

О РАЗНЫХ СПОСОБАХ ОПИСАНИЯ ДВИЖЕНИЯ В МЕХАНИКЕ

Егоров Г.В.

Брянский государственный университет им. акад. И.Г. Петровского, Брянск, e-mail: gennadyegorow@yandex.ru

В данной статье рассматриваются различные способы описания движения в механике. Они анализируются на основе принципа множественности и единства моделей в физике, который был ранее предложен и проанализирован автором с целью повышения качества физического образования в средней школе и в вузе. Согласно этому принципу существует множество различных способов построения модели данного физического явления, но при этом все такие модели обладают единой физической сущностью. Понимание студентами модельного характера физической науки способствует более глубокому усвоению учебного материала. В работе приводятся примеры, подтверждающие эффективность использования указанного принципа при изучении некоторых важных тем в вузовском курсе механики. Рассматривая различные подходы к решению учебных физических задач, студенты глубже усваивают материал учебного курса и повышают свою компетентность в области использования физических законов в разных практических ситуациях. Проведенный анализ результатов практических заданий, выполненных студентами, показывает, что способность решать физические задачи у студентов, прошедших соответствующую подготовку и осознавших модельный характер физической науки, оказывается выше, чем у тех, с которыми не проводились подобные занятия.

Ключевые слова: преподавание физики, методология, модели в физике, множественность и единство моделей.

ABOUT DIFFERENT WAYS OF DESCRIBING MOTION IN MECHANICS

Egorov G.V.

Bryansk State University named after Academician I. G. Petrovsky, Bryansk, e-mail: gennadyegorow@yandex.ru

This article discusses various ways to describe motion in mechanics. They are analyzed on the basis of the principle of multiplicity and unity of models in physics, which was previously proposed and analyzed by the author in order to improve the quality of physical education in secondary schools and universities. According to this principle, there are many different ways to build a model of a given physical phenomenon, but all such models have a single physical entity. Students understanding of the model nature of physical science contributes to a deeper assimilation of educational material. The paper provides examples that confirm the effectiveness of using this principle in the study of some important topics in the university course of mechanics. Considering different approaches to solving educational physical problems, students learn more deeply the material of the training course and increase their competence in the use of physical laws in different practical situations. The analysis of the results of practical tasks performed by students shows that the ability to solve physical problems in students who have received appropriate training and have realized the model nature of physical science is higher than in those with whom such classes were not conducted.

Keywords: teaching physics, methodology, models in physics, multiplicity and unity of models.

Многие исследователи физического образования указывают на то, что выпускники школ нередко слабо представляют себе модельный характер физической науки и не знают о границах применимости физических теорий [1; 2]. В.Г. Разумовский отмечает, что часто даже учителя забывают о модельном характере теоретических знаний, и это чрезвычайно тормозит развитие познавательных способностей учащихся [3]. Для изменения такой ситуации в процессе преподавания физики необходимо уделять большее внимание раскрытию модельного характера познания в физической науке. Проблема множественности подходов к изложению учебного материала в курсе физики и модельного характера физических знаний рассматривается и в зарубежной литературе [4-7].

Четкое понимание модельного характера физической науки во многих случаях способствует более глубокому усвоению учебного материала вузовского курса физики. Правильный выбор модели в ходе решения физической задачи часто является залогом успеха в процессе ее решения. Ранее автором было предложено использование принципа множественности и единства моделей в процессе преподавания физики [1; 8; 9]. Согласно этому принципу существует множество различных способов построения математической модели данного физического явления, но при этом все такие модели обладают единой физической сущностью [1].

Целью исследования является анализ различных приемов, которые используются при описании движения тел в механике и при этом хорошо демонстрируют множественность моделей в физике. К таким приемам относятся использование различных способов описания движения (векторный, координатный и естественный способы), переход в другую систему отсчета и т.д. Изучение таких приемов выполнялось на практических занятиях по механике в Брянском государственном университете имени академика И.Г. Петровского.

Материал и методы исследования

Для решения поставленных целей и задач исследования использовался анализ результатов практических работ и тестов, выполненных студентами. Задания для студентов составлялись на основе материалов книги [10], в которой собраны задачи, предлагавшиеся на практических занятиях студентам физического факультета МГУ. Анализ практических приемов, позволяющих решать различные задачи разными способами, проводился на основе принципа множественности и единства моделей в физике.

Результаты исследования и их обсуждение

Рассмотрение и анализ большого числа примеров, которые показывают возможность использования различных моделей в ходе решения физической задачи, существенно развивает уровень компетентности студентов в области практического применения полученных теоретических знаний по механике. Такой анализ позволяет довести до сознания студентов тот факт, что выбирая более удобную математическую модель, во многих случаях можно существенно упростить решение задачи – либо просто сократить выкладки, либо сделать более понятной и прозрачной физическую сторону решения.

Задача 1. Найти скорость точки A , находящейся на ободу колеса радиуса R , которое катится без проскальзывания с постоянной скоростью V_0 по горизонтальной плоскости, в системе отсчета, связанной с неподвижным наблюдателем, а также путь, который проходит эта точка за один оборот колеса в неподвижной системе отсчета [10].

Решение

Движение колеса в системе отсчёта, связанной с Землей, можно представить как

комбинацию поступательного перемещения со скоростью движения оси колеса V_0 и вращательного движения с угловой скоростью $\omega = \frac{V_0}{R}$ относительно этой оси (рис. 1).

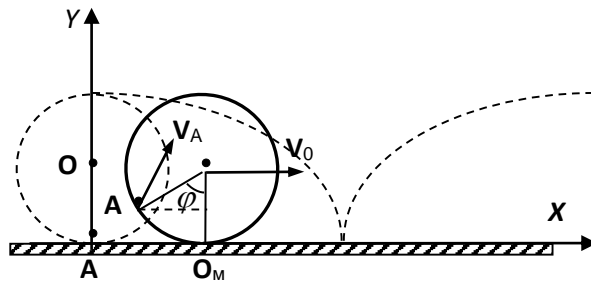


Рис. 1. Совокупность поступательного и вращательного движений

Уравнения движения точки A в параметрической форме имеют вид:

$$x(t) = V_0 t - R \sin \varphi = V_0 t - R \sin \frac{V_0}{R} t,$$

$$y(t) = R - R \cos \frac{V_0}{R} t.$$

Эти уравнения описывают циклоиду.

Проекции скорости точки A изменяются по следующим законам:

$$V_x(t) = \dot{x}(t) = V_0 - V_0 \cos \frac{V_0}{R} t = V_0 \left(1 - \cos \frac{V_0}{R} t \right),$$

$$V_y(t) = \dot{y}(t) = V_0 \sin \frac{V_0}{R} t.$$

Модуль скорости равен:

$$\begin{aligned} V(t) &= \sqrt{V_x^2(t) + V_y^2(t)} = V_0 \sqrt{2 - 2 \cos \frac{V_0}{R} t} = \\ &= 2V_0 \sqrt{\sin^2 \frac{V_0}{2R} t} = 2V_0 \left| \sin \frac{V_0}{2R} t \right|. \end{aligned}$$

Период обращения колеса определяется выражением:

$$T = \frac{2\pi R}{V_0}.$$

Путь, пройденный точкой A за один период, равен:

$$s = \int_0^T V(t) dt = 2V_0 \int_0^T \left| \sin \frac{V_0}{2R} t \right| dt = 4V_0 \int_0^{T/2} \sin \frac{V_0}{2R} t dt = 8R \left(-\cos \frac{V_0}{2R} t \right) \Big|_0^{T/2} = 8R \left(-\cos \frac{\pi}{2} + 1 \right) = 8R$$

С другой стороны, движение колеса можно представить как поворот вокруг мгновенной оси вращения O_M в неподвижной системе отсчета, связанной с Землей (рис. 2).

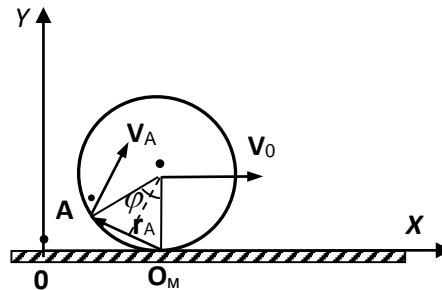


Рис. 2. Поворот вокруг мгновенной оси вращения

Проскальзывание отсутствует, поэтому в любой момент времени скорость точки касания колеса и плоскости O_M равна нулю.

Тогда $\mathbf{V}_A = [\boldsymbol{\omega} \mathbf{r}_A]$,

$$V_A = \omega \cdot 2R \left| \sin \frac{\varphi}{2} \right| = 2V_0 \left| \sin \frac{\varphi}{2} \right| = 2V_0 \left| \sin \frac{V_0}{2R} t \right|.$$

Мы видим, что для скорости точки A получается такой же результат, как и в первом случае, но при этом объем вычислений существенно сократился. Учащиеся могут убедиться, рассматривая этот пример, что при описании сложного движения твердого тела возможны разные подходы, которые в итоге приводят к одинаковым результатам, однако трудоемкость расчетов может при этом существенно различаться.

Задача 2. Из точки A свободно падает тело. Одновременно из точки B под углом α к горизонту брошено другое тело так, чтобы тела столкнулись в воздухе. Величины H и L известны. Найти угол α .

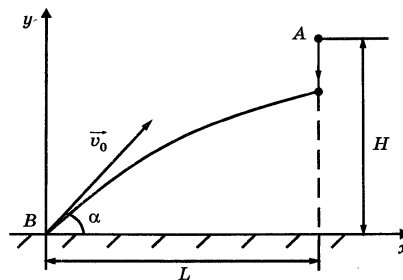


Рис. 3. Столкновение тел

Решение

Запишем уравнения движения тел в системе отсчета, связанной с Землей, обозначив через t_1 время встречи тел:

$$x_A = L, \quad y_A = H - \frac{gt_1^2}{2}.$$

$$x_B = v_0 \cos \alpha \cdot t_1, \quad y_B = v_0 \sin \alpha \cdot t_1 - \frac{gt_1^2}{2}.$$

В момент столкновения координаты тел совпадают. Поэтому получаем:

$$v_0 \cos \alpha \cdot t_1 = L, \quad v_0 \sin \alpha \cdot t_1 = H.$$

Отсюда находим угол α :

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{H}{L}, \quad \alpha = \operatorname{arctg} \frac{H}{L}.$$

Мы видим, что угол α определяется только значениями H и L и не зависит от величины начальной скорости v_0 .

С другой стороны, можно рассмотреть движение в системе отсчета, связанной с падающим из точки A телом. Скорости тел в системе отсчета, связанной с Землей, равны:

$$\vec{v}_A = \vec{gt} \quad (1)$$

$$\vec{v}_B = \vec{v}_0 + \vec{gt} \quad (2)$$

Из закона сложения скоростей следует:

$$\vec{v}'_B = \vec{v}_B - \vec{v}_A \quad (3)$$

где \vec{v}'_B - скорость тела B относительно движущейся системы отсчета.

Из формулы (3), с учетом (1) и (2), следует, что относительная скорость равна:

$$\vec{v}'_B = \vec{v}_0$$

Отсюда видно, что скорость тела B относительно движущейся системы отсчета остается постоянной. Так как тело A в этой системе отсчета неподвижно, то для того чтобы тела столкнулись, скорость $\vec{v}'_B = \vec{v}_0$ должна быть направлена в точку A .

Отсюда с помощью рисунка можно легко найти угол α :

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{H}{L}, \quad \alpha = \operatorname{arctg} \frac{H}{L}.$$

Очевидно, что получился такой же результат, как и в первом случае. Мы видим, что векторный способ описания движения в совокупности с переходом в движущуюся систему отсчета дает существенно иной способ описания движения, который позволяет с другой стороны взглянуть на поставленную задачу.

Задача 3. Определить линейную скорость центра масс столба длиной l , падающего без начальной скорости из вертикального положения, в момент его падения на землю (рис. 4) [10].

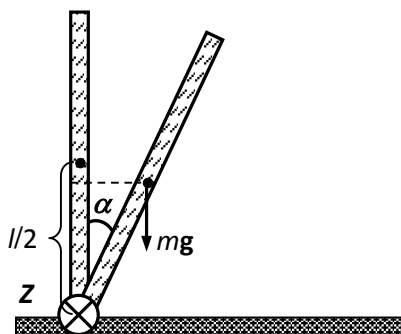


Рис. 4. Падение столба

Решение

А. Рассмотрим систему тел, состоящую из столба и Земли, на поверхность которой столб опирается. Эта система является консервативной, поэтому полная механическая энергия системы сохраняется. Закон сохранения механической энергии для этой системы имеет вид:

$$mg \frac{l}{2} = mg \frac{l}{2} \cos \alpha + \frac{I_z \omega^2}{2}. \quad (1)$$

В данном случае предполагается, что столб совершает вращательное движение относительно оси, проходящей через точку его опоры (ось Z).

Угловая скорость столба в зависимости от угла его отклонения от вертикального положения α определяется на основе выражения (1):

$$\omega = \sqrt{\frac{mgl}{I_z} (1 - \cos \alpha)}. \quad (2)$$

При этом мы считаем столб однородным стержнем, момент инерции которого относительно выбранной оси равен $I_z = \frac{ml^2}{3}$. Поэтому равенство (2) записывается в виде:

$$\omega = \sqrt{\frac{3g}{l} (1 - \cos \alpha)}. \quad (3)$$

Линейная скорость центра масс стержня равна:

$$V_c = \omega r = \omega \cdot \frac{l}{2} = \frac{1}{2} \sqrt{3gl(1 - \cos \alpha)}. \quad (4)$$

Центр масс стержня в момент падения имеет скорость:

$$V_c = \frac{1}{2} \sqrt{3gl}. \quad (5)$$

Б. Применим теорему об изменении кинетической энергии столба. Это изменение равно работе, совершенной над столбом внешней силой:

$$\Delta T = A_{12}. \quad (6)$$

Такой внешней силой в данном случае является сила тяжести. Проекция момента этой силы

на ось Z равна $N_z = mg \frac{l}{2} \sin \alpha$. Работа силы тяжести при повороте столба на 90° равна:

$$A_{12} = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} N_z d\alpha = mg \frac{l}{2} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \sin \alpha d\alpha = mg \frac{l}{2} (-\cos \alpha) \Big|_0^{\pi/2} = mg \frac{l}{2}. \quad (7)$$

Изменение кинетической энергии столба равно:

$$\Delta T = \frac{I_z \omega^2}{2}. \quad (8)$$

Из выражений (7) и (8) находим угловую скорость в момент падения:

$$\omega = \sqrt{\frac{mgl}{I_z}} = \sqrt{\frac{3g}{l}},$$

и искомую линейную скорость центра масс столба:

$$V_c = \omega r = \sqrt{\frac{3g}{l}} \cdot \frac{l}{2} = \frac{1}{2} \sqrt{3gl}. \quad (8)$$

Мы видим, что результаты, полученные разными способами, совпадают.

Таким образом, учащиеся могут убедиться, что решение задачи можно искать либо используя закон сохранения механической энергии, либо применяя теорему об изменении кинетической энергии. Основное отличие этих подходов состоит в выборе рассматриваемой системы тел. Однако оба метода приводят в конечном итоге к одинаковым результатам.

Разбирая приведенные выше примеры и многие другие подобные ситуации, студенты убеждаются, что очень часто существуют различные подходы к решению задачи. Они понимают, что в процессе решения физической задачи очень важными являются разумный выбор системы отсчета, рациональный выбор рассматриваемой системы тел, применение удобного способа описания движения. При этом использование различных моделей в ходе решения задачи часто позволяет с разных сторон взглянуть на рассматриваемое явление и глубже понять его физическую сущность.

Заключение

Проведенный анализ результатов практических заданий, выполненных студентами, показывает, что принцип множественности и единства моделей в физике не только позволяет расширить кругозор учащихся и помогает им глубже осознать единство физических законов и множественность моделей, которые можно использовать для объяснения физических явлений, но также является действенным инструментом в процессе решения задач. Способность решать физические задачи у студентов, прошедших соответствующую подготовку и осознавших сущность данного принципа, оказывается выше, чем у тех, с которыми не проводились подобные занятия.

Рассматривая различные подходы к решению учебных физических задач, студенты глубже усваивают материал учебного курса и повышают свою компетентность в области использования физических законов в разных практических ситуациях.

Список литературы

1. Егоров Г.В. О множественности и единстве моделей в физике // Вестник БГУ. 2012. № 1. С. 296-300.
2. Голин Г.М. Вопросы методологии физики в курсе средней школы: книга для учителя. М.: Просвещение, 1987. 127 с.
3. Разумовский В.Г., Майер В.В. Физика в школе. Научный метод познания и обучение. М.: ВЛАДОС, 2007. 463 с.
4. Fredlund T., Airey J., Linder C. Enhancing the possibilities for learning: Variation of disciplinary-relevant aspects in physics representations. *European Journal of Physics*. 2015. Vol. 36. №. 5. P. 055001.
5. Battaglia P. et al. Interaction networks for learning about objects, relations and physics. *Advances in neural information processing systems*. 2016. P. 4502-4510.
6. Suhendi H.Y., Ramdhani M.A., Irwansyah F.S. Verification Concept of Assesment for Physics Education Student Learning Outcome. *International Journal of Engineering & Technology (UEA)*. 2018. Vol. 7. №. 3.21. P. 321-325.
7. Syahmel S., Jumadi J. Discovery Learning using Multiple Representation model for enhancing scientific processing and critical thinking skills of the students. *Journal Inovasi Pendidikan IPA*. 2019. Vol. 5. №. 2. P. 180-194.
8. Егоров Г.В. О феноменологических и микроскопических теориях в вузовском курсе физики // Вестник БГУ. 2016. № 3. С. 212-216.

9. Егоров Г.В. Применение принципа множественности и единства моделей в вузовском курсе физики // Педагогический журнал. 2019. Т. 9. № 1А. С. 391-400.
10. Русаков В.С., Слепков А.И., Никанорова Е.А., Чистякова Н.И. Механика. Методика решения задач: учебное пособие. М.: Физический факультет МГУ, 2010. 368 с.