

**ДМИТРИЙ ВЯЧЕСЛАВОВИЧ ЕЛАХОВСКИЙ**кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*elahovsky@mail.ru***АЛЕКСЕЙ ИВАНОВИЧ НАЗАРОВ**доктор педагогических наук, заведующий кафедрой общей физики физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*anazarov@petrsu.ru*

## МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ БАКАЛАВРОВ СТРОИТЕЛЬНОЙ СПЕЦИАЛЬНОСТИ

Рассмотрен алгоритм проведения практических занятий по физике на строительном факультете университета с учетом предполагаемой профессиональной деятельности выпускников. В отличие от традиционного методического обеспечения практического фрагмента курса общей физики, предлагаемый алгоритм предусматривает знакомство студентов с решением проблемы проектирования физической среды помещений, обеспечивающей комфортное пребывание людей и условий технологических процессов. Формирование климатической и акустической среды помещений в большой степени связано с физическими законами распространения тепловых и звуковых волн и их взаимодействием с ограждающими конструкциями зданий. Поэтому рассмотрение конкретных ситуаций, имеющих место при проектировании зданий различного назначения, предполагается весьма полезным в качестве практической составляющей курса общей физики. Такой подход может способствовать повышению мотивации к изучению курса физики.

Ключевые слова: строительная физика, тепловое сопротивление, звукоизолирующая способность, методика преподавания физики

В [4] рассмотрен один из способов повышения привлекательности курса физики для студентов строительной специальности, связанный с адаптацией учебной дисциплины к предполагаемой профессиональной деятельности бакалавров. Его реализация предусматривает использование в рамках традиционного курса «Общая физика» основных элементов учебной дисциплины «Строительная физика», в частности таких ее разделов, как «Архитектурная климатология» и «Архитектурная акустика». Проектирование зданий различного назначения, связанных как с жизнедеятельностью людей, так и организацией различных производств, должно реализовывать условия их эксплуатации, обеспечивающие комфортное пребывание людей в помещениях, долговечность конструкций зданий и их оборудования, соблюдение технологических условий, повышающих качество выпускаемой продукции.

Эти задачи напрямую связаны с решением проблемы формирования в помещениях микроклимата, отвечающего состоянию теплового комфорта людей и требованиям используемых технологических процессов, то есть с формированием соответствующей климатической среды. Ее состояние определяется в первую очередь температурно-влажностными параметрами воздуха в помещениях, значения которых напрямую связаны с функциональными возможностями

ограждающих конструкций. Следует также отметить роль акустической среды помещений, обеспечивающей оптимальный «слуховой комфорт».

Основополагающие аспекты формирования климатической и акустической среды помещений, удовлетворяющей комфортным условиям жизнедеятельности человека, фрагментарно рассматриваются в рамках курса «Общая физика», однако многие нюансы данной проблематики остаются «за кадром». Следует также отметить, что общепринятая при проектировании климатической среды помещений терминология, связанная, с одной стороны, с конкретными физическими явлениями, а с другой – имеющая специфические предметные особенности, как правило, не рассматривается в лекционной программе курса физики, поэтому знакомство с ней представляется весьма полезным. Заметим также, что в учебных планах строительных факультетов не всегда присутствует дисциплина «Теплотехника».

Естественно, что предложенный способ повышения мотивационной составляющей к обучению физике студентов строительной специальности университетов, основанный на привлечении элементов строительной физики, предполагает не только пересмотр основных концептуальных основ изложения теоретического материала, но и изменение методики проведения практических

занятий и организации самостоятельной работы студентов. Алгоритм проведения практических занятий предполагает не только решение задач в рамках традиционного курса общей физики [1], [5], [7], [8], [9] и задач с производственным контекстом [6], [11], но и рассмотрение вопросов формирования климатической, акустической и световой среды помещений. Необходимый теоретический материал рассматривается в соответствующих разделах курса физики, а также представлен в учебных пособиях [2], [3].

Включение в практические занятия ситуаций, связанных с предполагаемой профессиональной деятельностью студентов, может способствовать привлекательности физики. Ниже рассмотрены методические приемы проведения практических занятий на примере осуществления тепловых и акустических расчетов.

### ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АРХИТЕКТУРНОЙ КЛИМАТОЛОГИИ

Выбор материала и геометрических размеров ограждений определяется не только соображениями механической прочности, но и необходимостью обеспечения теплового комфорта людей. Решение этой проблемы достигается с помощью тепловых расчетов ограждений, позволяющих оценить тепловые потери зданий и отдельных помещений, что, в свою очередь, дает возможность при их проектировании обосновать наиболее приемлемые с точки зрения теплотехники предполагаемые многослойные ограждения. Полученная информация определяет выбор мощностных характеристик отопительного оборудования помещений. Следует также отметить необходимость учета воздухо- и влагопроницаемости ограждений, с помощью которых решается задача кондиционирования воздушной среды помещений.

Рассмотрим ряд задач, которые могут быть предложены студентам на практических занятиях по теме «Физические основы архитектурной климатологии».

1. Основным фактором формирования климатической среды помещений являются теплофизические свойства ограждений, поэтому возникает необходимость расчета их тепловых и температурных характеристик. Студентам предлагается использовать при расчетах модель ограждения, состоящего из нескольких слоев с различными геометрическими, плотностными и теплофизическими характеристиками. В виде исходных данных задаются температуры внутреннего  $t_v$  и наружного  $t_n$  воздуха, материал каждого слоя (тем самым задаются коэффициенты теплопроводности  $\alpha_i$ ) и их толщина  $d_i$ . Студенты рассчитывают:

1.1. Общее тепловое сопротивление ограждения  $R_o$  ( $\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{C} / \text{ккал}$ ). Данная характеристика определяет тепловой поток, проходящий через

конкретное ограждение. Ее численное значение определяется наружной и естественной конвекцией, а также термическими сопротивлениями отдельных слоев ограждения ( $R_i$ ):

$$R_o = R_v + \sum_i R_i + R_n, \quad (1)$$

где  $R_v = 0,133$  ( $\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{C} / \text{ккал}$ ) – сопротивление тепловосприятию, вызванное наличием естественной (внутренней) конвекции,  $R_n = 0,05$  ( $\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{C} / \text{ккал}$ ) – сопротивление теплопередаче благодаря наружной конвекции,  $R_i = d_i / \alpha_i$  – термическое сопротивление  $i$ -го слоя.

Данный расчет позволяет установить, какой слой ограждения играет основную теплозащитную роль. Для установления соответствия ГОСТу ограждения по сопротивлению теплопередаче студенты оценивают его требуемую величину  $R_o^{mp}$ :

$$R_o^{mp} = \frac{(t_a - t_n)}{\Delta t} R_s, \quad (2)$$

где  $\Delta t = 6$  град. – нормативный температурный перепад для наружной стены. Необходимое условие –  $R_o > R_o^{mp}$ . Данный расчет позволяет обосновать выбор материала ограждения как с точки зрения его теплозащитной эффективности, так и с экономической точки зрения.

1.2. Плотность теплового потока  $q$  ( $\text{ккал} / \text{м}^2 \cdot \text{ч}$ ).

Рассчитанное полное тепловое сопротивление позволяет определить энергию теплового потока, проходящего в единицу времени через единичную площадку. Естественно, что данная величина постоянна в пределах ограждающей конструкции:

$$q = \frac{t_a - t_n}{R_o}. \quad (3)$$

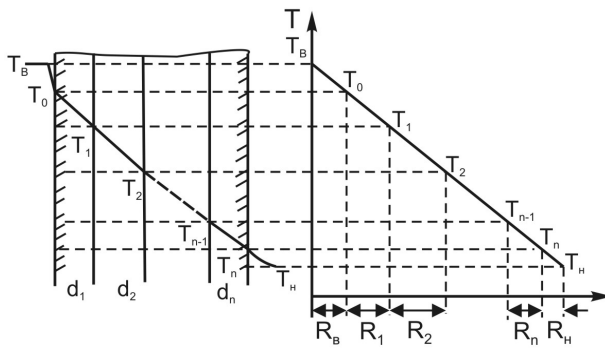
1.3. Распределение температур в многослойной ограждающей конструкции.

Постоянство теплового потока внутри ограждения позволяет рассчитать температуры на границе каждого слоя ограждения:

$$t_i = t_{i-1} - \frac{R_i}{R_o} (t_a - t_n), \quad (4)$$

где  $t_i$  – определяемая температура ( $^\circ\text{C}$ ),  $t_{i-1}$  – температура в предыдущем слое,  $R_i$  – тепловое сопротивление слоя, в котором определяется температура.

Студентам предлагается использовать графический метод, основанный на соотношении:  $T_{i-1} - T_i = jR_i$ . Этот метод иллюстрирует рисунок, на котором прямая с наклоном  $\Delta T / \Delta R = j$ , соответствующая постоянству теплового потока, позволяет сначала определить температуры слоев в масштабах тепловых сопротивлений с последующим получением температур на границах слоев ограждения.



Диаграмма, используемая для расчета температур на границах многослойной стены [10]

2. С целью разнообразить спектр решаемых практических задач в п. 1 студентам предлагается при известном материале слоя определить требуемую толщину или, наоборот, при известной толщине слоя выбрать соответствующий материал. В этих случаях, рассчитав  $R_{op}^{mp}$  и приравняв  $R_0$  из выражения (1), найдем  $d_i$  или  $\alpha_i$ .

3. Несколько усложненный вариант предполагает отсутствие информации о температуре наружного воздуха. В этом случае студенты изначально определяют показатель тепловой инерции строительного ограждения, который характеризует проникновение тепловых волн вглубь вещества:

$$D = \sum_i R_i S_i, \quad (5)$$

где  $R_i$  – термическое сопротивление отдельных слоев;  $S_i$  (ккал/м<sup>2</sup>·ч·°C) – коэффициенты теплоусвоения материала, которые характеризуют амплитуду колебаний плотности теплового потока на поверхности ограждения при амплитуде колебаний температуры этой поверхности, равной 1 °C (затабулированные величины).

Знание  $D$  позволяет в случае, когда не задана температура наружного воздуха, выбрать ее, руководствуясь следующим правилом:  $D < 4$ ,  $t_n = T_1$  – средняя температура наиболее холодных суток в данной местности,  $4 < D < 7$ ,  $t_n = T_3$  – соответствует среднему значению наиболее холодных трех суток, а при  $D > 7$ ,  $t_n = T_5$  – среднему значению наиболее холодных пяти суток. Значения указанных температур для разных городов находятся в таблицах климатических данных.

4. Наличие влаги внутри ограждения существенно влияет на теплопроводящие свойства его отдельных слоев, а влажный воздух внутренних помещений способствует его конденсации на внутренней поверхности ограждения с возможностью промерзания в зимнее время.

Если добавить в п. 1 в качестве параметра влажность внутреннего воздуха  $\phi$ , то можно предложить студентам следующую задачу: выяснить вероятность конденсации пара на внутренней поверхности ограждения. Для этого опре-

деляется упругость водяного пара внутреннего воздуха (в мм рт. ст.) при заданной влажности:

$$P_v = E_v \phi / 100, \quad (6)$$

где  $E_v$  – максимальная упругость водяного пара при заданной температуре,  $\phi$  – влажность воздуха, выраженная в %.

Это позволит найти точку росы  $\tau_p$ . Если эта величина меньше температуры внутреннего воздуха, конденсации водяных паров не будет, и наоборот. Так как теплозащитные свойства ограждения зависят от его паропроницаемости, то студенты должны рассчитать сопротивление паропроницаемости ограждения:

$$\sum_{i=1} d_i / \mu_i, \quad (7)$$

где  $\mu_i$  – коэффициенты паропроницаемости (входят в число исходных данных).

### ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АРХИТЕКТУРНОЙ АКУСТИКИ

Основные физические и физиологические характеристики звуковых волн достаточно подробно рассматриваются в лекционной и практической частях курса общей физики. В поле зрения архитектурной акустики находятся вопросы создания в помещениях «слухового комфорта» и подавления вредных воздействий шумов различной природы. Рассмотрим ряд заданий, которые могут быть предложены студентам на практических занятиях, связанных с этой темой.

1. Одним из параметров, характеризующих качество звуковой среды помещений, является время стандартной реверберации. При расчете этого параметра необходимая информация включает в себя: размер помещения (длина, ширина, высота); материал пола, стен, потолка, наличие окон (их количество  $n_1$ , площадь  $S_{ок}$ , наличие штор); наличие мебели (столов) и их количество  $N_2$ ; количество посадочных мест (стулья, кресла)  $N$ ; коэффициент заполнения  $k$  (или количество людей в помещении  $N_1$ ). Коэффициенты поглощения материалов внутренних поверхностей ограждений  $\alpha_i$  (стен  $\alpha_{ст}$ , пола  $\alpha_{пол}$ , потолка  $\alpha_{пот}$ ), остекления окон  $\alpha_3$ , поглощение посадочных мест  $\alpha_1$ , людей  $\alpha_2$  и мебели  $\alpha_m$  считаются известными. В предлагаемых заданиях указанные параметры варьируются в широких пределах. Стандартное время реверберации  $t_{рев}$  (с), пренебрегая поглощением звука в воздухе, рассчитывается по формуле:

$$t_{рев} = 0,163 V/A, \quad (8)$$

где  $V$  – объем помещения,  $A$  – эффективный показатель поглощения:

$$A = \sum_i \alpha_i S_i + \alpha_2 kN + \alpha_1 (1-k)N + \alpha_m N_2 + n_1 \alpha_3 S_{ок}. \quad (9)$$

Если учитывать поглощение звуковых волн в воздушной среде, то:

$$t_{\text{рев}} = 53,2 \cdot V / (4b + A) \cdot v, \quad (10)$$

где  $v = 340$  м/с – скорость звука в воздухе,  $b = 0,002$  м<sup>-1</sup> – коэффициент звукопоглощения в воздухе.

Указанные параметры  $N$ ,  $k$ ,  $n_1$ ,  $n$ ,  $i$  варьируются в пределах от 0 до указанных в условии данного расчета. Полученное значение стандартного времени реверберации можно сравнить с оптимальным временем реверберации:

$$t_{\text{рев}}^{\text{опт}} = m \cdot \sqrt[3]{V}, \quad (11)$$

где  $V$  – объем помещения,  $m$  – коэффициент, зависящий от типа помещения:  $m = 0,1$  с/м для оперных театров,  $m = 0,09$  с/м для концертных залов,  $m = 0,075$  с/м для аудиторий и драматических залов.

2. Важной задачей архитектурной акустики при формировании необходимой звуковой среды является предотвращение вредных воздействий производственных и бытовых шумов, что связано с проблемой звукоизоляции. Решение этой задачи обеспечивается выбором строительных ограждений с необходимыми звукоизоляционными свойствами. Их эффективность характеризуется коэффициентом звукопроводимости материала ограждения  $\beta$ , равным отношению интенсивности прошедшей через ограждения звуковой волны  $I_{\text{пр}}$  к падающей  $I_0$ , а также звукоизолирующей способностью однородного ограждения  $R$ :

$$R = 10 \lg 1/\beta = 10 \lg I_0/I_{\text{пр}}. \quad (12)$$

Звукоизолирующая способность  $R_{\text{ср}}$  ограждения, состоящего из участков с различной звукопроводимостью:

$$R_{\text{ср}} = 10 \lg \frac{S}{\sum \beta_i S_i}, \quad (13)$$

где  $S$  – полная поверхность ограждения (м<sup>2</sup>),  $S_i$  – площадь участка поверхности с коэффициентом

звукопроводности  $\beta_i$ . В том случае когда задана звукоизолирующая способность материала, переход к коэффициенту звукопроводности осуществляется по формуле:

$$\beta_i = 10^{-0,1 R_i}. \quad (14)$$

В условиях конкретного расчета задаются геометрические размеры элементов ограждения (стены, дверей, окон), коэффициенты звукопоглощения материала стен (отдельных слоев), изолирующая способность дверей и коэффициенты звукопроводности окон. С помощью формул (12) и (13) студенты определяют звукоизолирующую способность данного ограждения, а по формуле (14) рассчитывают его коэффициент звукопроводности.

В зависимости от частоты звука  $f$  звукоизолирующая способность ограждения рассчитывается по формуле:

$$R = 20 \lg mf - 47,5 \text{ дБ}, \quad (15)$$

где  $m = \rho \cdot h$  – поверхностная плотность ограждения ( $\rho$  – плотность материала ограждения,  $h$  – толщина слоя). В том случае когда  $m < 200$  кг/м<sup>2</sup>:

$$R = 12 \lg m + 13 \text{ дБ}, \quad (16)$$

при  $m > 200$  кг/м<sup>2</sup>:

$$R = 23 \lg m - 10 \text{ дБ}. \quad (17)$$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенные методические подходы к организации практических занятий по физике на основе решения профессионально ориентированных задач для студентов-строителей, связанных с расчетом климатической и акустической среды помещений различного предназначения, представляются полезными с точки зрения обеспечения мотивационной составляющей к освоению физики посредством реализации междисциплинарного взаимодействия.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волькенштейн В. С. Сборник задач по общему курсу физики. М.: Наука, 1969. 463 с.
2. Елаховский Д. В., Малиненко И. А. Физические основы архитектурной акустики: Учеб. пособие. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2008. 130 с.
3. Елаховский Д. В., Малиненко И. А. Физические основы архитектурной климатологии: Учеб. пособие. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2008. 102 с.
4. Елаховский Д. В., Назаров А. И. Методические подходы к обучению физике бакалавров строительного факультета // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Общественные и гуманитарные науки». 2015. № 1(146). С. 45–49.
5. Иродов И. Е. Задачи по общей физике. М.: Наука, 1979. 367 с.
6. Назаров А. М. Вопросы и задачи по физике с производственным содержанием. М.: Высш. шк., 1987. 119 с.
7. Новиков С. И. Сборник задач по общей физике. М.: Мир, 2006. 360 с.
8. Савельев И. В. Сборник задач и вопросов по общей физике. М.: Наука, 1982. 340 с.
9. Сивухин Д. В. Сборник задач по общему курсу физики. СПб.: Лань, 2006. 405 с.
10. Тодес О. М. Курс лекций и заданий по строительной физике. Л., 1972. 115 с.
11. Усанов В. В. Сборник задач по физике для строителей. М.: Высш. шк., 1976. 119 с.

**Elakhovskiy D. V.**, Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)  
**Nazarov A. I.**, Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

### METHODOLOGICAL SUPPORT OF PRACTICAL CLASSES FOR UNDERGRADUATE STUDENTS OF ENGINEERING FACULTY

The article presents an arrangement algorithm applicable for practical classes in Physics taught at the civil engineering faculty considering future professional activities of the faculty graduates. Contrary to the widely practiced traditional methodological support the proposed algorithm provides students with an opportunity to solve the problem of structuring physical engineering environment, which can ensure both people's comfort and adherence to specifications. Such approach will contribute to the motivation component of the educational process. Development of the climate and acoustic environment of different accommodation is closely related to the general physics' principles of thermal and acoustic waves' propagation and their interaction with the building enclosing structures. Therefore, a study of some cases describing practical situations occurring in the process of designing buildings and their further consecutive construction could be of particular practical value.

Key words: building physics, thermal resistance, sound insulation, methods of teaching physics

#### REFERENCES

1. Vol'kenshteyn V. C. *Sbornik zadach po obshchemu kursu fiziki* [A problem book in general physics]. Moscow, Nauka Publ., 1969. 463 p.
2. Elakhovskiy D. V., Malinenko I. A. *Fizicheskie osnovy arkhitekturnoy akustiki* [Physical basis for architectural acoustics]. Petrozavodsk, PetrGU Publ., 2008. 130 p.
3. Elakhovskiy D. V., Malinenko I. A. *Fizicheskie osnovy arkhitekturnoy klimatologii* [Physical basis for building climatology]. Petrozavodsk, PetrGU Publ., 2008. 102 p.
4. Elakhovskiy D. V., Nazarov A. I. Methodological approach to teaching physics for undergraduate students of a civil engineering faculty [Metodicheskoe obespechenie prakticheskikh zanyatiy bakalavrov stroitel'noy spetsial'nosti]. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya "Obshchestvennye i gumanitarnye nauki"* [Proceedings of Petrozavodsk State University. Social Sciences and Humanities]. 2015. № 1 (146). P. 45–49.
5. Irodov I. E. *Sbornik zadach po obshchemu kursu fiziki* [A problem book in general physics]. Moscow, Nauka Publ., 1979. 367 p.
6. Nazarov A. M. *Voprosy i zadachi po fizike s proizvodstvennym sodержaniem* [Questions and problems on physics with industrial content]. Moscow, Vyschaya shkola Publ., 1987. 119 p.
7. Novikov S. I. *Sbornik zadach po obshchey fizike* [A problem book in general physics]. Moscow, Mir Publ., 2006. 360 p.
8. Savel'ev I. V. *Sbornik zadach i voprosov po obshchey fizike* [Book of general physics problems and questions]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 340 p.
9. Sivukhin D. V. *Sbornik zadach po obshchemu kursu fiziki* [A problem book in general physics]. St. Petersburg, Lan' Publ., 2006. 405 p.
10. Todes O. M. *Kurs lektsiy i zadach po stroitel'noy fizike* [Course of lectures and tasks on building physics]. Leningrad, 1972. 115 p.
11. Usanov V. V. *Sbornik zadach po fizike dlya stroiteley* [A problem book in general physics for builders]. Moscow, Vyschaya shkola Publ., 1987. 119 p.

Поступила в редакцию 20.07.2015