

## МОДЕЛИРОВАНИЕ КАК МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

*Н.В. Вабищевич, И.А. Волков,*

*Э.А. Тищенко, С.Р. Киселев*

*Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой,  
Новополоцк, Беларусь*

*Представлены результаты использования методов численного и экспериментального моделирования для исследования физических процессов в области материаловедения, механических волн и акустики, молекулярной физики.*

**Ключевые слова:** *адгезия, стоячие волны, численное моделирование, метод конечных разностей, вычислительный эксперимент.*

**Введение.** В современной науке моделирование является универсальным и целенаправленным методом научного исследования как основы познания окружающего мира. Несомненным преимуществом моделирования является то, что его применение позволяет изучать наиболее сложные проявления природы, с одной стороны, и визуализировать, делать более наглядным и доступным для широкого круга масс процесс обучения и познания законов существования природы, что способствует формированию общества, члены которого обладают корректными мировоззренческими взглядами.

Являясь основной наукой, изучающей природу, физика активно использует моделирование как один из основных методов исследования физических процессов, явлений и взаимосвязей. При этом широкое применение находят как методы теоретического моделирования, использующие в качестве исследования абстрактные знаковые модели, так и методы экспериментального моделирования, при которых используются предметные модели, обладающие основными физическими свойствами оригинала, но отличающиеся от него геометрическими размерами, скоростью протекания процессов, вариативностью условий протекания процесса и т.п. [1–3].

Цель настоящей работы состояла в анализе опыта применения методов численного и экспериментального моделирования с применением современных информационных технологий программирования для исследования адгезионных свойств пленки, физических характеристик стоячих волн и прикладных задач физики, описывающих работу насосов.

**Поверхностная энергия.** В области материаловедения проводился численный эксперимент по исследованию зависимости относительной поверхностной энергии адгезии пленки  $\gamma$  от толщины отрываемого слоя  $t$  [4], для чего решалось дифференциальное уравнение

$$\gamma = \frac{D}{4} w''(s)^2,$$

где  $w$  – толщина зазора отрыва пленки;

$D$  – коэффициент, рассчитываемый по формуле:

$$D = \frac{Et^3}{12(1 - \nu^2)},$$

где  $E$  – модуль Юнга;

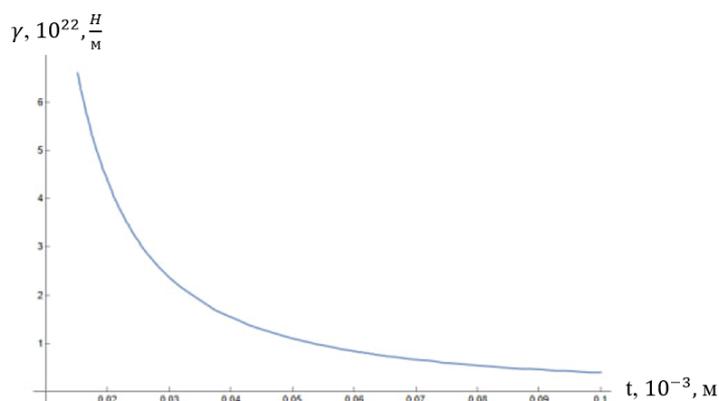
$\nu$  – коэффициент Пуассона.

Численное моделирование проводилось в среде Wolfram Mathematica, широко применяемой для обработки данных научных и инженерных расчетов. Преимуществами данного программного обеспечения являются широта функциональности, позволяющая решать широкий спектр задач дифференциального и интегрального вычисления, использовать символьные вычисления, а также обширные графические возможности для создания высококачественных 2D и 3D визуализаций.

Помимо этого в среде Wolfram Mathematica есть обширная библиотека функций, позволяющая решать задачи в различных областях науки и инженерии без написания дополнительных базовых кодов. Указанная среда кроссплатформенна и хорошо интегрируется с другими программными средами и языками программирования, что делает ее идеальным инструментом для построения комплексных вычислительных систем [5].

Пример результатов численного моделирования представлен на рисунке 1.

**Рисунок 1. – Зависимость относительной поверхностной энергии от толщины отрываемого слоя для алюминия**



В результате проведенного численного эксперимента для различных материалов было установлено: при увеличении толщины отрываемого слоя, поверхностное натяжение уменьшается. Это может объясняться тем, что молекулы вещества на поверхности испытывают притяжение к молекулам внутри вещества, что создает силу, препятствующую расширению поверхности. При удалении слоя этого препятствия становится меньше, что приводит к уменьшению поверхностного натяжения.

**Акустические волны.** В области акустики проводилось численное и экспериментальное моделирование стоячих волн. Численное моделирование стоячих волн проводилось методом конечных разностей. В качестве физической модели использовалась струна [6]. Классическое уравнение волнового движения которой имеет вид:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2},$$

где  $u(x, t)$  – высота струны в точке  $x$  и момент времени  $t$ ;

$c$  – скорость распространения;

$x$  – координата вдоль струны.

Метод конечных разностей позволил аппроксимировать вторые производные по времени и координате, выражая их через разности между значениями в разных точках, в результате чего уравнение движения приняло вид:

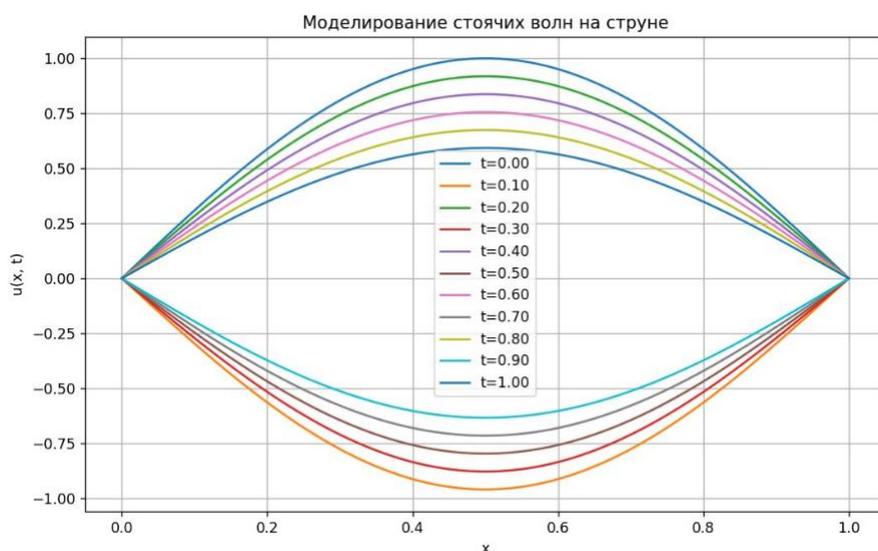
$$u_{i,j+1} = 2(1-r^2)u_{i,j} - u_{i,j-1} + r^2(u_{i+1,j} + u_{i-1,j}),$$

где  $r$  – число Куранта – величина в численном анализе, которая определяет условие устойчивости численных методов решения дифференциальных уравнений в частных производных и рассчитываемая по формуле:

$$r = c \frac{\Delta t}{\Delta x}.$$

Полученное уравнение движения позволяет вычислять значения высоты струны на временном шаге, используя значения на соседних координатах.

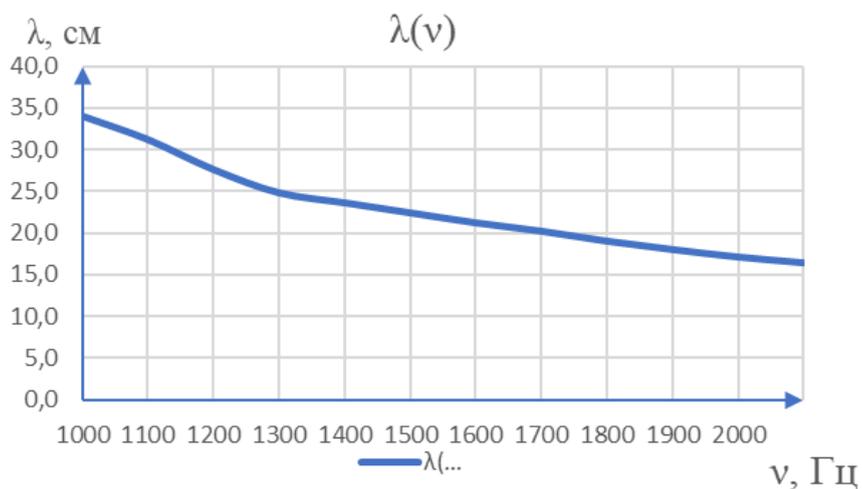
Проведенное численное моделирование позволило выполнить решение поставленной задачи в программировании, где задача реализована на языке программирования Python. Программа была составлена в среде разработки PyCharm. Результаты численного и компьютерного моделирования представлены на рисунке 2.



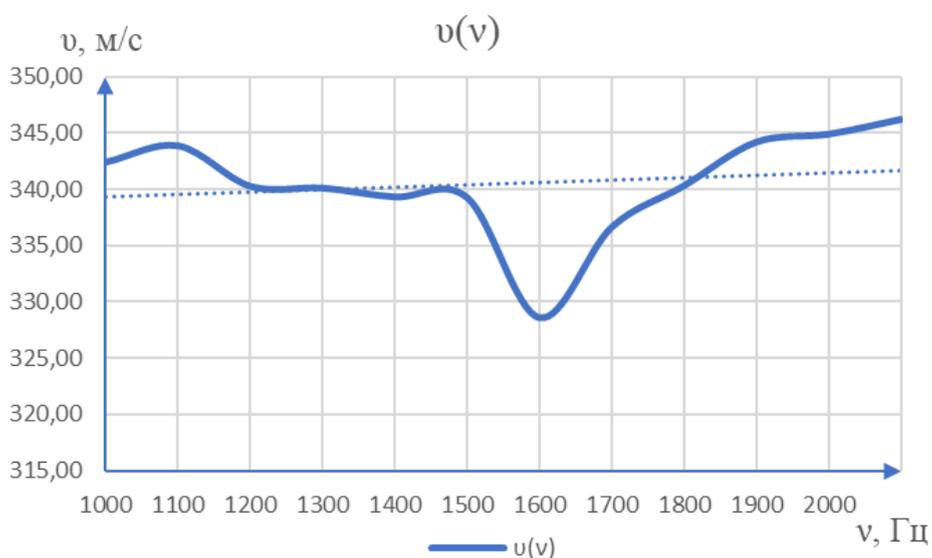
**Рисунок 2. – Численное моделирование стоячих волн на струне**

Для оценки возможностей применения стоячих волн в различных сферах обследования проводилось экспериментальное моделирование, позволившее получить данные о связи физических характеристик звуковых колебаний и волн (рисунки 3 и 4).

Полученные результаты численного и экспериментального моделирования стоячих волн могут быть использованы для более глубокого понимания основ распространения звуковых волн в различных средах с целью определения оптимальных режимов использования акустического оборудования и исследования физико-химических характеристик сред распространения волны.



**Рисунок 3. – Частотные зависимости длины волны звука для пучностей в диапазоне 1000–2100 Гц**



**Рисунок 4. – Частотные зависимости скорости распространения звуковой волны для пучностей в диапазоне 1000–2100 Гц**

**Газовые законы.** Численное моделирование эффективно применяется для решения не только научных, но и прикладных физических задач. В качестве примера приведем результаты проведения вычислительного эксперимента по откачке газа из сосуда [6]. Прежде всего была решена задача получения функции, позволяющей рассчитать, как должен изменяться с каждым ходом поршня объем откачивающей камеры насоса  $V_{нк}$ , чтобы за каждый ход забиралась одинаковая масса:

$$V_{нк} = \frac{V_{н1}V}{V - (k - 1)V_{н1}},$$

где  $V$  – объем сосуда из которого откачивается газ;  
 $V_{н1}$  – исходный объем, захватываемый откачивающей камерой насоса;  
 $k$  – номер хода поршня.

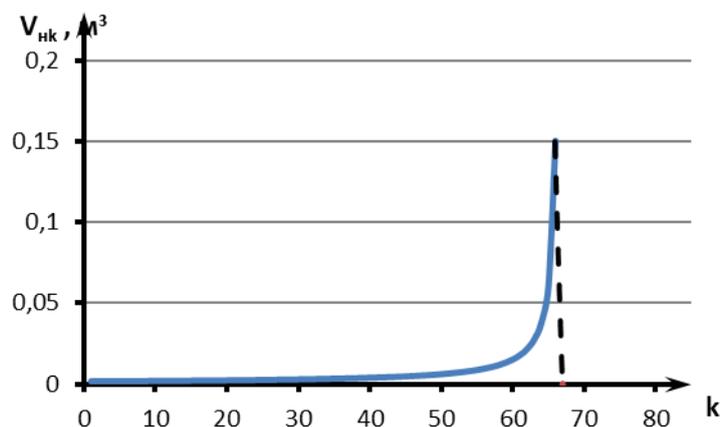


Рисунок 5. – Зависимость объема, захватываемого откачивающей камерой насоса от номера хода поршня

С каждым ходом поршня концентрация молекул в сосуде уменьшается, снижая давление внутри сосуда, что может привести к его разрушению под действием внешнего атмосферного давления. Указанная проблема может быть решена путем применения для изготовления насоса материала, при котором способен изменяться объем самого сосуда.

Проведенный вычислительный эксперимент позволил получить функцию зависимости объема сосуда от количества ходов поршня ( $k$ ) при неизменном объеме захватывающей камеры насоса и постоянной массе ( $\Delta m$ ) забора газа за каждый ход поршня:

$$V_k = \frac{V_H(m - k\Delta m)}{\Delta m}.$$

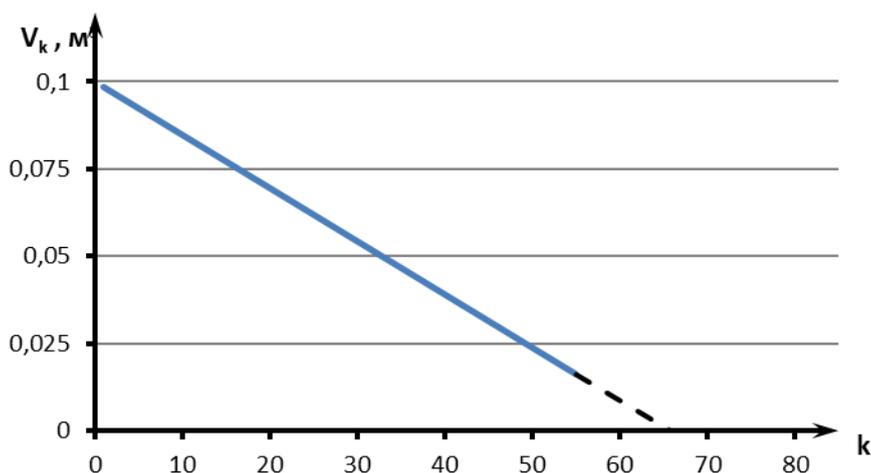


Рисунок 6. – Зависимости объема сосуда от количества ходов поршня

**Заключение.** Таким образом, представленные в работе примеры использования методов численного и экспериментального моделирования, а также их комплексного применения свидетельствуют о широких возможностях использования указанных методов как в области исследования фундаментальных физических процессов, так и области прикладной физики, что позволяет повысить эффективность внедрения результатов научно-исследовательской работы в образовательный процесс, акцентируя

внимание на практико-ориентированность подготовки специалистов естественно-научного и инженерно-технического профиля.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Красников, Г.Е. Моделирование физических процессов с использованием пакета Comsol Multiphysics: учебное пособие / Г.Е. Красников, О.В. Нагорнов, Н.В. Старостин. – М.: НИЯУ МИФИ, 2012. – 184 с.
2. Розин, К.М. Моделирование физических и технологических процессов: учебное пособие / К.М. Розин, К. В. Закутайлов. – М.: МИСИС, 2009. –103 с.
3. Филиппев, Н.А. Математические методы моделирования физических процессов: компьютерная поддержка физического эксперимента: учебно-методическое пособие/ Н. А. Филиппев. – М.: МИСИС, 2013. – 49 с.
4. Попов, В.Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения. От нанотрибологии до динамики землетрясений. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. – 352 с.
5. Иванов, О.А. Дискретная математика: учебник для вузов/ О.А. Иванов, Г.М. Фридман. – СПб.: Питер, 2020. – 352 с.
6. Савельев, И. В. Курс физики. В 3 томах. Том 1. Механика. Молекулярная физика/ И.В. Савельев. – 10-е изд., стер. Санкт-Петербург: Лань, 2023. – 356с.