

**Численное моделирование процесса промерзания влагосодержащих образцов
различной конфигурации в области фазового перехода**

аспирант кафедры физики СПбГУНиПТ Сергеев С. В., sergeylynx@mail.ru

Санкт-Петербургский государственный университет
низкотемпературных и пищевых технологий.

В настоящее время широко используются динамические методы для определения ТФХ материалов. Особый интерес представляют собой влагосодержащие материалы, которые зачастую находятся в двухфазном состоянии. До сих пор не решена задача определения коэффициентов переноса в зоне фазового перехода. Для этого необходимо располагать наиболее полной информацией о температурном поле внутри образца, которую с требуемой точностью может дать только численный анализ. В данной статье приведена численная модель задачи Стефана, которая описывает температурное поле двухфазного образца, в котором имеет место движение четко выраженной границы раздела фаз.

Ключевые слова: ТФХ, тепловая ячейка, задача Стефана, метод конечных разностей.

Numerical analysis of the cooling of wet specimens of different geometry.

Sergeev S. V. sergeylynx@mail.ru

Saint-Petersburg state university of refrigeration and food engineering

The dynamical methods of determination of thermophysical properties of materials are widely uses nowadays. The wet materials are of great interest because of their dual-phase state, that may take place in some conditions. The problem of determination of heat transfer coefficients into the state above is still not solved. It is important to have information about temperature field into the specimen at any sharp we need. The only numerical analyses can provide us this data. This article presents numerical model of the Stephan's problem, that describes temperature field of the specimen in the dual phase state with moving phase border.

Key words: thermo physical properties, Stephan's problem, numerical method.

В настоящее время активно используются динамические методы определения ТФХ материалов, основанные на закономерностях монотонного разогрева – охлаждения, позволяющие в одном опыте изучить ТФХ образцов как функции температуры [1]. Особый интерес представляют капиллярно - пористые материалы, содержащие влагу в том или ином виде, в частности, грунтовые породы. Так, например, ведутся активные исследования вечномёрзлых грунтов в северных широтах, где происходит интенсивное строительство сооружений нефте- и газодобывающей промышленности, а также освоение новых месторождений.

В приборах, предназначенных для комплексного измерения ТФХ как функций температуры, до сих пор не решена проблема определения коэффициентов переноса в зоне температур фазовых переходов образцов. При вычислениях коэффициентов область температур фазового превращения исключалась из рассмотрения. Для того, чтобы иметь возможность исследовать ТФХ непосредственно в этой области температур, необходимо располагать достаточно простыми и в то же время относительно точными аналитическими или эмпирическими соотношениями, хорошо согласующимися с экспериментом. Строгое аналитическое описание зачастую невозможно в силу непреодолимых математических затруднений, а эксперимент не дает достаточной информации для описания процесса фазового превращения. В частности в тепловой ячейке при использовании образцов цилиндрической формы есть возможность измерять температуры как функции времени только в центре и на поверхности образца. Значительно помогает в этой ситуации построение численной математической модели процесса, которая с заданной точностью представляет всю информацию о температурных полях образца на всех этапах процесса.

В настоящей статье представлена численная модель одномерного температурного поля, возникающего в двухфазном влагосодержащем образце, который охлаждается в

изотермической среде. Рассмотрены три простейшие конфигурации образца: пластина, цилиндр и шар. При охлаждении образца можно условно выделить три основные стадии процесса: однофазную жидкую, двухфазную с явно выраженной движущейся границей раздела фаз и однофазную твердую (см. рис. 1). Анализ каждой стадии можно рассматривать в виде самостоятельной задачи с собственными начальными и граничными условиями, а затем связать их вместе. Распределения температуры в однофазных стадиях в рамках данного вопроса не представляют интереса, поэтому далее будет рассмотрена только двухфазная стадия процесса.

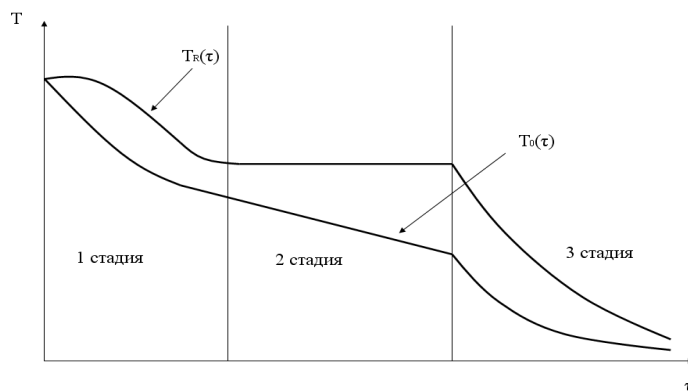


Рис. 1 Изменение температуры на поверхности и в центре образца. Стадия 1 – однофазная жидкая; стадия 2 – двухфазная; стадия 3 – однофазная твердая.

Анализ температурного поля в двухфазной стадии может быть сведен к решению задачи Стефана для стоячей воды [2] с граничными условиями второго рода. При этом необходимо выполнение следующих условий:

1) В жидкой фазе на всей стадии промерзания сохраняется постоянная температура, равная T_3 . Этого можно добиться в эксперименте, если оптимизировать граничные условия. В частности, режим охлаждения подбирается в опыте так, чтобы неравномерность температурного поля в образце не превышала (2...5) К, тогда как температура образца в опыте в целом изменяется в среднем в пределах 50 К. При таких

условиях выравнивание температуры в жидкой фазе пластины происходит значительно быстрее, чем успевает промерзнуть весь образец.

2) Жидкая и твердая фазы имеют четко выраженную границу раздела, которая перемещается от поверхности образца к центру в процессе промерзания.

3) Поле температур в образце подчиняется одномерному дифференциальному уравнению теплопроводности.

4) Плотность теплового потока на поверхности образца изменяется в зависимости от температуры поверхности.

Решение задачи выполнено методом конечных разностей по неявной схеме для уравнений параболического типа [4]. Для этого на область расчета наложена сетка с заданным шагом по времени (k) и координате (h) (см. рис. 2), что позволило заменить

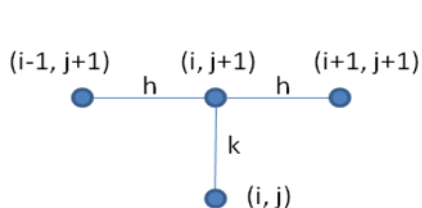


Рис. 2 Конечно-разностная сетка

дифференциальные операторы в математической модели Стефана на конечно-разностные. Для автоматизации вычисления температур в узлах сетки на каждом временном шаге разработан свой алгоритм. Ниже

приведен алгоритм расчета температурного поля для цилиндрического образца.

Варьируя в нем параметры шага сетки, можно получать любую заданную точность решения. Результаты вычислений в случае одномерной задачи представляются в виде матрицы температур, в которой столбцы – временные отрезки, строки – координатные.

Исходные данные для численной модели соответствуют условиям эксперимента на конкретной тепловой ячейке, где в качестве образца использована дистиллированная вода.

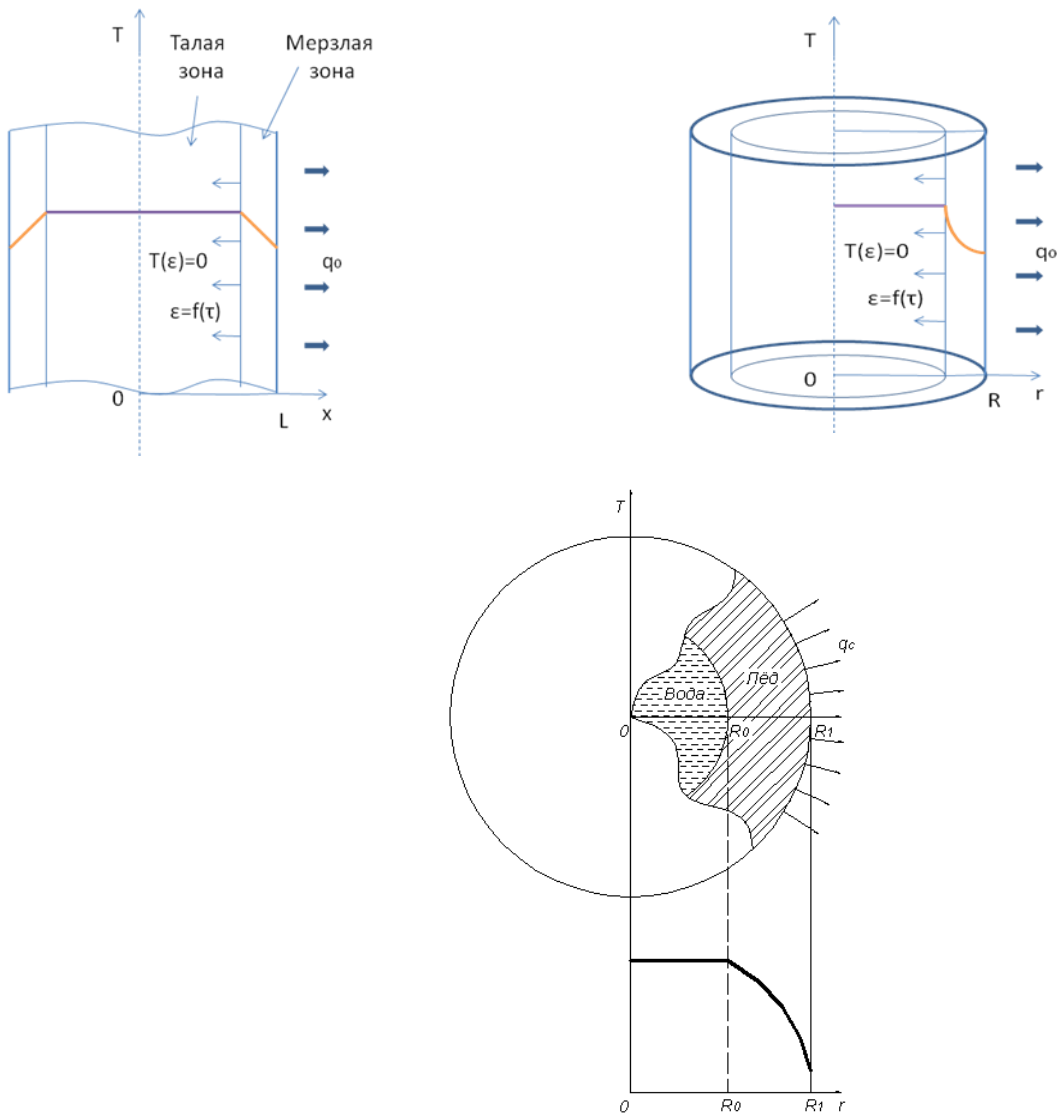
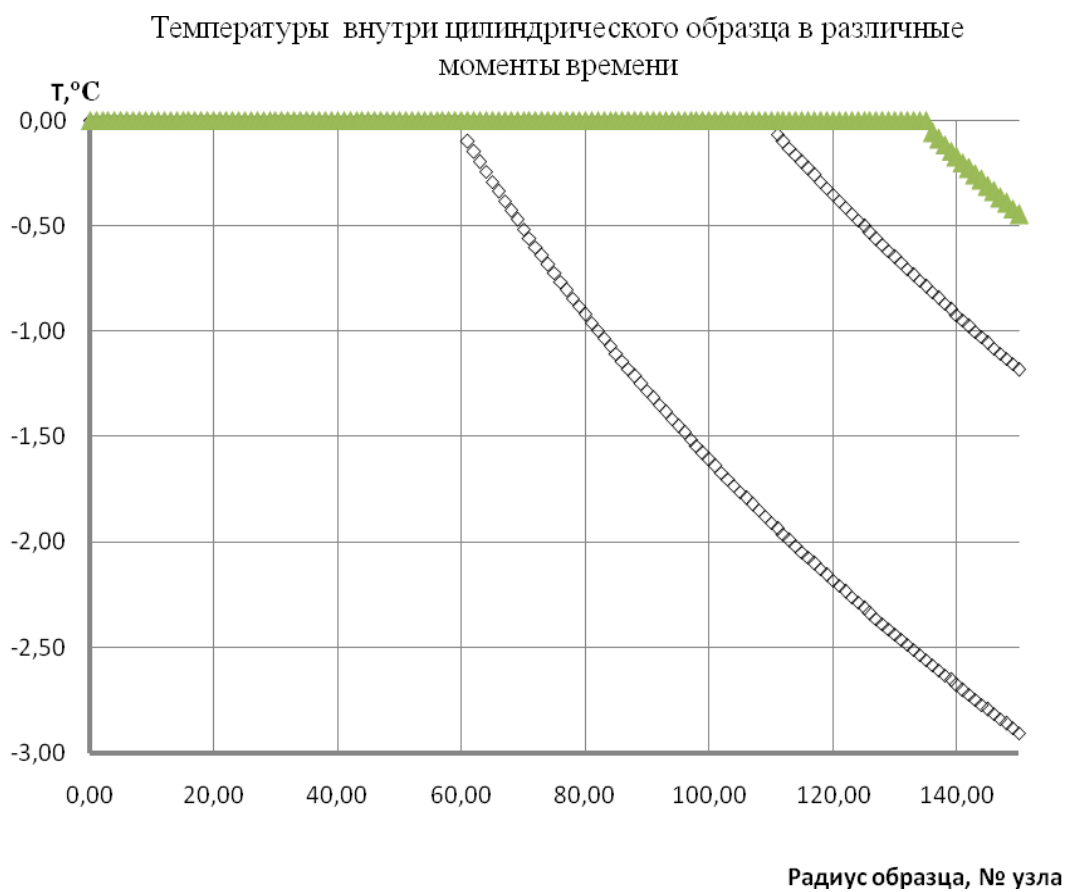
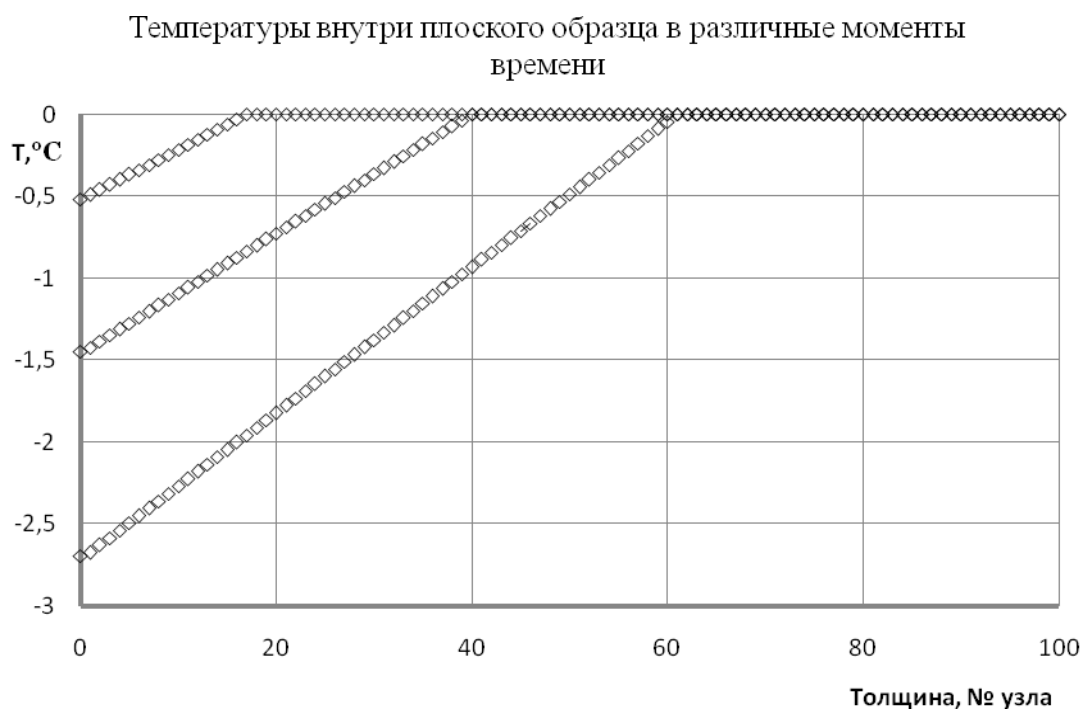


Рис. 3 Иллюстрация процесса промерзания образцов различной геометрии: слева – пластина, справа – цилиндр, снизу – шар.

Температурное поле образцов различных конфигураций показано на рисунке 4.



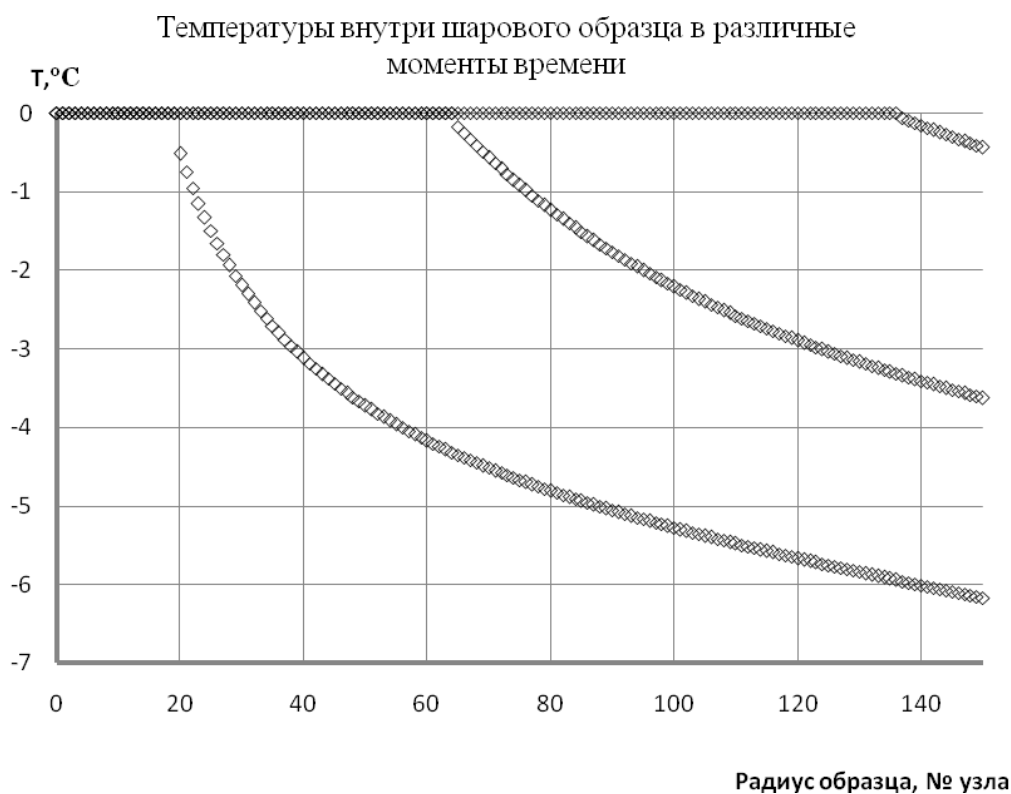


Рис. 4 Температурные поля в образцах различных конфигураций

Для образца цилиндрической формы на рис.5 показано сравнение зависимостей температуры на поверхности и в центре от времени, полученных экспериментально и с помощью численной модели. Таким образом, есть возможность оценить адекватность используемой численной модели.

Полученные решения довольно хорошо согласуются с экспериментом и могут быть использованы для разработки приближенного аналитического описания температурного поля образца при фазовом переходе.

Температуры цилиндрического образца в центре и на поверхности

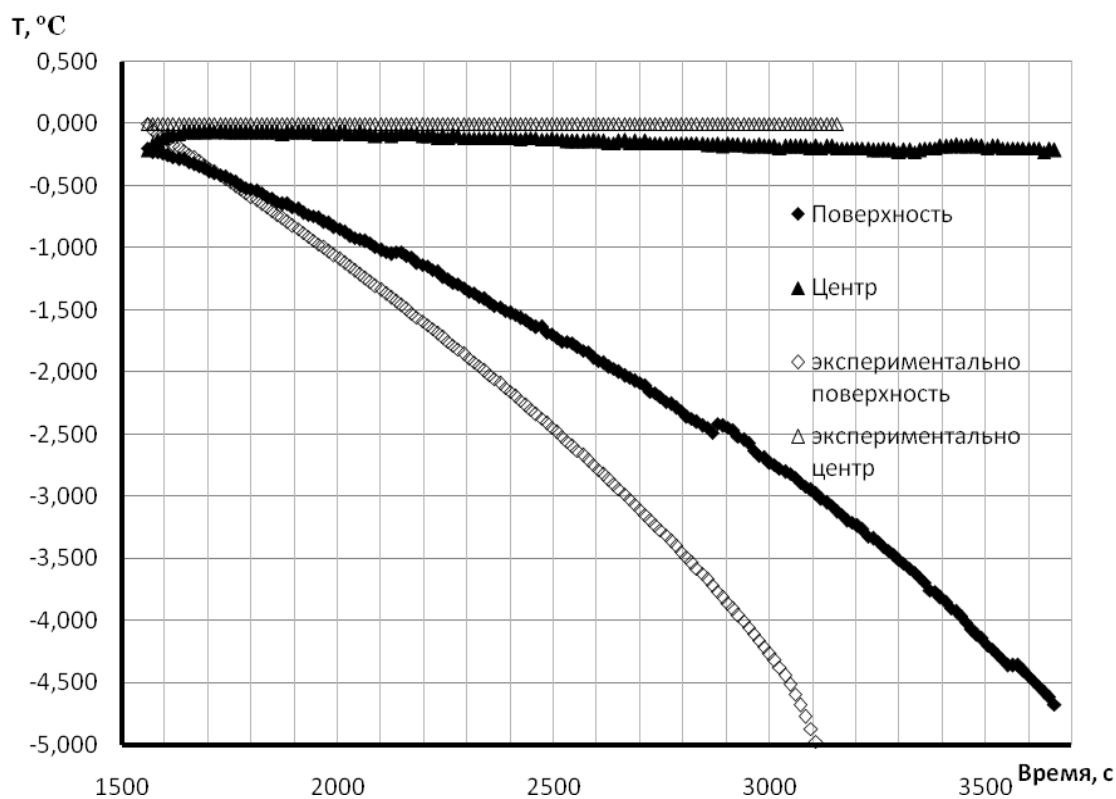


Рис. 5 Сравнение результатов эксперимента и численного решения для цилиндрического образца

Литература

1. Лыков А. В. Тепло – и массоперенос в капиллярно - пористых телах. – М. : Высшая школа, 1966.- 527с. С
2. Лыков А. В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967.- 599с.
3. Лебедев О. В., Будадин О. Н. Нахождение положения точки росы и плоскости промерзания в многослойных объектах с учетом фазовых переходов жидкость – твердое тело. - www.imash.ru
4. Демидович Б. П. Численные методы анализа. – М.: гос. изд. физ. – мат литературы, 1962.-367с.

Сергеев С. В.