован цифровой вольтметр Ф 295. Нагреватель присоединен к источнику постоянного тока; для измерения напряжения и силы тока в нагревателе установлены вольтметр и амперметр.

Для тарировки термопары ее погружали в 19,7 %-й раствор хлорида калия, замерзающий при температуре  $-11,7\text{ }^{\circ}\text{C}$  (261,3 К). Температура раствора изменялась от  $-10\text{ }^{\circ}$  (263 К) до  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  (293 К) со скоростью  $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$  (273,3 К) в 1 мин, в ходе тарировки его перемешивали магнитной мешалкой.

Зонд калибровали с помощью веществ с известным коэффициентом теплопроводности: хлопчатобумажной ваты, парафина, глицерина, льда. По результатам тарировки определяли поправочные коэффициенты.

Для определения теплопроводности зонд вдавливали в массив лигнина или в заранее подготовленный образец (диаметром не менее 60 мм) и выдерживали в течение 3...4 ч при заданной температуре. Затем одновременно включали нагреватель и секундомер. Опыт длился обычно 9...11 мин; через каждые 30...60 с записывали показания измерительных приборов. Силу тока в нагревателе регулировали таким образом, чтобы температура зонда не повышалась более чем на  $3...5\text{ }^{\circ}\text{C}$  (276...278 К).

По результатам опыта строили график в полулогарифмических координатах, где по оси абсцисс откладывали значения времени ( $\ln t$ ), а по оси ординат – температуру ( $T$ ). Полученную зависимость аппроксимировали прямой линией (рис. 2), на которой выбирали две точки с координатами  $t_A, T_A; t_B, T_B$ . Коэффициент теплопроводности  $\chi$  рассчитывали по формуле [9]

$$\chi = \frac{Q_{\text{нагр}} (\ln t_B - \ln t_A)}{4\pi(T_B - T_A)} \quad (1)$$

где  $Q_{\text{нагр}}$  – мощность нагревателя, Вт/м;

$T_A, T_B$  – температура для моментов времени  $t_A, t_B$ .

Ниже в качестве примера приведены табл. 1 и график расчета коэффициента теплопроводности лигнина (все расчеты выполнены с помощью электронных таблиц MS Excel).

Исходные свойства образца: влажность 1,4 (доли ед.); плотность  $0,61\text{ г/см}^3$ ; температура  $14,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  (287,2 К). Характеристики нагревательного элемента в зонде: напряжение  $0,69\text{ В}$ ; сила тока  $0,51\text{ А}$ ; сопротивление  $1,35\text{ Ом}$ ; удельная мощность нагревателя  $2,82\text{ Вт/м}$ . Параметры термопары:  $273,2\text{ К}$  – температура спаев, погруженного в сосуд Дьюара;  $T$  – температура спаев, расположенного в зонде.

По приведенным данным коэффициент теплопроводности составил  $0,13\text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ .

Таблица 1

$t, c$	$\ln t$	$T, ^\circ C$	$T, K$
1	0	14,20	287,2
60(A)	4,09	16,45	289,45
120	4,79	17,70	290,7
180	5,19	18,20	291,2
240	5,48	18,70	291,7
300	5,70	19,20	292,2
360	5,89	19,45	292,45
420	6,04	19,70	292,7
480	6,17	19,95	292,95
540(Б)	6,29	20,20	293,2
600	6,40	20,20	293,2

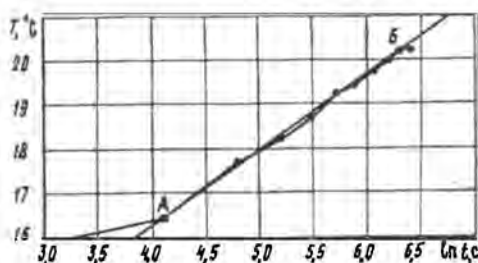


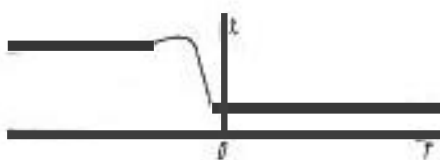
Рис. 2. График для определения коэффициента теплопроводности

Материалом исследований служил гидролизный лигнин АО «Онежский гидролизный завод» и АО «Архангельский гидролизный завод». Теплопроводность лигнина испытывали при различных значениях его плотности, влажности и температуры. Пределы изменения плотности лигнина – от рыхлого до максимально уплотненного, влажности – от абс. сухого до водонасыщенного, температуры – от +20 (293 К) до -10 °С (263 К). Для каждого значения влажности изготавливали по три образца разной плотности, которые испытывали при различной температуре с трехкратной повторностью (всего 60 образцов).

Теплопроводность лигнина при отрицательной температуре определяли в морозильной камере. Все соединительные провода термопары и нагревателя выводили наружу и подключали к измерительным приборам. Для стабилизации температуры воздуха и образца грунта внутри морозильной камеры требовалось 2-3 сут.

Процесс изменения теплопроводности влажных дисперсных пород в цикле промерзания – оттаивания обычно выражают кривой  $\chi = \chi(T)$  [4], которая представлена на рис 3.

Рис. 3. Характер зависимости коэффициента теплопроводности от температуры



Зависимость коэффициента теплопроводности от температуры в области положительных температур имеет обычно линейный характер. При замерзании воды в порах грунта образуются кристаллы льда, что вызывает резкое увеличение теплопроводности. При дальнейшем понижении температуры происходит небольшое уменьшение и стабилизация коэффициента теплопроводности.

Аналогичные кривые были получены нами для гидролизного лигнина (рис. 4), где указана плотность образцов лигнина в сухом состоянии ( $\rho_d$ ):

$$\rho_d = \frac{\rho}{1 + w}, \quad (2)$$

где  $\rho$ ,  $w$  – соответственно плотность и влажность лигнина.

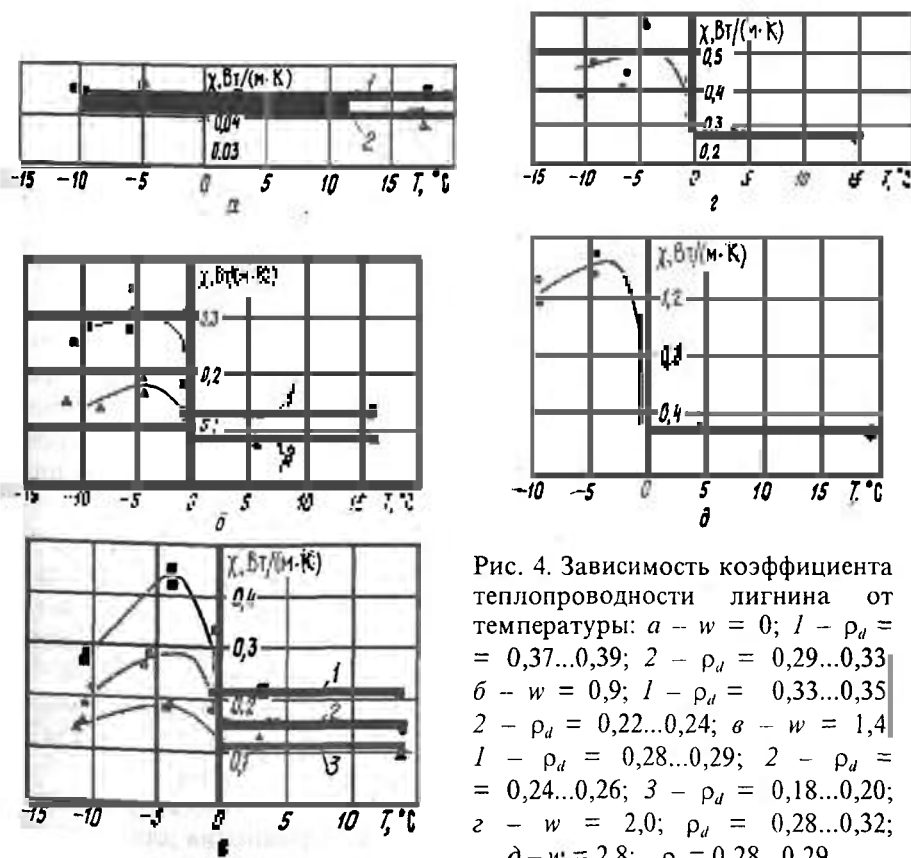


Рис. 4. Зависимость коэффициента теплопроводности лигнина от температуры: а –  $w = 0$ ;  $1 - \rho_d = 0,37...0,39$ ;  $2 - \rho_d = 0,29...0,33$ ; б –  $w = 0,9$ ;  $1 - \rho_d = 0,33...0,35$ ;  $2 - \rho_d = 0,22...0,24$ ; в –  $w = 1,4$ ;  $1 - \rho_d = 0,28...0,29$ ;  $2 - \rho_d = 0,24...0,26$ ;  $3 - \rho_d = 0,18...0,20$ ; г –  $w = 2,0$ ;  $\rho_d = 0,28...0,32$ ; д –  $w = 2,8$ ;  $\rho_d = 0,28...0,29$

Эта характеристика не зависит от влажности и обычно используется в грунтоведении для описания плотности сложения грунтов.

Коэффициент теплопроводности сухого гидролизного лигнина (рис. 4) при положительных и отрицательных температурах составляет 0,040...0,045 Вт/(м·К), что соответствует теплопроводности качественных теплоизоляционных материалов (таких как пенополистирол, минеральная вата и т. п.). Поэтому защищенный от увлажнения лигнин можно использовать в качестве теплоизоляции не только малозаглубленных фундаментов и трубопроводов [5], но и в конструкциях стен.

На тепловой режим в строительных конструкциях большое влияние оказывает влажность теплоизоляции. Рассмотрим зависимость теплопроводности лигнина от его влажности для положительной и отрицательной температур при постоянной плотности  $\rho_d = 0,25...0,32$  г/см<sup>3</sup> (рис. 5). Такие значения достигаются обычно при уплотнении лигнина в производственных условиях [4].

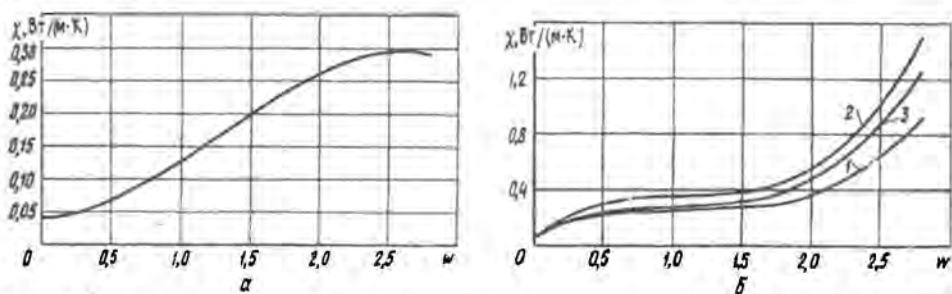


Рис. 5. Зависимость коэффициента теплопроводности от влажности лигнина: а – при температуре +5...20 °С; б – при температуре -2...0 (1); -5 ± 1 (2) и -10 ± 1 °С (3)

Увеличение влажности лигнина даже до полного водонасыщения при положительной температуре (рис. 5, а) не вызывает критического увеличения коэффициента теплопроводности, значение которого не превышает 0,30...0,35 Вт/(м·К), что соответствует требованиям для теплоизоляционных материалов.

При отрицательных температурах (рис. 5, б) критическое увеличение теплопроводности лигнина наблюдается при влажности больше 2, когда степень заполнения пор водой превышает 70 %. В этом случае коэффициент теплопроводности лигнина приближается к значениям, характерным для минеральных материалов, например грунтов. Таким образом, если в процессе эксплуатации допускается промораживание лигнина, следует предусматривать специальные мероприятия для защиты его от увлажнения.

Графики на рис. 5 аппроксимируются кубическим уравнением вида  $\chi = aw^3 + bw^2 + cw + d$ . Коэффициенты уравнения для разных температур приведены в табл. 2.

Таблица 2

Температура		Уравнение	Коэффициент корреляции
°С	К		
5...20	278...293	$\chi = -0,027w^3 + 0,105 w^2 + 0,009 w + 0,041$	0,99
-2...0	271...273	$\chi = 0,137w^3 - 0,464 w^2 + 0,539 w + 0,041$	0,99
-5 ± 1	268 ± 1	$\chi = 0,217w^3 - 0,710 w^2 + 0,806 w + 0,038$	0,98
-10 ± 1	263 ± 1	$\chi = 0,165w^3 - 0,515 w^2 + 0,581 w + 0,045$	0,99

Полученные зависимости (рис. 4, 5, табл. 2) можно применять для расчета коэффициента теплопроводности гидролизного лигнина, используемого в качестве засыпной теплоизоляции фундаментов, трубопроводов, в конструкциях автомобильных дорог и т. п.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Арбузов В.В. Композиционные материалы из лигнинных веществ. - М.: Экология, 1991. - 209 с. [2]. Безотходное производство в гидролизной промышленности / А.З. Евилевич, Е.И. Ахмина, М.Н. Раскин и др. - М.: Лесн. пром-сть, 1982. - 182 с. [3]. Ершов Э.Д. Влагоперенос и криогенные текстуры в дисперсных породах. - М., 1979. - 248 с. [4]. Коптяев В.В., Невзоров А.Л., Козмин Д.Д. Оценка возможности использования гидролизного лигнина в строительстве, как грунтового материала: Тез. докл. науч. конф., Ломоносовские чтения. Ч. 2. - Северодвинск, 1996. - С. 6. [5]. Коптяев В.В., Невзоров А.Л., Конюхов А.В. Использование гидролизного лигнина для теплоизоляции малозаглубленных фундаментов и трубопроводов // Проблемы развития строительного комплекса в условиях становления рыночных отношений: Матер. Междунар. науч.-техн. конф. - Архангельск, 1997. - С. 23. [6]. Теплофизические свойства горных пород / Под ред. Э. Д. Ершова. - М.: Изд-во МГУ, 1984. - 204 с. [7]. Чудаков М.И. Промышленное использование лигнина. - М.: Гослесбумиздат, 1962. - 200 с. [8]. Чудновский А.Ф. Теплофизические характеристики дисперсных материалов. - М., 1962. - 255 с. [9]. Sundberg J. Thermal properties of soil and rocks // Sweden Geotechnical Institute, report № 35. -1988. - P. 65.

Поступила 24 декабря 1996 г.