

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Палеев Д.Ю., Лукашов О.Ю. Программа расчета вентиляционных режимов в шахтах и рудниках // Горная промышленность. – 2007. – № 6 (76). – С. 20-23.
2. Математическое моделирование горения и взрыва высокоэнергетических систем / под ред. И.М. Васенина. – Томск: Изд-во Томск. ун-та, 2006. – 322 с.
3. Палеев Д.Ю. Необходимость разработки газодинамического метода и программного комплекса для расчёта нормального и аварийного проветривания угольных шахт при взрывах метана и угольной пыли в нестационарной постановке // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2024. – № 10. – С. 249-257.
4. Ващилов В.В. Разработка газодинамической модели и метода расчета нестационарных режимов проветривания угольных шахт: дис. ... канд. техн. наук. 25.00.20 / Ващилов Валерий Валерьевич. – Кемерово, 2010. – 126 с.: ил.
5. Ушаков К.З., Бурчаков А.С., Медведев И.И. Рудничная аэрология. – М.: Недра, 1978. – 440 с.: ил.
6. Палеев Д.Ю., Васенин И.М., Костеренко В.Н., Шрагер Э.Р., Крайнов А.Ю., Лукашов О.Ю., Руденко Ю.Ф. Ударные волны при взрывах в угольных шахтах. – М.: Издательство «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2011. – 312 с.: ил.
7. Численное решение многомерных задач газовой динамики / под ред. С.К. Годунова. – М.: Наука, 1976. – 400 с.: ил.

УДК 622.253.3

DOI:10.7242/echo.2024.3.12

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДВУХ МОДЕЛЕЙ
ПРИ ОПИСАНИИ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ
КОЛИЧЕСТВА НЕЗАМЕРЗШЕЙ ВОДЫ В ГРУНТАХ**

М.А. Семин, С.А. Бублик
Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: При теплотехническом расчёте ледопородных ограждений, формируемых вокруг строящихся подземных сооружений, одним из ключевых процессов является фазовое превращение поровой воды в лёд. Корректный учёт этого процесса во многом зависит от того, насколько точно и детализированно задана зависимость количества незамёрзшей воды от температуры. В статье рассмотрены две наиболее популярные модели (van Genuchten-Mualem и Brooks-Corey), описывающие температурную зависимость количества незамёрзшей воды в замораживаемых грунтах и используемые при проектировании подземных сооружений. На основе анализа показано, что модель van Genuchten-Mualem лучше описывает поведение незамёрзшей воды, в то время как для песков обе модели дают сопоставимые результаты.

Ключевые слова: искусственное замораживания грунтов, ледопородное ограждение, количество незамёрзшей воды.

При строительстве подземных сооружений в неустойчивых и обводнённых грунтах и породах применяются специальные способы. Одним из наиболее распространённых является искусственное замораживание грунтов. При проходке стволов калийных рудников это, как правило, единственный возможный способ [1].

Проектирование замораживания грунтов требует выполнения теплотехнического расчёта ледопородного ограждения (ЛПО), на основании которого определяются характеристики замораживающей станции и время формирования ЛПО необходимой толщины вокруг горной выработки. Ключевым физическим процессом, который необходимо учитывать при теплотехническом расчёте, является фазовое превращение поровой воды в лёд. Скрытая теплота кристаллизации поровой воды, выделяющаяся при образовании ЛПО, сравнима с теплотой охлаждения сухого скелета пород от начальной температуры до температуры формирования прочного ЛПО [2].

Однако моделирование теплопереноса в замораживаемых грунтах осложняется тем, что фазовый переход воды в лёд происходит не при фиксированной температуре, а в диапазоне температур. Для некоторых типов грунтов (глины, суглинки) этот диапазон температур может быть довольно широким, вследствие чего даже при проектных температурах замораживания значительная часть поровой воды (обычно связанной) может оставаться в жидком состоянии.

Этот эффект необходимо учитывать для корректного моделирования теплопереноса в замораживаемых грунтах. По этой причине при разработке исходных данных для проектов замораживания проводят лабораторные исследования содержания незамёрзшей воды в грунтах при различных отрицательных температурах. Полученные экспериментальные данные обычно аппроксимируются аналитическими функциями, отражающими температурную зависимость количества незамёрзшей воды.

Иногда исследователи переходят от размерной физической характеристики (количества незамёрзшей воды) к безразмерному показателю – влагонасыщенности [3], который вычисляется как отношение количества незамёрзшей воды при выбранной температуре к начальному количеству незамёрзшей воды при положительной температуре.

Зависимость влагонасыщенности замораживаемого грунта от отрицательной температуры чаще всего описывается в рамках модели van Genuchten-Mualem [4, 5]

$$\chi(T) = \chi_{res} + \left[1 + \left(\frac{T_0 - T}{\omega} \right)^{\frac{1}{1-m}} \right]^{-m}, \quad (1)$$

либо в рамках модели Brooks-Corey [6].

$$\chi(T) = \chi_{res} + \left(\frac{T_0 - T}{\omega} \right)^{-\lambda}. \quad (2)$$

Здесь ω , m и λ – параметры моделей, T_0 – температура замораживания поровой воды; χ_{res} – остаточная влагонасыщенность.

По своему физическому смыслу параметр ω является характерной температурой охлаждения, связанной с наиболее часто встречающимся радиусом пор R_{ch} , а m – индекс, указывающий распределение радиусов пор вокруг R_{ch} . Параметр λ в модели (2) характеризует наклон кривой $\chi(T)$.

Традиционно для описания замораживаемых влажных грунтов с помощью моделей (1) и (2) влагонасыщенность χ записывается не в терминах температуры, а в терминах матричных потенциалов или фазовых давлений. Однако в [7] показано, что разница фазовых давлений может быть выражена через разницу между температурой замерзания поровой воды и фактической температурой грунта.

Помимо формул (1) и (2) иногда применяются экспоненциальные зависимости [8, 9]. Однако они имеют ряд особенностей, из-за которых их применение к искусственно замораживаемым грунтам при температурах -20°C и ниже приводит к рассогласованию с данными измерений.

Цель настоящего исследования заключается в сравнительном анализе формул (1) и (2) с точки зрения точности аппроксимации экспериментально измеренных значений количества незамёрзшей воды при различных температурах.

Для исследования температурной зависимости остаточной влажности замораживаемых грунтов было рассмотрено 12 образцов пород (6 образцов глины и 6 образ-

цов песка). Керновый материал был отобран из геологоразведочных скважин на различных глубинах в интервале замораживаемых пород на участке строительства стволов рудника Нежинского ГОКа. Основные характеристики образцов сведены в таблицу.

Таблица

Основные характеристики исследуемых образцов грунта

Песок			Глина		
№ образца	Начальная влажность, кг/кг	Глубина, м	№ образца	Начальная влажность, кг/кг	Глубина, м
1	0,12	15,0	1	0,35	62,0
2	0,15	23,0	2	0,36	86,0
3	0,15	32,4	3	0,36	132,0
4	0,12	35,0	4	0,22	146,0
5	0,19	71,5	5	0,33	157,0
6	0,24	73,0	6	0,26	160,5

Экспериментальные данные по количеству незамёрзшей воды в рассмотренных образцах пород при девяти различных температурах в интервале от $+10$ до -20°C взяты из [10, 11]. Измерения производилось в лабораторных условиях с помощью калориметрической установки. Далее, в рамках настоящего исследования полученные экспериментальные точки аппроксимировались с помощью формул (1) и (2). Параметры формулы (1) и (2) подбирались с помощью метода наименьших квадратов. Вычисления проводились в лицензионной программе Wolfram Mathematica 10.

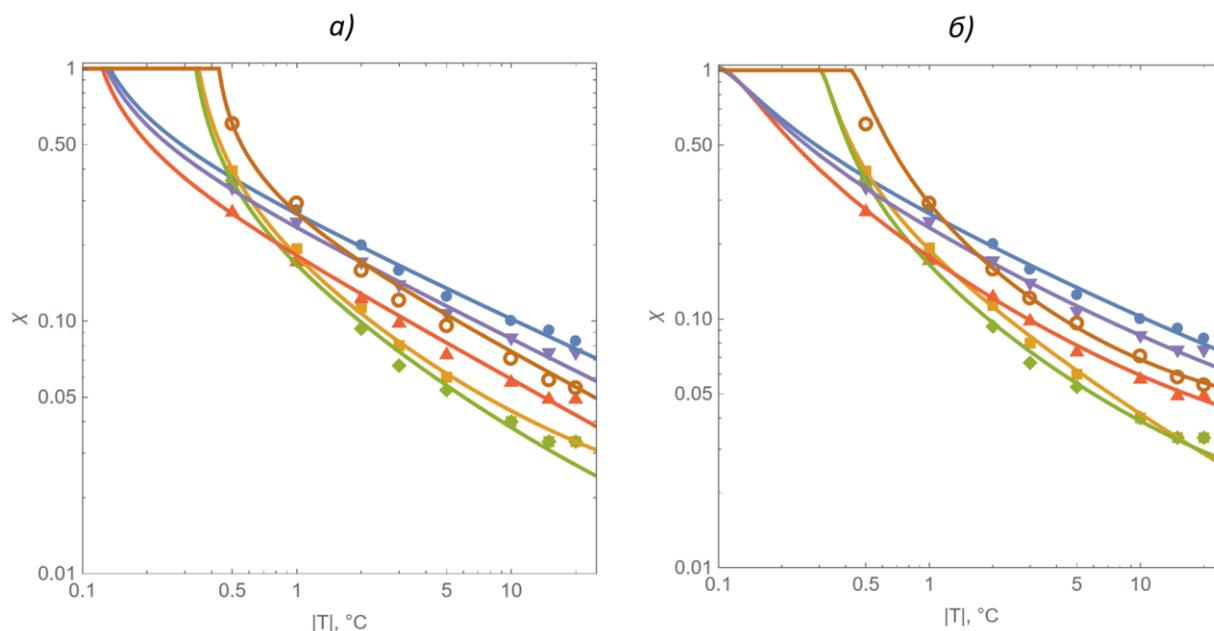


Рис. 1. Зависимости влагонасыщенности замораживаемых образцов песка от модуля температуры: а) модель Brooks-Corey, б) модель van Genuchten-Mualem

На рисунке 1 проведено сравнение экспериментально измеренных значений влагонасыщенности и аппроксимирующих зависимостей (1) и (2) для образцов песка. По оси x отмечено абсолютное значение температуры. На рисунке 2 сделан такой же анализ для образцов глины. В целом из рисунков видно, что обе зависимости с приемлемой точностью описывают данные экспериментальных измерений. Для большей части исследуемых образцов пород зависимости на рисунках 1-2 в логарифмических осях имеют линейный вид – это указывает на степенной характер зависимости влагонасыщенности от температуры. Тем не менее, для некоторых образцов вблизи температуры заморзания (около -1°C) линейный закон искажается.

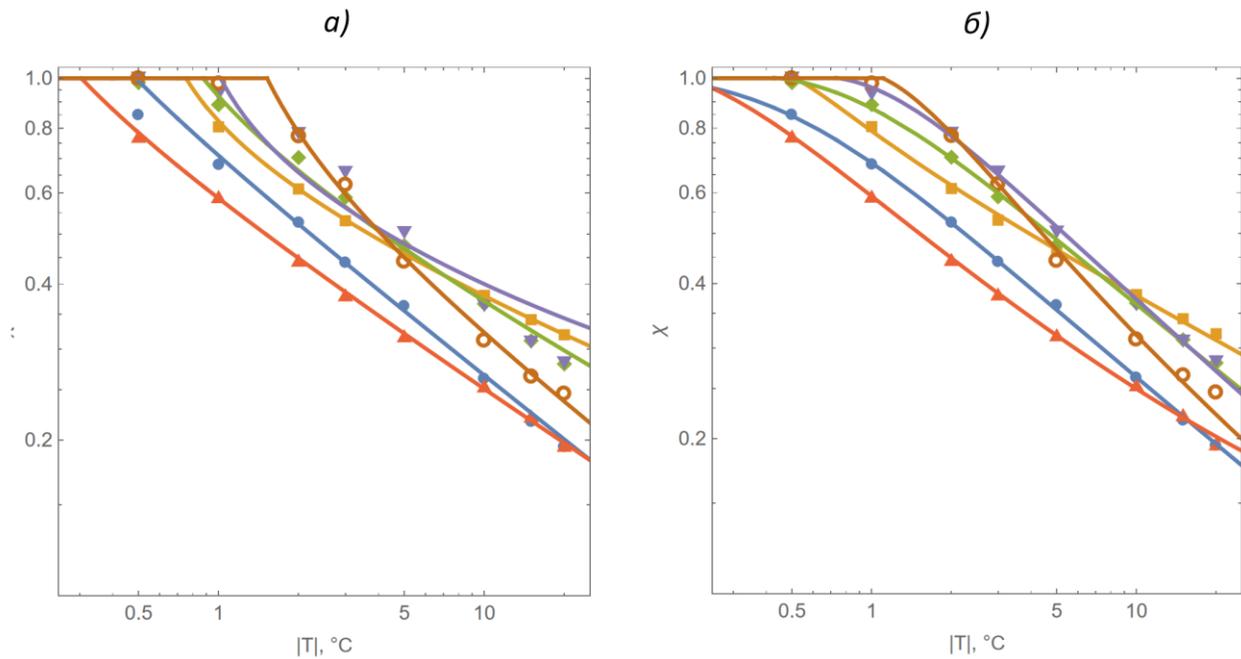


Рис. 2. Зависимости влагонасыщенности замораживаемых образцов глины от модуля температуры: а) модель Brooks-Corey, б) модель van Genuchten-Mualem

Для глины погрешность аппроксимации в среднем оказывается немного выше, чем для песка. Это также видно из сравнительного анализа ошибок аппроксимации измеренных данных в рамках каждой из моделей, проведённого на рисунке 3. В качестве количественных индикаторов использованы среднее абсолютное и среднеквадратическое отклонения:

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_i - y_i^*|, \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - y_i^*)^2}, \quad (4)$$

где N – количество точек, y_i^* – измеренное значение, y_i – значение, предсказанное с помощью формул (1) или (2).

Для большинства образцов глины наибольшая погрешность наблюдается при применении модели Brooks-Corey (2). Однако для шестого образца глины (крайний справа столбец на рисунках 3а и 3б) интегральная погрешность модели (1) оказывается выше, чем у модели (2). Это, вероятно, связано с недостаточной плотностью эксперименталь-

ных точек в диапазоне температур, близком к точке замерзания поровой воды. На рисунке 2 видно, что формула (1) лучше описывает плавное снижение количества незамёрзшей воды, характерное для глин при переходе через область начала кристаллизации поровой воды. В то же время в модели (2) наблюдается резкий скачок производной $d\chi/dT$ в точке, соответствующей началу кристаллизации воды. Это резкое изменение больше характерно для песков, которые содержат относительно большое количество гравитационной воды.

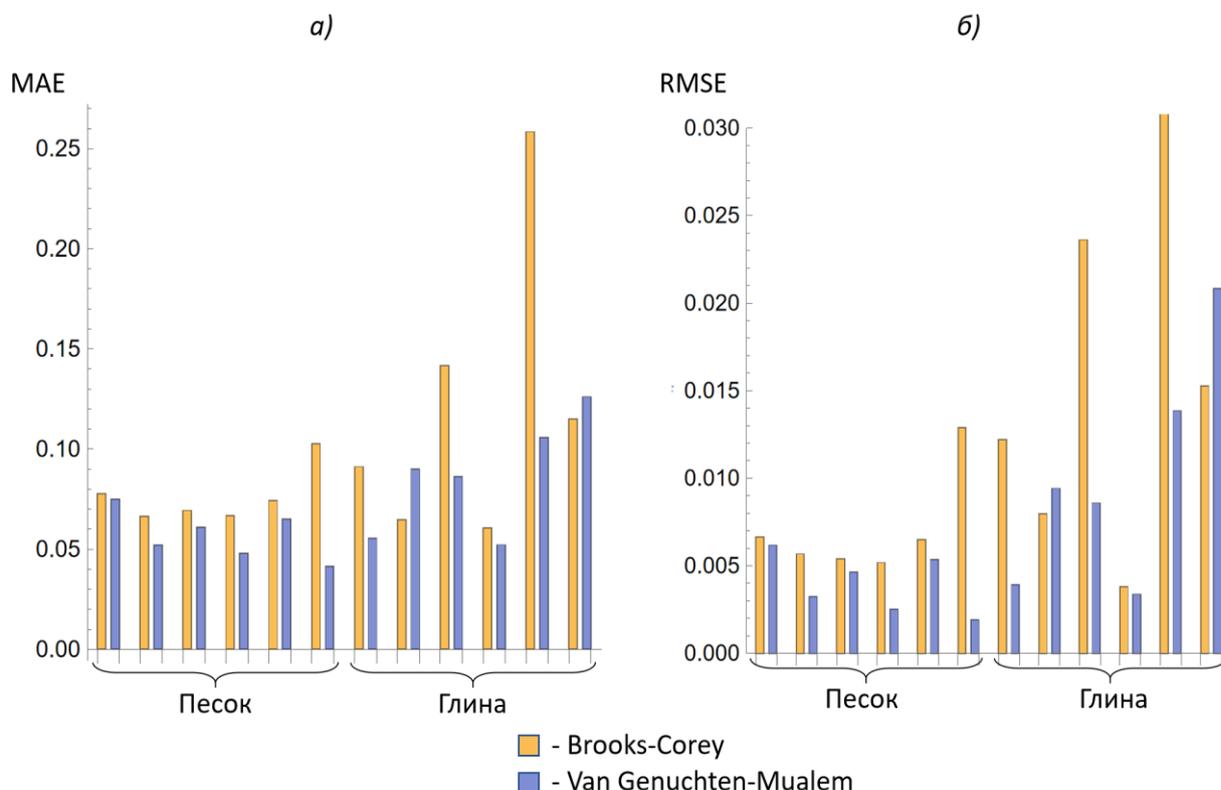


Рис. 3. Средние абсолютные (а) и среднеквадратические (б) ошибки аппроксимирующих выражений влагонасыщенности в рамках моделей Brooks-Corey (2) и van Genuchten-Mualem (1) для исследованных образцов грунта

Основное различие между формулами (1) и (2) заключается в степени плавности снижения функции $\chi(T)$ при переходе в область температур ниже точки замерзания. При этом на низких температурах (-5°C и ниже) значимых различий в характере уменьшения влагонасыщенности между этими формулами нет.

В целом проведённый анализ показывает, что обе формулы (1) и (2) приемлемо описывают температурную зависимость количества незамёрзшей воды для песков (при этом модель van Genuchten-Mualem демонстрирует несколько меньшую ошибку). Однако для глин предпочтительнее оказывается модель van Genuchten-Mualem. Это логично, поскольку степенные показатели в (1) подобраны таким образом, чтобы соответствовать теории Муалема, которая описывает относительную проницаемость грунтов. Теория Муалема лучше всего подходит для грунтов с мелкой и средней текстурой (таких как глины, илы и суглинки), которые обладают однородной и чётко выраженной пористой структурой.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания (рег. номер НИОКТР:122030100425-6).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Semin M., Golovaty I., Levin L., Pugin A. Enhancing efficiency in the control of artificial ground freezing for shaft construction: A case study of the Darasinsky potash mine // Cleaner Engineering and technology. – 2024. – V. 18, номер статьи 100710. – DOI: 10.1016/j.clet.2023.100710.
2. Трупаков Н.Г. Замораживание горных пород при проходке стволов. – М.: Углетехиздат, 1954. – 896 с.: ил.
3. Alzoubi M.A., Xu M., Hassani F.P., Poncet S., Sasmito A.P. Artificial ground freezing: A review of thermal and hydraulic aspects // Tunnelling and Underground Space Technology. – 2020. – V. 104. – Статья № 103534. – DOI: 10.1016/j.tust.2020.103534.
4. Van Genuchten M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils I // Soil science society of America journal. – 1980. – V. 44, №. 5. – С. 892-898. – DOI: 10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x.
5. Mualem Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media // Water resources research. – 1976. – V. 12, №. 3. – С. 513-522.
6. Brooks R.H., Corey A.T. Hydraulic properties of porous media. Hydrological Paper 3 / Colorado State University, Fort Collins. – Colorado, 1964. – P. 22-27.
7. Zhou M.M., Meschke G. A three-phase thermo-hydro-mechanical finite element model for freezing soils // International journal for numerical and analytical methods in geomechanics. – 2013. – V. 37, №. 18. – P. 3173-3193.
8. Lunardini V.J. Freezing of soil with an unfrozen water content and variable thermal properties // US Army Corps of Engineers, Cold Regions Research & Engineering Laboratory. – 1988. – V. 88, №. 2.
9. McKenzie J.M., Voss C. I., Siegel D. I. Groundwater flow with energy transport and water-ice phase change: Numerical simulations, benchmarks, and application to freezing in peat bogs // Advances in water resources. – 2007. – V. 30, №. 4. – P. 966-983.
10. Паршаков О.С. Разработка автоматизированной системы термометрического контроля ледопородных ограждений: дис. ...к.т.н.; 25.00.20 / Паршаков Олег Сергеевич. – Пермь, 2020. – 140 с.
11. Строительство горно-обогатительного комплекса мощностью от 1.1 до 2.0 млн. тонн хлорида калия в год на сырьевой базе Нежинского (восточная часть) участка Старобинского месторождения калийных солей по объекту рудник: отчет о НИР по договору № 60557/85/2017 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2017. – 85 с.

УДК: 622.41

DOI:10.7242/echo.2024.3.13

ИССЛЕДОВАНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ ГАЗОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ В АТМОСФЕРЕ ТУПИКОВЫХ ВЫРАБОТОК КАЛИЙНОГО РУДНИКА

А.Н. Стариков, Р.Р. Газизуллин
Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: Работа посвящена исследованию особенностей газораспределения в атмосфере тупиковой очистной выработки калийного рудника. Рассмотрено влияние прилегающего к выработке калийного массива и утечек вентиляционного трубопровода на газораспределение в пределах тупиковой очистной камеры по разным продуктивным пластам. Выполнена серия экспериментов, основанных на наблюдениях за изменением концентрации газовых примесей в вентиляционной струе воздуха от забоя до устья камеры. Результаты исследований помогут в разработке методологии исследования процессов, влияющих на состав рудничной атмосферы, а также позволят совершенствовать подход к определению относительной газообильности рабочих зон калийных рудников.

Ключевые слова: относительная газообильность, газовая съемка, рабочая зона, нейтрализация газовых примесей, утечки воздуха, калийный рудник, метан, оксид углерода, рудничная атмосфера, проветривание, отбор проб.

Разработка запасов солей на калийных рудниках обусловлена выделением газовых примесей как в процессе отбойки руды, так и со стенок обнаженного массива и из складываемой горной массы. На рудниках Верхней Камы встречаются природные газы,