

ДИНАМИЧЕСКАЯ 3D-ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ВОЛН НА СТРУНАХ В СТУДЕНЧЕСКОЙ ПРОЕКТНОЙ РАЗРАБОТКЕ ВИРТУАЛЬНОЙ ЛАБОРАТОРИИ

DYNAMIC 3D-VISUALIZATION OF WAVES ON STRINGS
IN THE STUDENTS PROJECT DEVELOPMENT
OF THE VIRTUAL LABORATORY

Александр Викторович Баранов **Alexander Viktorovich Baranov**

кандидат физико-математических наук, доцент

baranov@corp.nstu.ru

ФГБОУ ВО «Новосибирский
государственный технический
университет», Новосибирск, Россия

Novosibirsk State Technical
University, Novosibirsk, Russia

***Аннотация.** Рассмотрены виртуальные эксперименты с динамической 3D-визуализацией поперечных волн на струнах. Эксперименты реализованы в интерактивной виртуальной лаборатории — программной разработке студентов, выполненной в процессе организованной проектной деятельности.*

***Ключевые слова:** проектная деятельность студентов, компьютерное моделирование физических процессов, виртуальные лаборатории.*

***Abstract.** The article discusses virtual experiments with dynamic 3D visualization for transverse waves on strings. The experiments are implemented in the interactive virtual laboratory - the software development of students, performed in the process of organized project activities.*

***Keywords:** student project activity, computer modeling of physical processes, virtual labs.*

В последние годы значительно вырос интерес к использованию виртуальных лабораторий при обучении физике [1, 3, 5, 7, 8, 10, 11]. Во многом это связано с возможностями компьютерного моделирования и динамической визуализации физических процессов и систем, что делает виртуальные лаборатории достаточно весомым дидактическим средством [1, 4, 5, 8, 10]. Поэтому актуальными остаются вопросы разработки виртуальных лабораторий и отработки технологий организации электронного обучения для курсов физики [2, 4, 5, 6, 7, 11].

В Новосибирском государственном техническом университете (НГТУ) автором организована проектная деятельность компьютерного моделирования физических процессов для сту-

дентов IT-направлений [2, 4]. Одним из направлений такой деятельности является разработка группой студентов виртуальных лабораторий, в которых моделируются и визуализируются различные физические системы и процессы.

В статье приводятся примеры виртуальных экспериментов с компьютерным моделированием и визуализацией поперечных упругих волн на струнах. Эксперименты реализуются в интерактивной виртуальной лаборатории — программной разработке студентов, выполненной в процессе организованной проектной деятельности. Авторами разработки являются студенты второго курса факультета прикладной математики и информатики НГТУ — А. Ю. Зубарев, А. М. Конев, М. И. Ряховский.

На рис. 1 представлена заставка разработанной виртуальной лаборатории «Колебания и волны на струнах».

Виртуальная лаборатория представляет собой программный комплекс, включающий в себя семь моделирующих программ, встроенных в единую оболочку. Каждая из программ позволяет реализовать определенный интерактивный виртуальный эксперимент, связанный с моделированием и динамической 3D-визуализацией поперечных упругих волн на струнах.

В качестве моделируемых систем в комплексе выступают непрерывные и дискретные струны. Для них достаточно наглядно визуализируются процессы, связанные с распространением поперечных гармонических волн, возникновением стоячих волн, с явлениями отражения и прохождения волн на границе раздела. Теоретической основой для моделирования послужило рассмотрение волновых процессов в известной книге Г. Пейна «Физика колебаний и волн» [9].

Моделируемые системы (струны) и их волновые движения визуализируются в виде динамических 3D-изображений на фоне двумерной координатной сетки, которая позволяет производить измерения координат точек струны (масштабы для координатных осей отличаются на три порядка). Для определения временных характеристик имеется виртуальный таймер, регистрирующий текущее реальное время.

Управляющие элементы интерфейса позволяют останавливать (прерывать) процессы на определенное время, полностью обновлять параметры и регулировать скорость воспроизведения динамической визуализации моделируемого процесса. С помощью компьютерной мыши можно поворачивать 3D-изображения и изменять их линейные размеры.

Активизация требуемых виртуальных экспериментов производится с помощью пунктов спускающегося меню «Эксперимент».

В программную оболочку комплекса встроена справочная система, содержащая краткое описание возможностей интерфейса и сопроводительные методические материалы.

В процессе создания программного продукта были использованы свободные для распространения средства разработки (лицензия GPL): кроссплатформенная среда Code::Blocks,

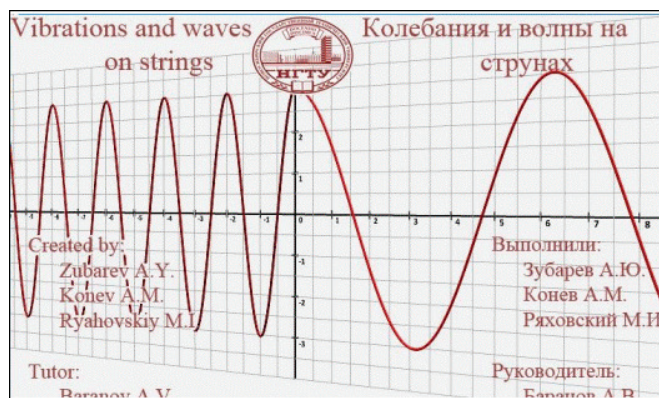


Рис. 1. Виртуальная лаборатория «Колебания и волны на струнах»

графическая библиотека OpenGL, библиотека для построения графического интерфейса пользователя wxWidgets, библиотека для работы со шрифтами FreeType.

В качестве примеров рассмотрим два виртуальных эксперимента, в одном из которых визуализация волновых процессов на струнах позволяет продемонстрировать явление дисперсии в дискретной среде, в другом — отражение волн на границе раздела сред.

Виртуальный эксперимент «Волны на дискретной струне». Реальные среды, в которых распространяются упругие волны, являются дискретными, поскольку состоят из частиц, атомов, молекул или иных микро- либо макроскопических элементов. Дискретность среды накладывает ограничения на процесс распространения волн, приводит, в частности, к явлению дисперсии — зависимости фазовой скорости гармонических волн от частоты. В результате групповые скорости волновых пакетов в средах с дисперсией отличаются от фазовых скоростей гармонических составляющих, а сами волновые пакеты изменяют свою геометрическую форму в процессе распространения.

В этой связи интересным представляется анализ и динамическая визуализация особенностей распространения поперечных упругих волн на дискретной струне [9]. В качестве идеализированной модели рассматривается протяженная невесомая струна, на которой на равных расстояниях a закреплены небольшие по размерам одинаковые грузы массой m каждый. Струна натянута и характеризуется постоянной силой натяжения F_H . При моделировании поперечных волн на дискретной струне влияние сил тяготения и трения во внимание не принима-

лось, так как основной акцент делался на упругом взаимодействии.

В приближении малых смещений и в отсутствии потерь энергии поперечное смещение y_n груза с номером n на струне подчиняется дифференциально-разностному уравнению движения [9]:

$$\frac{d^2 y_n}{dt^2} = \frac{F_H}{ma} (y_{n+1} - 2y_n + y_{n-1}).$$

Поиск решений уравнения в форме гармонических функций $y_n = A \cos(\omega t - kna)$ приводит к дисперсионному уравнению [9]:

$$\omega = 2 \sqrt{\frac{F_H}{ma}} \left| \sin \frac{ka}{2} \right|.$$

Из уравнения следует, что частотный диапазон существования гармонических волн на дискретной струне имеет ограничения: $0 < \omega \leq \omega_{\max}$.

Максимальное значение циклической частоты гармонических волн, связанное с дискретностью струны, определяется выражением

$$\omega_{\max} = 2 \sqrt{\frac{F_H}{ma}}.$$

Данному значению частоты соответствует минимальное значение длины волны: $\lambda_{\min} = 2a$.

При максимальной частоте соседние грузы на струне совершают противофазные колебания, что соответствует режиму стоячей волны.

Фазовая скорость волн на дискретной струне вычисляется по формуле

$$V_{\phi} = \frac{\omega}{k} = \sqrt{\frac{F_H a}{m}} \frac{\left| \sin \frac{ka}{2} \right|}{\left(\frac{ka}{2} \right)}$$

Фазовая скорость поперечных гармонических волн на дискретной струне зависит от значения волнового числа k .

Дискретность струны практически не сказывается при значениях длины волны $\lambda \gg a$.

Наиболее существенно дискретность проявляется при значениях длин волн, сравнимых с характерным расстоянием a .

Групповая скорость волн на дискретной струне вычисляется по формуле

$$V_{\text{гр}} = \frac{d\omega}{dk} = \sqrt{\frac{F_H a}{m}} \left| \cos \frac{ka}{2} \right|$$

В пределе малых значений k групповая скорость волн совпадает с фазовой скоростью. При минимальной длине волны $\lambda_{\min} = 2a$ значение групповой скорости $V_{\text{гр}} = 0$. Последнее означает отсутствие переноса энергии, что соответствует режиму стоячей волны. При частотах воздействия $\omega \geq \omega_{\max}$ поперечные гармонические волны не могут распространяться на дискретной струне.

На рис. 2 изображено графическое окно виртуального эксперимента «Волны на дискретной струне».

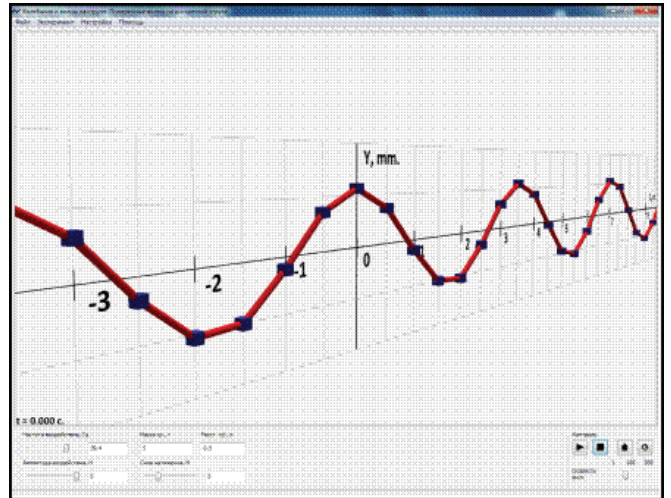


Рис. 2. Виртуальный эксперимент «Волны на дискретной струне»

Управляющие элементы интерфейса позволяют изменять силу натяжения струны, массу грузов и расстояние между ними, амплитуду и частоту поперечной гармонической силы, вызывающей волновой процесс.

Динамическая визуализация поперечных волн на дискретной струне демонстрирует, что бегущая волна представляет собой процесс распространения колебаний грузов за счет упругой связи между ними. Увеличение частоты гармонического воздействия дает возможность наблюдать переход системы в режим стоячих волн.

Виртуальный эксперимент «Волны на границе раздела струн». При падении волн на границу раздела сред наблюдаются два явления: частичное отражение волны в первую среду и частичное прохождение во вторую. То и другое определяется разной реакцией сред на гармоническое воздействие, связанное с волновым процессом. Знание импедансов (волновых сопротивлений) сред для рассматриваемого типа волн позволяет рассчитать амплитуды прошед-

шей и отраженной волн, если известна амплитуда падающей волны.

В приближении малых отклонений моделируется распространение гармонических волн в системе двух последовательно расположенных связанных струн. Струны являются однородными и непрерывными, характеризуются одним и тем же значением силы натяжения F_n , но могут иметь разные значения линейной плотности ρ , поэтому характеризуются разными значениями фазовой скорости

$$V = \sqrt{\frac{F_n}{\rho}}$$

и импеданса $Z = \sqrt{F_n \rho}$ для поперечных гармонических волн [9]. Первое приводит к разным значениям длины волны на струнах, а второе — к разной реакции струн на одинаковое поперечное гармоническое воздействие.

Если реакция струн на одно и то же воздействие разная ($Z_1 \neq Z_2$), то в точке соединения струн кроме прошедшей волны образуется отраженная [9].

Из условий непрерывности и отсутствия излома в точке соединения струн получаются два соотношения для комплексных амплитуд гармонических волн [9]:

$$\frac{B_1}{A_1} = \frac{(Z_1 - Z_2)}{(Z_1 + Z_2)},$$

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{2Z_1}{(Z_1 + Z_2)},$$

где A_1 — амплитуда падающей волны на первой струне;

A_2 — амплитуда прошедшей волны на второй струне;

B_2 — амплитуда отраженной волны на первой струне.

Первое отношение называется *амплитудным коэффициентом отражения*, второе — *амплитудным коэффициентом прохождения*. Как видно из приведенных выражений, значения полученных коэффициентов определяются отношением импедансов.

Если $Z_1 = Z_2$, то реакция струн на воздействие одинакова и отраженной волны не возникает. Если $Z_1 > Z_2$, то волна отражается в фазе с падающей волной. Если $Z_1 < Z_2$, то волна отражается в противофазе с падающей волной. Амплитуда

отраженной волны всегда меньше амплитуды падающей. Исключение составляет предельный случай, когда волна не может распространяться по второй струне. Это соответствует условию закрепления точки соединения струн. В таком случае волна отражается от точки закрепления в противофазе и с амплитудой, равной амплитуде падающей волны.

Таким образом, при наличии отражения на первой струне одновременно существуют две волны — падающая и отраженная. На второй струне будет существовать только прошедшая бегущая гармоническая волна.

На рис. 3 изображено графическое окно виртуального эксперимента «Волны на границе раздела струн».

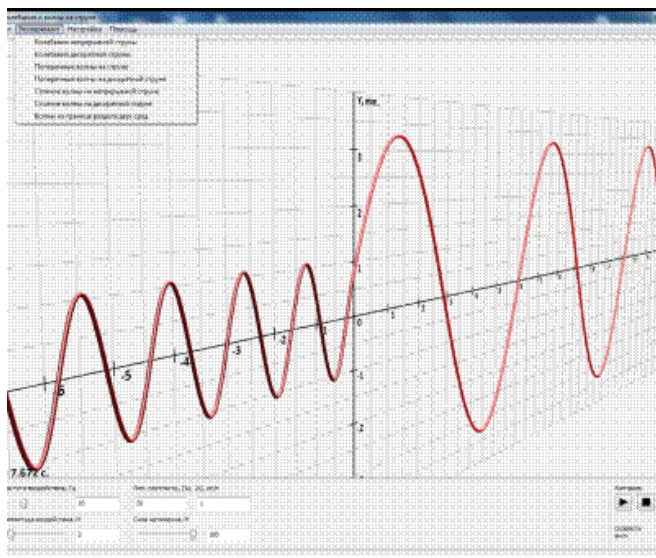


Рис. 3. Виртуальный эксперимент «Волны на границе раздела струн»

Управляющие элементы интерфейса позволяют изменять силу натяжения струн, линейную плотность каждой струны, амплитуду и частоту падающей волны.

Динамическая визуализация поперечных волн на связанных струнах позволяет продемонстрировать процессы отражения волны в первую среду и прохождения во вторую среду на границе раздела (в точке соединения струн).

Разработанная студентами виртуальная лаборатория «Колебания и волны на струнах» используется в качестве демонстрационного средства на лекциях и в лабораторном практикуме кафедры общей физики НГТУ.

Список литературы

1. De Jong T. *Physical and Virtual Laboratories in Science and Engineering Education* / T. De Jong, M. C. Linn, C. Z. Zacharia // *Science*. 2013. V. 340, April. P. 305–308.
2. Баранов А. В. Метод виртуальных проектов при изучении основ квантовой механики в техническом университете / А. В. Баранов // *Физическое образование в вузах*. 2010. Т. 16, № 4. С. 26–34.
3. Баранов А. В. Обучение школьников компьютерному моделированию физических процессов в контексте метода научного познания / А. В. Баранов // *Дистанционное и виртуальное обучение*. 2014. № 7 (85). С. 61–69.
4. Баранов А. В. Проектная деятельность компьютерного моделирования в физическом практикуме технического университета: организация, требования, критерии оценки / А. В. Баранов // *Инновации в образовании*. 2016. № 10. С. 158–170.
5. Гарифуллин Р. И. Электронный комплекс виртуальных лабораторных установок по механике и молекулярной физике / Р. И. Гарифуллин, Е. М. Девяткин // *Ломоносовские чтения на Алтае: сборник научных статей Международной молодежной школы-семинара, Барнаул, 5–8 ноябр., 2013 г.: в 6 частях*. Барнаул: Изд-во Алт. гос. ун-та, 2013. Ч. 3. С. 309–311.
6. Дайнеко Е. А. Применение информационных технологий на базе фреймворка. NET XNA для разработки виртуальной физической лаборатории с элементами 3D компьютерного моделирования / Е. А. Дайнеко, М. Т. Ипалакова, Ж. Ж. Болатов // *Программирование*. 2017. № 3. С. 54–68.
7. Девяткин Е. М. Технология организации электронного обучения физике [Электронный ресурс] / Е. М. Девяткин // *Современные наукоемкие технологии*. 2018. № 1. С. 77–82. Режим доступа: <http://www.top-technologies.ru/ru/article/view?id=36896>.
8. Ким В. С. Виртуальные эксперименты в обучении физике / В. С. Ким. Уссурийск: Изд-во Дальневосточного фед. ун-та, 2012. 184 с.
9. Пейн Г. Физика колебаний и волн: учебное пособие для вузов / Г. Пейн; пер. с англ. А. А. Колоколова; под ред. Г. В. Скряцкого. Москва: Мир, 1979. 389 с.
10. Ревинская О. Г. Актуальность изучения физических моделей на компьютере в курсе общей физики / О. Г. Ревинская, Н. С. Кравченко // *Информатизация инженерного образования ИНФО-РИНО-2014: труды Международной научно-методической конференции, Москва, 15–16 апр., 2014 г.* Москва: Изд-во Моск. энергетич. ин-та, 2014. С. 559–562.
11. Третьякова О. Н. Информационные технологии и разработка дистанционного физического практикума / О. Н. Третьякова // *Вестник Костромского госу. ун-та им. И. А. Некрасова*. 2010. № 4. С. 288–291.