

29. Чаплина Т.О., Глебова О.А. Методы очистки водной поверхности от загрязнений углеводородами. Восьмая международная научная конференция - школа молодых ученых; 12-14 октября 2022 г., Москва: Сборник материалов школы. - М.: ИПМех РАН, 2022. С.127 -130.
30. Сапрыкин О.А., Носов В.Н. О предварительных результатах моделирования физико-химического комплекса по переработке сероводорода черного моря. Восьмая международная научная конференция - школа молодых ученых; 12-14 октября 2022 г., Москва: Сборник материалов школы. - М.: ИПМех РАН, 2022. С.66 -68.

ЛАБОРАТОРНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ОДНОСТОРОННЕМУ ПРОМОРАЖИВАНИЮ ОБРАЗЦОВ ПЕСКА

Д.М. Фролов¹, Г.А. Ржаницын¹, С.А. Сократов¹, А.В. Кошурников¹, В.Е. Гагарин¹

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

denisfrolov@mail.ru

Аннотация. В работе рассмотрены лабораторные и численные эксперименты по одностороннему охлаждению и промораживанию образцов сухого и влажного песка. Промораживание осуществлялось в холодильной камере под воздействием сверху охлаждающей термоплиты. Производилась термометрия замораживаемых образцов песка. В результате оценены скорость распространения волны холода в образцах, движение фронта промерзания и длительность фазового перехода. Численные эксперименты были произведены в ходе математического моделирования процесса охлаждения образца в среде MATLAB.

Ключевые слова: промораживание, песок, увлажнение, холодная комната, термометрия.

LABORATORY EXPERIMENTS ON UNILATERAL FREEZING OF SAND SAMPLES

D.M. Frolov¹, G.A. Rzhantsyn¹, S.A. Sokratov¹, A.V. Koshurnikov¹, V.E. Gagari¹

¹Lomonosov Moscow State University

Abstract. The paper considers laboratory experiments on unilateral freezing of samples of dry and wet sand. Freezing was carried out in the refrigerator under the influence of a cooling thermal plate from above. Thermometry of frozen sand samples was performed. As a result, the propagation velocity of the cold wave in the samples, the movement of the freezing front and the duration of the phase transition are estimated. Mathematical modeling of the sample cooling process was also performed.

Keywords: freezing, sand, wetness, cold room, thermometry.

1. Введение.

В свете идущих в последнее время изменений климата идет, как известно, активное таяние многолетней мерзлоты и нарушение несущей способности грунтов и фундаментов зданий и линейных сооружений в северных районах, ведущее к разрушению этих сооружений. Для проведения мониторинга текущего состояния мерзлых грунтов производится бурение термометрических скважин. Также для оценки устойчивости фундаментов зданий и сооружений производится численное моделирование термического режима грунтов на основе данных этих измерений в различных программных пакетах. В частности, в рамках развития этой методики авторами было произведено бурение термометрической скважины с полным отбором керна и определением его теплопроводности и теплоёмкости на площадке метеообсерватории МГУ имени М.В. Ломоносова. Также ведётся разработка программной расчётной схемы для моделирования термического состояния грунта на основе данных этих измерений. Данная же конкретная работа как часть представленной выше общей работы направлена на лабораторные эксперименты по одностороннему промораживанию образцов сухого и влажного песка и на отработку методики математического моделирования теплового поля в этих образцах.

2. Материалы и методы.

В статье представлены полученные в ходе лабораторных и численных экспериментов частные результаты по охлаждению и промораживанию образцов влажного и сухого песка. Так промораживание образцов влажного песка осуществлялось в холодильной камере в прямоугольном коробе из пенополиуретана под воздействием сверху охлаждающей термоплиты. Температура в холодильной камере составляла -5°C, а на охлаждающей плите было -19°C. Общий вид экспериментальной установки по промораживанию образцов песка показан на рисунке 1.



Рисунок 1. Общий вид экспериментальной установки по промораживанию образцов песка

В исследуемые образцы песка на разных глубинах были помещены термодатчики, и производилась термометрия замораживаемых образцов песка. Эксперимент по промораживанию образца влажного песка длился порядка двадцати часов. Изменение температуры в образце влажного песка можно видеть на рисунке 2.

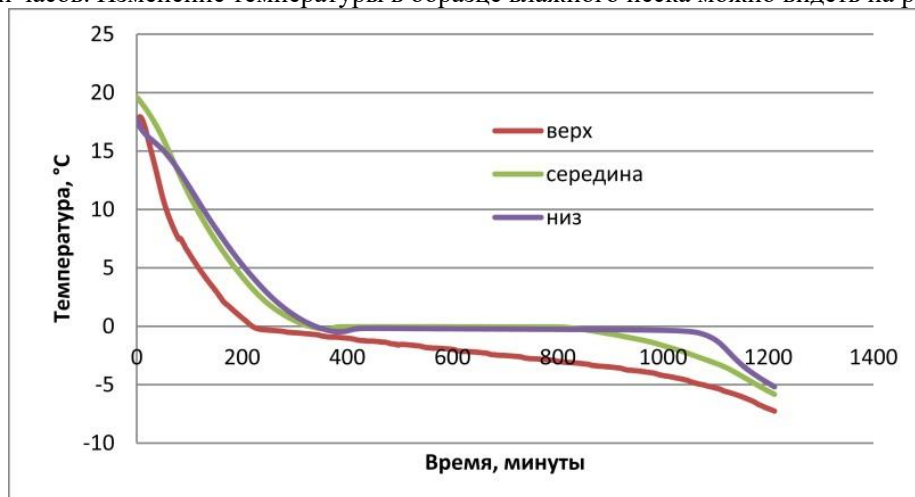


Рисунок 2. Изменение температуры в образце влажного песка при промораживании сверху

В результате проделанного эксперимента по промораживанию сверху влажного песка представляется возможным оценить скорость распространения волны холода в образцах, движение фронта промерзания и длительность фазового перехода. Так как помещённый в обойму из пенополиуретана образец песка имел размеры 6х6х18 см, а масса песка составляла 1,5 кг при массовой влажности 10%, то на промораживание влаги (0,15 кг) потребовалось отвести соответственно порядка 50 кДж тепла за время порядка 48000 секунд. Что соответствует мощности охлаждения на образце, которая составила порядка 1,042 Вт.

Охлаждение образцов сухого песка осуществлялось также в холодильной камере в коробе из пенополиуретана под воздействием сверху охлаждающей термоплиты. Температура в холодильной камере также составляла -5°C, а на охлаждающей плите - -19°C. В образцы песка на разных глубинах были также помещены термодатчики. Производилась термометрия охлаждаемого образца песка. Изменение температуры в образце сухого песка можно видеть на рисунке 3.

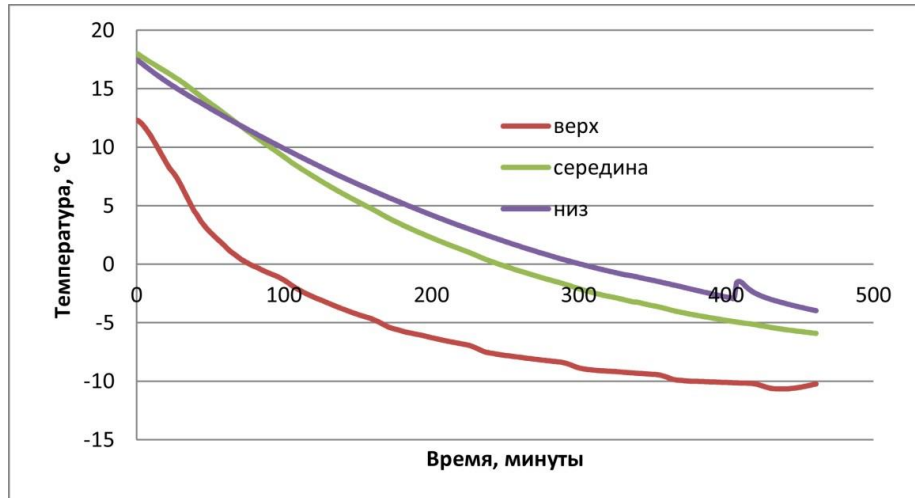


Рисунок 3. Изменение температуры в образце сухого песка при охлаждении сверху

На рисунке 3 также виден температурный скачок фазового перехода при замерзании влаги внизу образца, что свидетельствует о наличии некоторого количества влаги внизу образца сухого песка.

Также было произведено математическое моделирование процесса охлаждения образца сухого песка в среде программирования MATLAB. Исходными данными расчёта задавались результаты измерения температуры ближе к верхней охлаждаемой поверхности. Вычисления проводились посредством полученной на основе метода конечных разностей для уравнения теплопроводности Фурье (в частных производных, второго порядка) явной разностной схеме.

Так, температурное поле в снеге описывалось уравнением теплопроводности Фурье (в частных производных, второго порядка):

$$C_S \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (K_S \frac{\partial T}{\partial x})$$

где K_S , C_S - коэффициенты кондуктивной теплопроводности и теплоемкости песка, T - температура, °C, t - время.

Высота образца составляла 18 см. Она разбивалась на $i=1$, ($n=200$) частей. Создавалась прямоугольная сетка для области вычисления, и записывалось полученное на основе разностной аппроксимации уравнение на расчётной сетке по явному шаблону вычислений (рисунок 4).

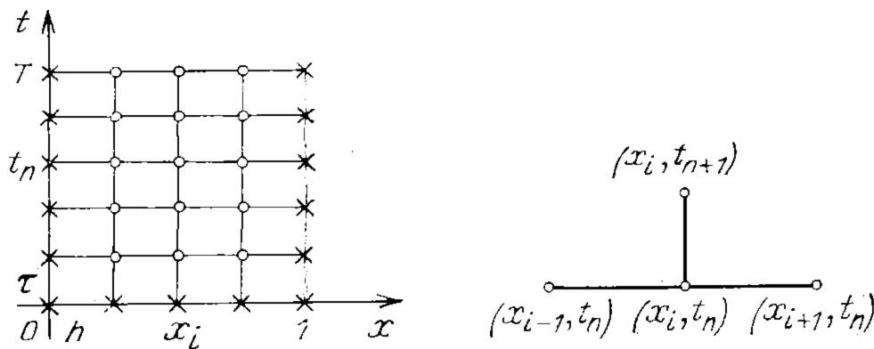


Рисунок 4. Расчётная сетка и шаблон вычисления

Общий вид полученного разностного уравнения можно было представить как:

$$C_S \frac{T_i^{j+1} - T_i^j}{\Delta t} = K_S \frac{T_{i+1}^j - 2T_i^j + T_{i-1}^j}{\Delta x^2}$$

Такое уравнение даёт новое значение температуры на новом временном слое явным методом:

$$T_{i+1}^j = T_i^j + \Delta t / C_S * K_S \frac{T_{i+1}^j - 2T_i^j + T_{i-1}^j}{\Delta x^2}$$

Шаг по времени в 1 минуту разбивался на интервалы по 0,1 секунды и производились вычисления на новом шаге (новом временном слое), используя граничные условия нулевого потока на нижней границе и задания измеренной температуры на верхней границе расчётной области:

$$K \frac{T_0 - T_1}{\Delta x} = 0, T_{n+1} = T_{surf}$$

Разностная схема для выполнения шага по j (по времени) записывалась как:

$$T_i^{j+1} = T_i^j + \Delta t / C_S * K_S / \Delta x^2 (T_{i+1}^j - 2T_i^j + T_{i-1}^j) \text{ для } i=1, n.$$

Использовались граничные условия второго рода (нулевого потока) с боков области вычисления:

$$T_0 = T_1, T_{n+1} = T_{surf}$$

3. Результаты и обсуждение.

Результаты численного моделирования распространения волны холода при одностороннем охлаждении образца песка в обойме из пенополиуретана в условиях холодной комнаты и охлаждения термоплитой сверху представлены на рисунке 5.

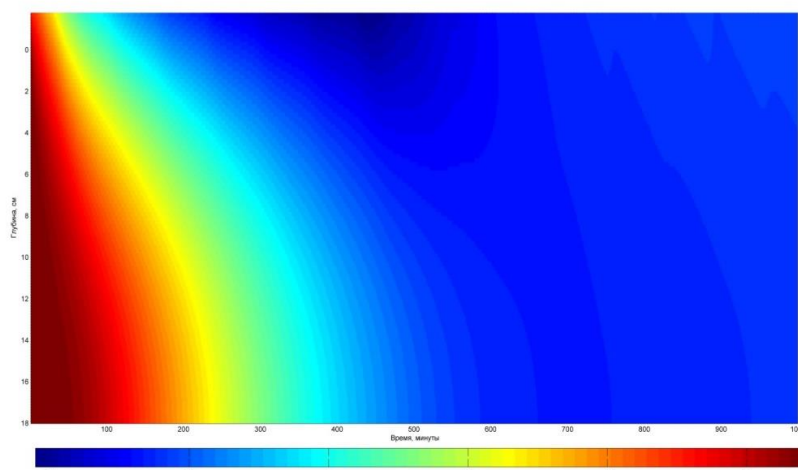


Рисунок 5. Изменение температуры при охлаждении образца сухого песка по результатам численного эксперимента

Представленные результаты численного эксперимента по изменению температуры при охлаждении образца сухого песка хорошо согласуются с данными термометрии и, следовательно, разработанная расчётная схема показывает достаточно хорошие результаты моделирования. Это делает возможным применение расчётной схемы для оценки термического состояния мёрзлых грунтов и оценки устойчивости фундаментов и располагающихся на них зданий и линейных сооружений в условиях Севера. Следовательно, представленная методика может служить хорошим подспорьем для мониторинга и по предотвращению разрушения исследуемых сооружений в условиях потепления климата.

Работа выполнена при финансовой поддержке госбюджетной темы «Опасность и риск природных процессов и явлений» (121051300175-4) и «Эволюция криосферы при изменении климата и антропогенном воздействии» (121051100164-0)

Литература/References:

1. Грунтоведение. Под ред. В.Т. Трофимов. М.: Изд-во МГУ, Наука, 2005, 1024 с.
2. Лыков А.В. Теория теплопроводности, М.: Высшая Школа, 1967, 599 с.
3. Основы мерзлотного прогноза при инженерно-геологических исследованиях // Под ред. Кудрявцева В.А. Изд-во МГУ, 1974. 431 с.
4. Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы. М.: Наука, 1989. 432 с.
5. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики, 1999, 800 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАНСНОГО ОТКЛИКА ПРОТЯЖЕННОЙ УЗКОЙ БУХТЫ НА ДЛИННОВОЛНОВЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ, ПРИХОДЯЩИЕ ИЗ ОТКРЫТОГО МОРЯ, НА ПРИМЕРЕ СЕВАСТОПОЛЬСКОЙ БУХТЫ

Ю.В. Манилюк ¹, Д.И. Лазоренко ¹, В.В. Фомин ¹