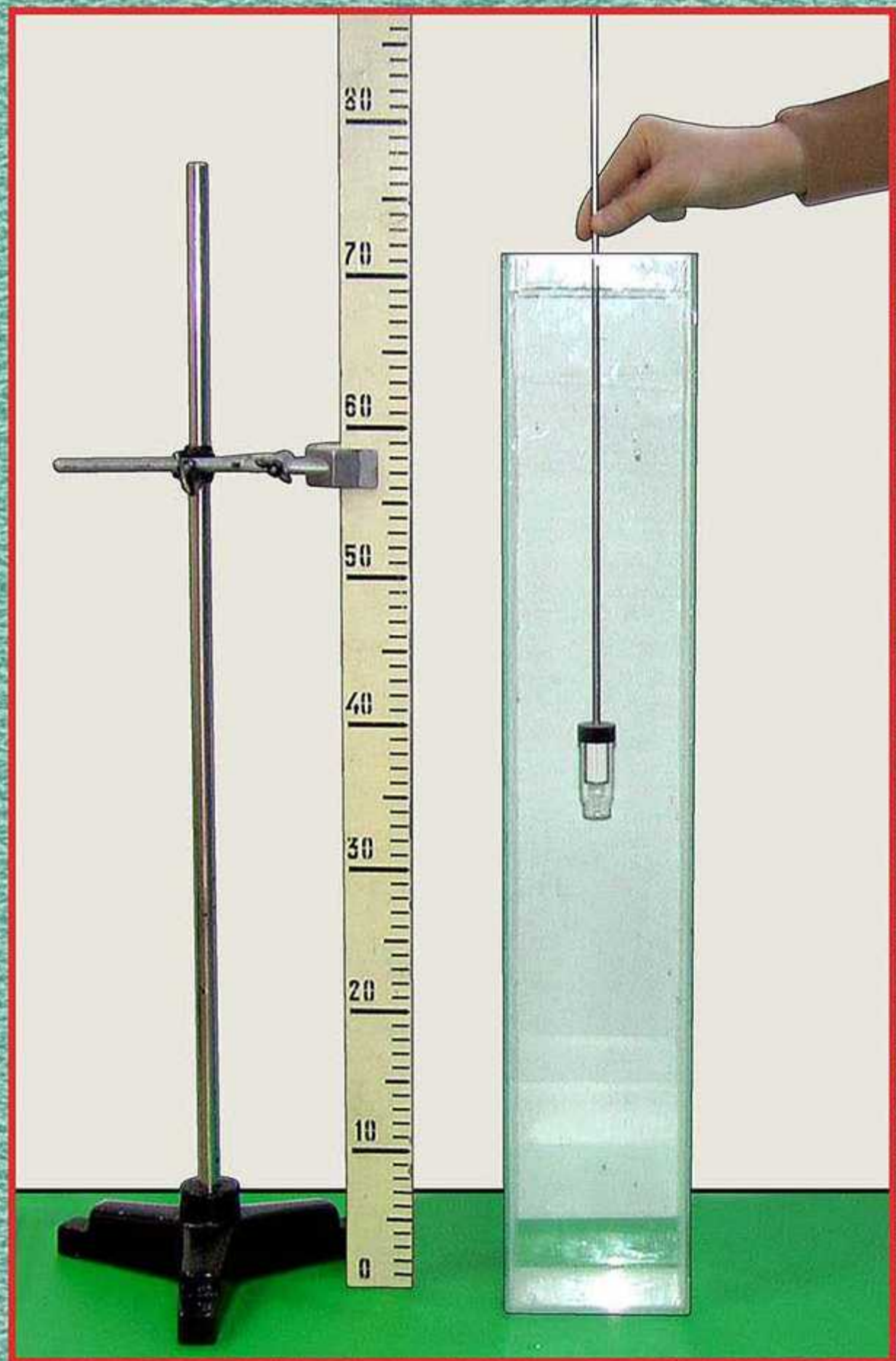


ISSN 2307-5457

# УЧЕБНАЯ ФИЗИКА

**1**  
**2021**



УДК 372.853

Е. И. Варакина

## НАУЧНАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ В УЧЕБНОМ ФИЗИЧЕСКОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ

В статье рассмотрено содержание научной деятельности в области учебного физического эксперимента. Дана краткая характеристика систем демонстрационного и лабораторного вузовского и школьного эксперимента, разработанных в послевоенное время в отечественном физическом образовании. Указаны направления исследований, которые привели к созданию систем новых опытов во второй половине 20 века. Выполнен анализ публикаций по учебному эксперименту в ведущих отечественных и зарубежных научных журналах. Обозначена основная проблема исследовательской деятельности в современном учебном физическом эксперименте.

*Ключевые слова:* учебный физический эксперимент, научная деятельность, демонстрационный эксперимент, лабораторный эксперимент, новизна, публикация.

Под научной деятельностью в учебном физическом эксперименте мы понимаем такую деятельность ученых, методистов, учителей и обучающихся, результатом которой является новое знание о физических приборах, опытах, педагогических технологиях и методиках, предназначенных для обучения физике новых поколений людей. Проблема, решаемая в этой статье, состоит в поиске ответа на вопрос: каковы содержание и основные результаты научных исследований в учебном физическом эксперименте, полученные отечественными учеными в послевоенный период?

**1. Научная деятельность в физической науке и в учебной физике.** Выдающийся экспериментатор, лауреат Нобелевской премии П. Л. Капица, обсуждая более полувека назад проблемы подготовки в нашей стране ученых и организации их труда, обратил внимание на отставание отечественной экспериментальной физики от теоретической по сравнению с зарубежной наукой [1]. «Показателем отставания экспериментальных наук является и то, что молодежь, оканчивающая вузы, стремится идти на теоретические работы» [1, с. 143]. Среди причин П. Л. Капица называет необходимость для эксперимента соответствующей материальной базы и более значительные временные затраты на экспериментальные исследования по сравнению с теоретическими. Кроме того, для достижения успеха в экспериментальной физике требуется глубокое знание не только эксперимента, но и теории. Экспериментальная работа обычно носит коллективный характер и в ней затруднительно выделить «самостоятельного вклада», которое требуется

для защиты диссертации: «Выделение «личной собственности» для защиты диссертации является противоестественным и тормозящим фактором развития коллективной работы» [1, с. 145].

Учебная физика моделирует физическую науку [2], не только содержательно, но и организационно. Поэтому рассмотренные П. Л. Капицей особенности экспериментальной работы полностью относятся и к исследованиям учебного физического эксперимента. Например, необходимость материальной базы, важность учета ее современного состояния понятны из рис. 1.1, на котором показан комплект приборов для получения ультразвука низкой частоты. Без знания теории изгибных волн, владения понятием опорной волны, которые выходят за рамки курсов физики средней школы и педагогического вуза, было бы невозможно создание новой методики экспериментального изучения волнового движения. В ней на основе натурального учебного эксперимента с реальной изгибной волной вводятся и формируются понятия источника волны, бегущей гармонической волны, ее фазы, волновой поверхности, длины волны и скорости распространения (рис. 1.2 и 1.3). В простых и убедительных опытах обучающиеся обнаруживают интерференцию волн и получают стоячую волну (рис. 1.4).

Создание такого учебного эксперимента, который позволяет современными средствами визуализировать бегущую изгибную волну, построить теоретическую модель изучаемого явления и обосновать ее следствия, представляет собой многолетний коллективный труд [3] разных исполнителей: школьников, студентов, лаборантов, учителей, преподавателей вуза, — в котором невозможно выделить личный вклад каждого автора. Эффективность научных исследований в учебном эксперименте только возрастет, если нормой станут коллективные публикации полученных результатов, которые каждый соавтор вправе использовать в дальнейшей своей работе в полном объеме.

## **2. Системы демонстрационного физического эксперимента.**

Очевидной целью демонстрационного опыта является экспериментальное доказательство самого факта существования изучаемого явления и качественное объяснение его физической сущности, то есть создание физической модели этого явления. Кратко рассмотрим основные системы демонстрационного физического эксперимента, разработанные в отечественном физическом образовании в послевоенный период для достижения сформулированной цели.

Начиная с 1948 по 1959 год коллективом авторов Московского государственного университета (МГУ) имени М. В. Ломоносова, в который вошли М. А. Грабовский, А. Б. Млодзеевский, Р. В. Телеснин, М. П. Шаскольская, И. А. Яковлев, издана серия из 9 книг, посвященных демонстрационным физическим экспериментам. В них даны общие указания по постановке демонстрационных опытов и

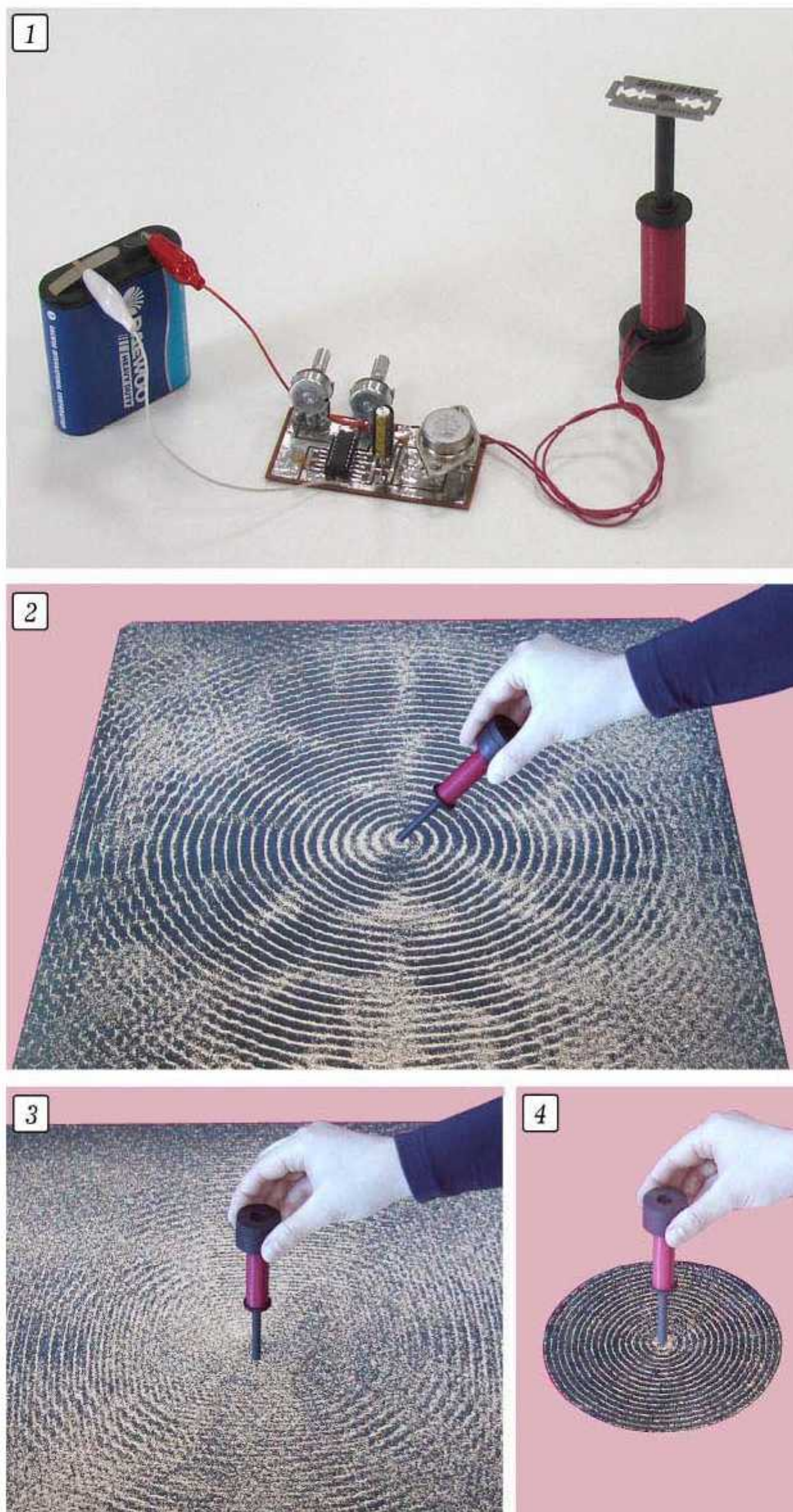


Рис. 1. Исследовательская деятельность в учебном физическом эксперименте с упругими волнами [3]: 1 — простой и доступный генератор ультразвука низкой частоты (необходимость материальной базы); 2 — визуализация поверхностей равных фаз бегущей изгибающей волны (необходимость владения физической теорией); 3 — сложная интерференционная картина (необходимость владения физическим экспериментом); 4 — школьная лабораторная работа по измерению скорости изгибающей волны (необходимость коллективного исследования)

описаны опыты по разделам: молекулярная физика и термодинамика (вып. 1), механика жидкостей и газов (вып. 2), магнетизм (вып. 3), оптика (вып. 4 и 5), электричество (вып. 6), колебания и волны (вып. 7), общая механика (вып. 8), строение атома и ядерные процессы (вып. 9). На основе этих выпусков тем же коллективом авторов впоследствии были созданы знаменитые «Лекционные демонстрации по физике» под редакцией В. И. Ивероновой [4] (рис. 2).

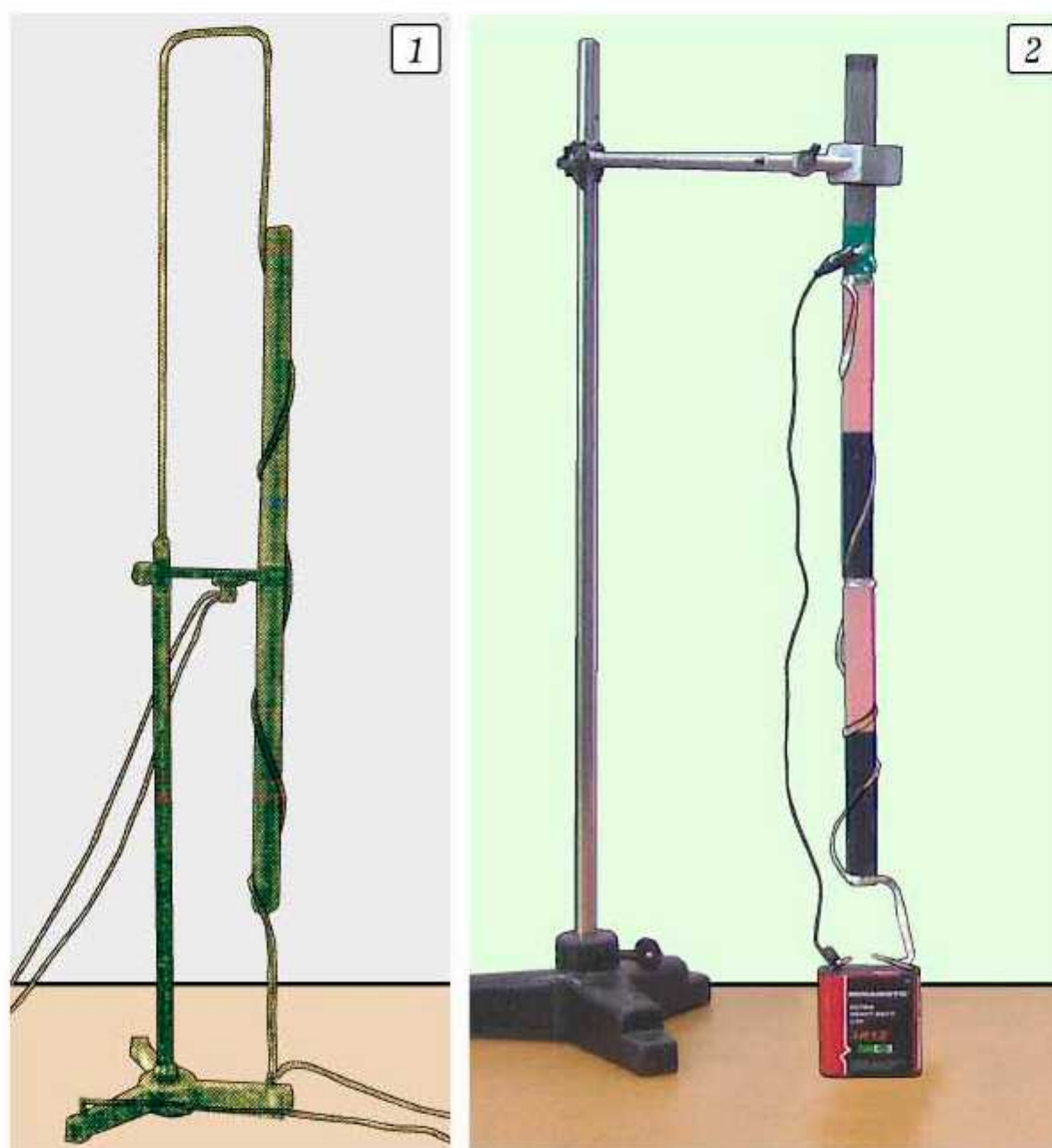


Рис. 2. Совершенствование демонстрационного эксперимента: 1 — эффектная, но малодоступная лекционная демонстрация силы Ампера [4] (в штативе вертикально закреплен электромагнит со стальным сердечником длиной  $\sim 1$  м и диаметром  $\sim 4$  см; обмотка содержит один слой провода диаметром  $\sim 1,5$  мм в двойной шелковой или бумажной изоляции; через обмотку проходит ток силой  $\sim 5$  А; при пропускании тока силой  $\sim 20$  А через висящий рядом с электромагнитом пучок мишуры этот пучок быстро обвивает электромагнит; 2 — современный доступный для воспроизведения даже в основной школе вариант опыта [5]

В 1971–72 гг. под редакцией А. А. Покровского выпущено второе издание двухтомника «Демонстрационный эксперимент по физике в старших классах средней школы» [6, 7]. Это пособие стало по крайней мере на три десятилетия настольной книгой учителя физики. Авторы пособия В. А. Буров, Б. С. Зворыкин,

А. П. Кузьмин, А. А. Покровский, И. М. Румянцев активно работали в различных областях школьного демонстрационного эксперимента, опубликовали оригинальные исследования и защитили кандидатские диссертации. На содержание обсуждаемого пособия большое влияние оказали «Лекционные демонстрации по физике» В. И. Ивероновой [4], а также вышедшие в переводе в 1959–67 годах шесть томов под общим названием «Эксперимент по курсу элементарной физики» Р. Гирке и Г. Шпрокхофа [8–13]. Таким образом, школьный курс физики к началу 70-х годов был обеспечен руководством по современному демонстрационному эксперименту, опирающемуся на лекционные демонстрации университетского уровня и наиболее прогрессивную зарубежную методическую систему школьных опытов.

Заметный след в дидактике физики оставили системы школьных демонстрационных опытов по электродинамике, разработанные Н. М. Шахмаевым и С. Е. Каменецким [14, 15]. Кроме того Н. М. Шахмаев разработал оригинальную систему опытов по колебаниям и волнам, а также вместе с соавторами выпустил ряд книг, содержащих описания демонстрационных опытов по всем разделам школьного курса физики [16–18].

**3. Системы лабораторного физического эксперимента.** Лабораторный практикум имеет своей целью экспериментальное обоснование справедливости учебной физической теории. Поэтому описания работ или задач практикума содержат две части: 1) краткое изложение физической теории изучаемого явления; 2) инструкцию по выполнению учебного физического эксперимента.

Таким образом, совокупность демонстрационного эксперимента, учебной физической теории и лабораторных опытов при обучении физике в высшей и средней школе многократно реализует известный цикл научного познания *факты* → *модель* → *следствия* → *эксперимент*, который в явном виде введен в дидактику физики В. Г. Разумовским [19].

Лабораторный эксперимент университетского уровня совершенствовался параллельно с развитием демонстрационного эксперимента. Здесь в первую очередь необходимо отметить вышедший в 1967–68 гг. в двух томах «Физический практикум» под редакцией В. И. Ивероновой (авторы А. Г. Белянкин, Г. П. Мотулевич, Е. С. Четверикова, И. А. Яковлев) [20, 21]. Первый том объемом 352 страницы посвящен механике (рис. 3, 4) и молекулярной физике, во втором томе объемом 818 страниц представлены лабораторные работы по электричеству и оптике. В «Физическом практикуме» сконцентрированы лучшие лабораторные эксперименты, разработанные сотрудниками МГУ и внедренные в практику изучения общей физики ведущего университета страны.

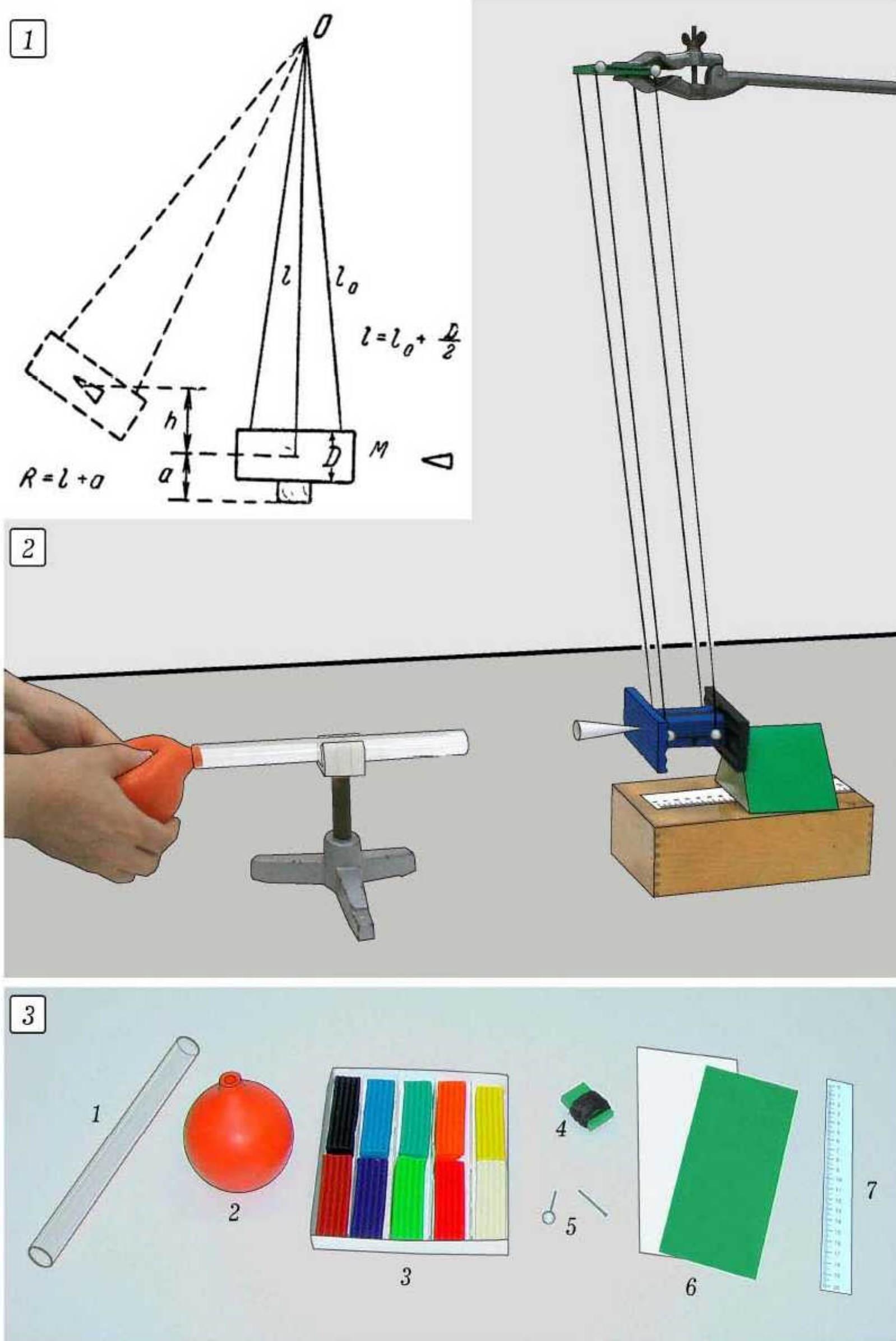


Рис. 3. Совершенствование лабораторного эксперимента по измерению скорости снаряда методом баллистического маятника: 1 — иллюстрация из физического практикума [20, с. 129]; 2 — установка для школьной лабораторной работы (конструкция маятника взята из Интернет-ресурса [22]); 3 — оборудование для организации проектной деятельности школьников по учебному исследованию баллистического метода определения скорости снаряда [23]

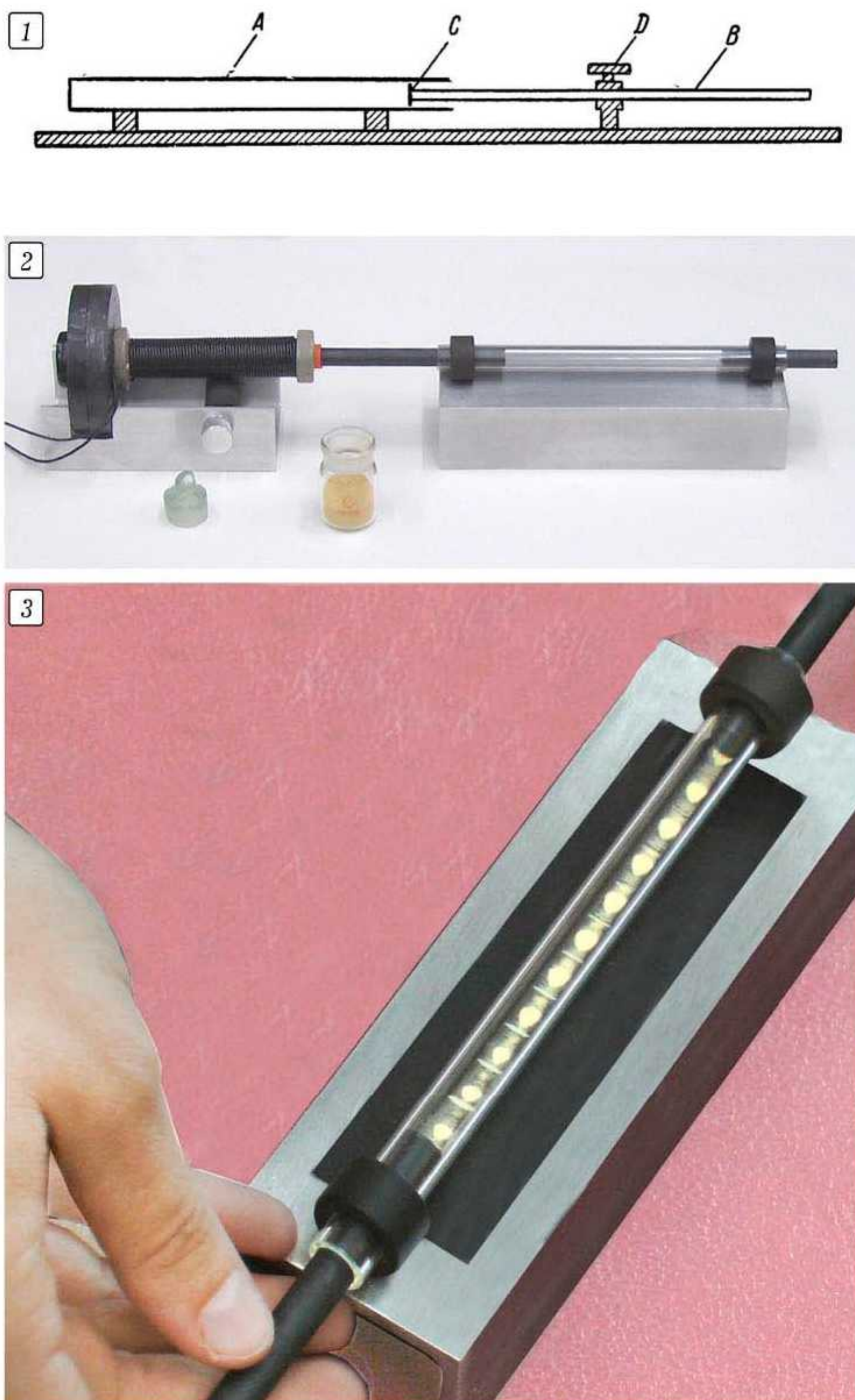


Рис. 4. Совершенствование лабораторного эксперимента по определению скорости звука в упругих средах [20, с. 176–178]: 1 — схема экспериментальной установки университетского уровня [20, с. 177]; 2 — современная экспериментальная установка для школьного практикума; 3 — практический выход проектной деятельности учащихся по исследованию стоячей ультразвуковой волны в воздухе [24]



Физический практикум под названием «Лабораторные занятия по физике» создан в 1983 г. коллективом авторов Московского физико-технического института (МФТИ), в который вошли Л. Л. Гольдин (редактор), Ф. Ф. Игошин, С. М. Козел, В. В. Можяев, Л. В. Ногинова, Ю. А. Самарский, А. В. Францессон [25]. Вводная часть книги содержит рекомендации по обработке результатов эксперимента и описания нескольких лабораторных работ, целью которых является усвоение этих рекомендаций. Остальное содержание включает лабораторные работы по механике, молекулярной физике и термодинамике, электричеству и магнетизму, оптике и атомной физике, ядерной физике, физике твердого тела.

Физические практикумы МГУ и МФТИ явились образцом для целой серии практикумов, предназначенных для экспериментального изучения основ физики в технических [26–28], медицинских [29], педагогических [30, 31] и военных вузах. Они оказали значительное влияние также на практикумы по физике в средних учебных заведениях. Здесь мы отметим только «Практикум по физике в средней школе» (под ред. А. А. Покровского, 1963 г.) [32]; «Физический практикум. Факультативный курс (автор Л. И. Анциферов, 1972 г.) [33]; «Практикум по физике в средней школе» (под редакцией В. А. Бурова и Ю. И. Дика, 1987 г.) [34], «Физический практикум для классов с углубленным изучением физики» (под редакцией Ю. И. Дика и О. Ф. Кабардина, 1993 г.) [35].

Заслуживают внимания также предназначенные для формирования у студентов педагогических вузов экспериментальных умений будущего учителя физики «Практикум по школьному физическому эксперименту» (авторы: А. А. Марголис, Н. Е. Парфентьева, Л. А. Иванова, И. И. Соколов; 1968 г.) [36, 37] и «Практикум по методике и технике школьного физического эксперимента» (авторы: Л. И. Анциферов и И. М. Пищиков, 1984 г.) [38].

**4. Новые системы демонстрационного эксперимента.** Важнейшее значение для развивающейся в послевоенное время дидактики физики имели созданные рядом авторов системы демонстрационных опытов, отличающихся *объективной новизной*. Таких опытов раньше в практике обучения физике не было, они позволили воспроизводить, наблюдать и изучать такие физические явления, которые прежде изучались лишь на умозрительном уровне по описаниям и картинкам в учебниках.

В 1952 г. была издана книга Г. А. Рязанова «Лекционные опыты по теории электромагнитного поля» [39], характерной особенностью которой является единство учебного эксперимента и учебной теории, реализованное на уровне вузовского курса общей физики. Все представленные в этой книге демонстрационные опыты являлись для того времени новыми. Во введении к книге кратко об-

суждается методология разработанного эксперимента. Далее даны указания относительно необходимого для постановки опытов оборудования. Затем идет большая глава, посвященная исследованию магнитного поля вещества методом электромагнитной индукции. В следующих главах описаны лекционные демонстрации силы Лоренца, индукционного электрического поля, магнитного поля в однородном и неоднородном магнетиках, напряженности магнитного поля и нескольких дополнительных опытов. Таким образом, разработанный Г. А. Рязановым демонстрационный эксперимент охватывает значительную часть физических явлений классической электродинамики.

В 1960 г. вышла в свет предназначенная для школьного учителя физики книга Н. М. Шахмаева «Основные демонстрации при изучении электромагнитного поля» [40]. Разработанные автором новые опыты предназначены для демонстрации физических явлений при изучении электростатического поля, магнитного поля постоянного тока, явления электромагнитной индукции, квазистационарного и переменного электромагнитного поля. В отличие от предыдущей, предложенная Н. М. Шахмаевым система демонстрационных опытов обеспечивает экспериментальное изучение в школе всей классической электродинамики. Книга содержит описание целой серии новых физических приборов для учебного эксперимента, часть из которых после доработки и совершенствования выпускала промышленность. К ним относятся, например, высоковольтный выпрямитель, демонстрационный осциллограф и знаменитый «комплект Шахмаева» для демонстрационных опытов с сантиметровыми электромагнитными волнами.

В 1966 г. вышло первое и уже в 1971 г. потребовалось второе издание книги Б. Ш. Перкальскиса «Использование современных научных средств в физических демонстрациях» [41]. Это фундаментальное исследование демонстрационного эксперимента университетского уровня, отличительной особенностью которого является объективная новизна полученных и систематизированных результатов. Конкретно в книге рассмотрены демонстрационные опыты по механике и молекулярной физике, по колебаниям, акустике, электричеству и магнетизму, по оптике, электромагнитным волнам сантиметрового диапазона, по атомной и ядерной физике. В ней описаны многочисленные физические приборы, среди которых выделяются демонстрационный осциллограф, двухлучевые и многолучевые интерферометры, голографическая установка, оборудование для опытов с сантиметровыми радиоволнами. Спустя почти два десятилетия эти результаты были дополнены новыми и представлены в монографии «Волновые явления и демонстрации по курсу физики» [42].

Здесь следует отметить, что в 1966 г. Б. Ш. Перкальскис получил степень кандидата педагогических наук по результатам защиты диссертации «Использование некоторых современных научных и технических средств в физических демонстрациях» [43], а в 1974 г. ему была присуждена степень доктора физико-математических наук за диссертацию «Методика демонстраций по общей теории колебаний и волн и их роль в курсе физики» [44]. Насколько нам известно, это единственный случай, когда в отечественной физической науке докторская степень была присуждена за исследование учебного эксперимента.

Начиная с 60-х годов новые учебные эксперименты по волновой оптике разрабатывает Я. Е. Амстиславский. Полученные результаты он публикует в ведущих научных и научно-методических журналах страны: «Успехи физических наук», «Оптика», «Известия вузов», «Физика в школе». Итогом этой работы явилось его кандидатское исследование [45], посвященное совершенствованию эксперимента по волновой оптике в курсе физики педагогического вуза. Большой интерес представляет монография Я. Е. Амстиславского «Светосильные учебные эксперименты по волновой оптике» [46], опубликованная в 1985 году. Эта книга содержит системное изложение оригинального учебного физического эксперимента по интерференции, дифракции, поляризации света и другим волновым явлениям. Точные описания опытов сопровождаются строгой физической теорией и проиллюстрированы прекрасными фотографиями ярких интерференционных и дифракционных картин большого размера.

Уникальное явление в дидактике физики представляет вышедшая в 1972 г. книга М. И. Гринбаума «Самодельные приборы по физике» [47]. В ней подробно изложены конструкции, технологии изготовления и методика использования для постановки учебных экспериментов оригинальных физических приборов. К ним относятся: комплект приборов по электродинамике, универсальный усилитель для школьного гальванометра, электронный стробоскоп, электронный счетчик-секундомер, звуковой генератор, электронный четырехканальный коммутатор, демонстрационный тахометр, демонстрационный акселерометр, приставка для изучения основ телевидения, тензометрические весы, анализатор звука, модели электровакуумных диода и триода, школьная замкнутая телевизионная установка.

Системы новых демонстрационных опытов, предназначенных для организации учебно-исследовательской проектной деятельности в области учебного физического эксперимента, реализованы в серии книг В. В. Майера, опубликованных в 80-е годы издательством «Наука»: «Простые опыты с ультразвуком» [48], «Простые опыты по криволинейному распространению света» [49], «Простые

опыты со струями и звуком» [50], «Полное отражение света в простых опытах» [51], «Кумулятивный эффект в простых опытах» [52]. Содержание этих книг не привязано к программам вузовского и школьного курсов физики. Предлагаемые в каждой из них экспериментальные исследования физических явлений относятся к одной из практически значимых областей физики и техники. Самостоятельно или под руководством учителя воспроизводя и исследуя эти явления, заинтересованные школьники прочно усваивают и уверенно применяют изучаемые в школе физические понятия и законы.

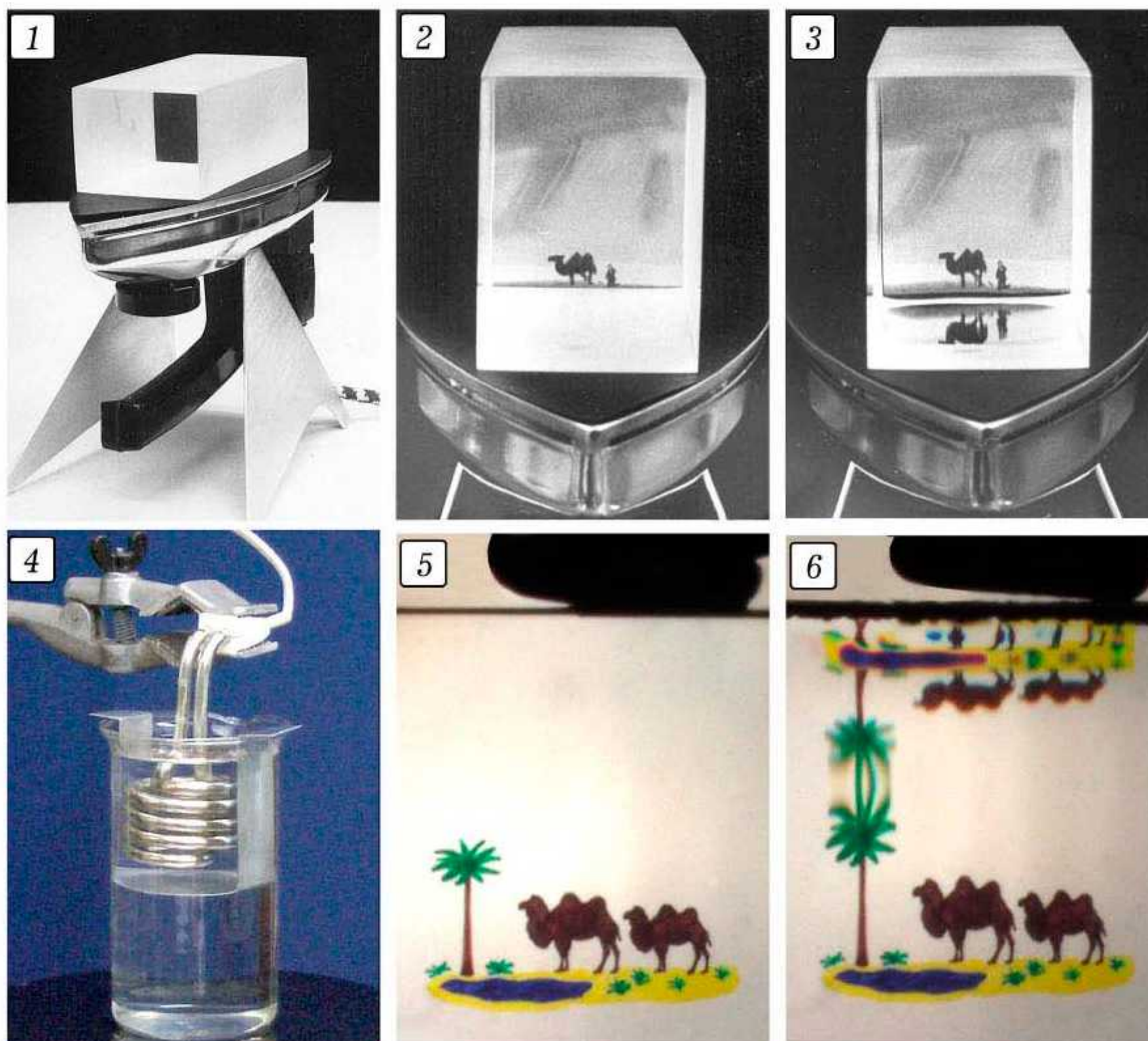


Рис. 5. Совершенствование учебного эксперимента по моделированию миража [49]: 1 — экспериментальная установка для наблюдения миража в неравномерно нагретом оргстекле; 2 — нагреватель выключен; 3 — нагреватель включен, постепенно появляется нижний мираж; 4 — более простая и доступная установка для моделирования миража в воде, неравномерно нагретой кипятильником; 5 — нижняя часть стакана с водой отделена от кипятильника тонкой алюминиевой перегородкой, за стаканом расположен рисунок, напоминающий о пустыне; 6 — при включении кипятильника вода под перегородкой нагревается, и появляется верхний мираж [53]

**5. Научная публикация как основной стимул инновационной деятельности в области учебного эксперимента.** Ведущим отечественным научным журналом по физике по праву считается журнал «Успехи физических наук» (УФН), который издается с 1918 года. Во вступительной статье первого номера [54] раскрыты проблемы, на решение которых нацелен журнал. Сначала говорится о проблеме «оторванности» [55] российской науки от мировой, а затем указано: «Неблагоприятным условием, мешающим интенсивному развитию научной деятельности в России, является бедность литературы по текущим вопросам физики, так что приступающие к ученой деятельности молодые люди лишены возможности следить за успехами, как русской, так и международной науки, не будучи в достаточной степени подготовлены к чтению специальных журналов» [54]. В заключение говорится, что журнал предназначен «...для ознакомления физиков, химиков, биологов, техников и преподавателей с современными успехами и задачами исследований в физике и соприкасающихся областях знания. Являясь обзорным журналом и заключая статьи, написанные специалистами, «Успехи физических наук» будут включать, кроме того, рефераты журнальных статей, библиографию и отдел *personalia*».

В послевоенные годы журнал УФН в разделе «Методические заметки» систематически публиковал небольшие статьи, посвященные новым учебным приборам и новым физическим опытам. Получительно ознакомиться с этими статьями, чтобы понять, какое место занимали проблемы учебного физического эксперимента в физическом образовании второй половины прошлого века. Чтобы представить содержание опубликованных материалов, ниже дается их обзор за несколько выбранных лет. Шрифтом в этом обзоре выделены названия работ, которые содержат указание на то, что статья посвящена новому учебному эксперименту.

В рубрике «Методические заметки» журнала «Успехи физических наук» за десятилетие 1950–1959 гг. опубликованы 7 статей, из них 6 посвящены лекционным демонстрациям [56].

1. Шапошников И. Г. О некоторых гидродинамических величинах для смеси // УФН. — 1952. — Т. 48. — С. 119–122.
2. Волкова А. Я., Малов Н. Н., Яшкин А. Я. Некоторые лекционные демонстрации по курсу экспериментальной физики // УФН. — 1952. — Т. 48. — С. 123–128.
3. Максимов Я. С. Демонстрации по ультразвуку // УФН. — 1953. — Т. 50. — С. 433–438.
4. Эткин В. С. Учебная демонстрация частотно-модулированных колебаний // УФН. — 1954. — Т. 52. — С. 311–313.
5. Грабовский М. А., Егоров В. С. Несколько демонстрационных опытов по общему курсу физики // УФН. — 1957. — Т. 63. — С. 813–818.
6. Кармен К. Н. Лекционные демонстрации по сегнетоэлектричеству в курсе общей физики // УФН. — 1957. — Т. 63. — С. 819–823.
7. Ерофеев В. И., Рубцов В. К., Усагин С. И. Новый демонстрационный прибор // УФН. — 1958. — Т. 66. — С. 519–521.

За два года в течение 1963–64 гг. опубликованы уже 20 статей, 19 из которых посвящены новым демонстрационным опытам, и только одна в названии не содержит указания на учебный эксперимент, но он в ней присутствует.

1. Капцов Л. Н. Лекционная демонстрация пондеромоторных сил в электростатике при помощи мыльной пленки // УФН. — 1963. — Т. 79. — С. 741–742.
2. Перкальскис Б. Ш. Простая демонстрация сложения гармонических колебаний // УФН. — 1963. — Т. 79. — С. 743–743.
3. Перкальскис Б. Ш., Ларин В. Л. Демонстрационный интерферометр Фабри–Перо // УФН. — 1963. — Т. 79. — С. 743–745.
4. Трофимов В. А., Семенов В. В. Несколько лекционных демонстраций // УФН. — 1963. — Т. 79. — С. 745–749.
5. Стрелков С. П. Демонстрация роли осей «свободного вращения» тела // УФН. — 1963. — Т. 81. — С. 763–763.
6. Капцов Л. Н. Четыре лекционные демонстрации по курсам теории колебаний и радиотехники // УФН. — 1963. — Т. 81. — С. 763–771.
7. Перкальскис Б. Ш. Несколько демонстраций по курсу физики // УФН. — 1963. — Т. 81. — С. 771–773.
8. Перкальскис Б. Ш., Ларин В. Л. Лекционные демонстрации с сантиметровыми волнами // УФН. — 1963. — Т. 81. — С. 773–774.
9. Гаврик В. Я. Маятник с жидким наполнителем — прибор для демонстрации суточного вращения Земли // УФН. — 1963. — Т. 81. — С. 774–777.
10. Серков В. В. Об одной задаче по эффекту Холла (Гальваномагнитный «парадокс») // УФН. — 1964. — Т. 82. — С. 161–163. (Статья содержит описание оригинального эксперимента.)
11. Амстиславский Я. Е. Опыты по френелевой дифракции от узкого прозрачного кольца в непрозрачном экране // УФН. — 1964. — Т. 82. — С. 163–166.
12. Кириллов В. А., Твердохлебов В. И., Хоменко В. И. Демонстрационный опыт с зональной пластинкой // УФН. — 1964. — Т. 82. — С. 166–167.
13. Перкальскис Б. Ш. Пластинка Люммера–Герке для учебных целей // УФН. — 1964. — Т. 82. — С. 769–770.
14. Куду К. Ф. Высокочастотный демонстрационный индикатор излучений // УФН. — 1964. — Т. 82. — С. 770–771.
15. Амстиславский Я. Е. Лекционная демонстрация опыта Юнга // УФН. — 1964. — Т. 83. — С. 571–573.
16. Малов Н. Н., Козлова А. Н. Новые демонстрации по физике // УФН. — 1964. — Т. 84. — С. 521–525.
17. Скрипов В. П., Синицын Е. Н. Опыты с перегретой жидкостью // УФН. — 1964. — Т. 84. — С. 727–729.
18. Байбулатов Ф. Х. Демонстрация эффекта Доплера в акустике // УФН. — 1964. — Т. 84. — С. 729–730.
19. Баранский К. Н., Кожаткин В. А., Вадковский В. Н. Новые демонстрации по курсу электричества // УФН. — 1964. — Т. 84. — С. 730–731.
20. Перкальскис Б. Ш., Ларин В. Л. Самодельный интерферометр Майкельсона для учебных целей // УФН. — 1964. — Т. 83. — С. 371–373.

Спустя три десятка лет, ситуация выглядит совсем иначе: в разделе «Методические заметки» за два года (1990–91) опубликованы уже 25 статей, но новые учебные опыты рассматриваются только в двух публикациях.

1. Тарновский А. С. Правило квантования Бора–Зоммерфельда и квантовая механика // УФН. — 1990. — Т. 160(1). — С. 155–156.
2. Караханова Х. М., Ковязин Л. М., Трофимов В. А. Демонстрация закона электромагнитной индукции // УФН. — 1990. — Т. 160(3). — С. 145–148.

3. Платонов К. Ю., Топтыгин И. Н., Флейшман Г. Д. Излучение частиц в средах с неоднородностями и когерентное тормозное излучение // УФН. — 1990. — Т. 160(4). — С. 59–69.
4. Чермянин С. И. Однозначность предсказаний в общей теории относительности // УФН. — 1990. — Т. 160(5). — С. 127–131.
5. Болотовский Б. М., Быков В. П. Излучение при сверхсветовом движении зарядов // УФН. — 1990. — Т. 160(6). — С. 141–161.
6. Логунов А. А. Релятивистская теория гравитации // УФН. — 1990. — Т. 160(8). — С. 135–145.
7. Грищук Л. П. Общая теория относительности — знакомая и незнакомая // УФН. — 1990. — Т. 160(8). — С. 147–160.
8. Тарновский А. С. О представлении квантовой механики // УФН. — 1990. — Т. 160(10). — С. 173–178.
9. Фридман А. М. Модифицированный критерий Ландау стабилизации неустойчивости тангенциального разрыва скорости в сжимаемой среде // УФН. — 1990. — Т. 160(10). — С. 179–183.
10. Трубников Б. А. О возможной генерации космических лучей в плазменных пинчах // УФН. — 1990. — Т. 160(12). — С. 167–186.
11. Варданян Г. А., Мкртчян Г. С. Об одном решении уравнения для матрицы плотности // УФН. — 1990. — Т. 160(12). — С. 187–188.
12. Бершадский А. Г. Крупномасштабные фрактальные структуры в лабораторной турбулентности, океане и астрофизике // УФН. — 1990. — Т. 160(12). — С. 189–194.
13. Флейшман Г. Д. Переходное излучение релятивистской частицы, движущейся по кривой // УФН. — 1991. — Т. 161(1). — С. 165–185.
14. Быков В. П., Татарский В. И. Теория возмущений для резольвенты применительно к задачам теории излучения // УФН. — 1991. — Т. 161(2). — С. 125–160.
15. Ландсберг Г. Л. Компьютерные вирусы и методы борьбы с ними // УФН. — 1991. — Т. 161(2). — С. 161–191.
16. Кривицкий В. С., Цытович В. Н. О средней силе радиационного трения в квантовой электродинамике // УФН. — 1991. — Т. 161(3). — С. 125–141.
17. Ривлин Л. А. Энергия образования волновода как мера его критической частоты // УФН. — 1991. — Т. 161(3). — С. 143–148.
18. Майер В. В., Майер Р. В. Демонстрация акустического эффекта Допплера // УФН. — 1991. — Т. 161(3). — С. 149–153.
19. Рухадзе А. А., Соболев Н. Н., Соколов В. В. Подобие низкотемпературных неизотермических разрядов // УФН. — 1991. — Т. 161(9). — С. 195–199.
20. Ланда П. С., Марченко В. Ф. К линейной теории волн в средах с периодической структурой // УФН. — 1991. — Т. 161(9). — С. 201–209.
21. Быков В. П. Основные особенности сжатого света // УФН. — 1991. — Т. 161(10). — С. 145–173.
22. Соколов И. В. Момент импульса электромагнитной волны, эффект Садовского и генерация магнитных полей в плазме // УФН. — 1991. — Т. 161(10). — С. 175–190.
23. Любошиц В. Л., Подгорецкий М. И. О силе Архимеда, действующей на отдельные молекулы вещества во внешнем поле // УФН. — 1991. — Т. 161(11). — С. 129–150.
24. Раутиан С. Г. Диффузионное приближение в задаче о миграции частиц в газе // УФН. — 1991. — Т. 161(11). — С. 151–170.
25. Трубников Б. А. Перетяжки на релятивистском пинче с продольным магнитным полем // УФН. — 1991. — Т. 161(11). — С. 171–176.

Наконец, в 2020 году в «Методических заметках» представлены 14 статей, то есть несколько больше, чем ранее публиковалось ежегодно. Но среди них нет ни одной, посвященной учебному физическому эксперименту.

1. Гупалов С. В. Классические задачи теории упругости и квантовая теория углового момента // УФН. — 2020. — Т. 190. — С. 63–72.

2. Пронских В. С. Проблемы измерений: современные дискуссии и модели // УФН. — 2020. — Т. 190. — С. 211–219.
3. Потылицын А. П., Сергеева Д. Ю., Стриханов М. Н., Тищенко А. А. Дифракционное излучение заряда как излучение сверхсветового источника в вакууме // УФН. — 2020. — Т. 190. — С. 329–335.
4. Гинзбург И. Ф. Частицы в конечных и бесконечных одномерных периодических цепочках // УФН. — 2020. — Т. 190. — С. 429–440.
5. Стурман Б. И. Баллистический и сдвиговый токи в теории фотогальванического эффекта // УФН. — 2020. — Т. 190. — С. 441–445.
6. Франк А. И. Взаимодействие волны с ускоряющимся объектом и принцип эквивалентности // УФН. — 2020. — Т. 190. — С. 539–541.
7. Ритус В. И. Обобщение метода коэффициента  $k$  в теории относительности на произвольный угол между скоростью наблюдателя (источника) и направлением луча света от далекого неподвижного источника (к далекому неподвижному наблюдателю) // УФН. — 2020. — Т. 190. — С. 648–657.
8. Дзарахохова А. С., Зарецкий Н. П., Максимычев А. В., Меньшиков Л. И., Меньшиков П. Л. Тождественность механизмов плазменных неустойчивостей Вайбеля и альвеновской циклотронной // УФН. — 2020. — Т. 190. — С. 658–663.
9. Кардашёв Н. С., Новиков И. Д., Репин С. В. Кротовые норы с близкими друг от друга входами // УФН. — 2020. — Т. 190. — С. 664–668.
10. Петров С. В. Ошибался ли Зоммерфельд? (К истории появления спина в релятивистских волновых уравнениях) // УФН. — 2020. — Т. 190. — С. 777–780.
11. Виноградов Е. А. Оптические фононы с отрицательной силой осциллятора // УФН. — 2020. — Т. 190. — С. 829–835.
12. Тодышев К. Ю. Измерение инклюзивного сечения  $e^+e^-$ -аннигиляции в адроны в предасимптотической области энергий // УФН. — 2020. — Т. 190. — С. 995–1005.
13. Гаранин С. Ф., Кузнецов С. Д. Обтекание потенциальным течением (магнитным полем или несжимаемой жидкостью) экрана с отверстием // УФН. — 2020. — Т. 190. — С. 1109–1114.
14. Белинский А. В. Парадокс друга Вигнера: объективной реальности не существует? // УФН. — 2020. — Т. 190. — С. 1335–1342.

Анализ публикаций в разделе «Методические заметки» журнала УФН показывает, что в послевоенное время количество экспериментальных статей непрерывно росло вплоть до середины 80-х годов (рис. 6). Затем оно резко пошло на убыль и к настоящему времени работы в области учебного физического эксперимента практически отсутствуют. Большое внимание к учебному эксперименту ведущего журнала страны в 50–70-е годы прошлого столетия несомненно свидетельствует о высоком статусе научной деятельности в учебном физическом эксперименте в указанный период развития физического образования.

Отсутствие учебного эксперимента на страницах журнала УФН в настоящее время лишь отчасти компенсирует журнал «Физическое образование в вузах». Насколько нам известно, он задумывался как альтернатива «Методическим заметкам» журнала УФН и действительно систематически печатает работы по результатам исследований учебного физического эксперимента. Однако современные требования к преподавателям вузов таковы, что вынуждают их для публикации результатов исследований искать журналы,



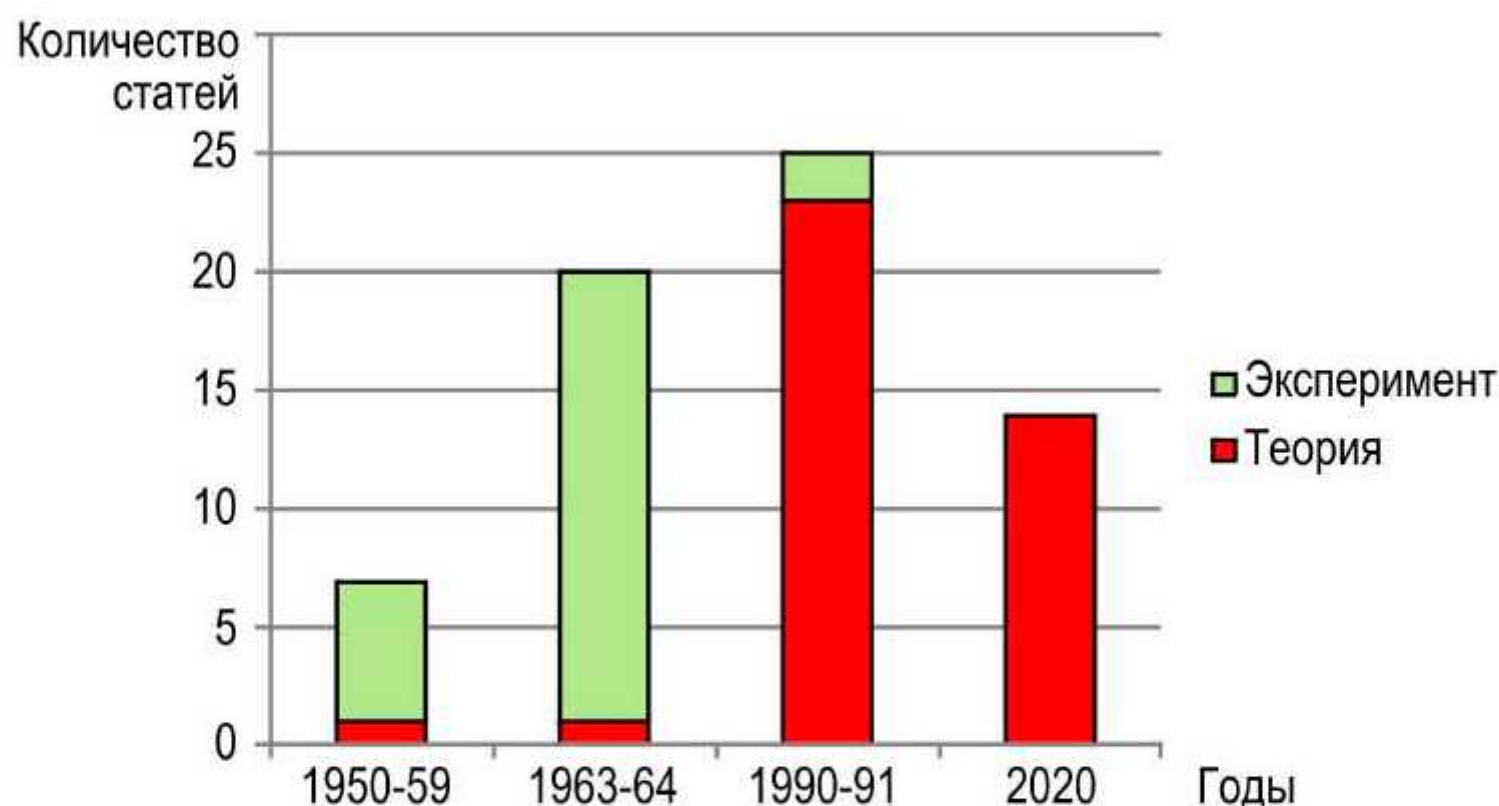


Рис. 6. Количество публикаций в рубрике «Методические заметки» журнала «Успехи физических наук». Зеленым (светлым) цветом обозначены статьи, содержащие учебный физический эксперимент

входящие в базы данных *Web of Science* или *Scopus*, а их проще всего найти за рубежом.

**6. Новый учебный физический эксперимент в ведущих отечественных изданиях.** В отечественных журналах, непосредственно посвященных проблемам физического образования, также ощущается уменьшение доли статей, посвященных учебному физическому эксперименту.

Главным и наиболее авторитетным журналом по проблемам школьного физического образования является журнал «Физика в школе». Анализ содержания журнала позволяет заметить, что в последние десятилетия количество статей, связанных с новым учебным экспериментом, несколько снизилось. Это говорит о дефиците соответствующих исследований в отечественной дидактике физике, изменении приоритетов в профессиональной деятельности учителей физики, снижении внимания к эксперименту в подготовке учителя в педагогическом вузе, отсутствии квалификационных требований в области учебного физического эксперимента и малочисленности новых поколений ученых–экспериментаторов.

Ранее на протяжении многих лет совершенствование приборов и учебных опытов было важнейшей составляющей профессиональной деятельности учителя физики. Содержание сборников «Физический эксперимент в школе» и журнала «Физика в школе» показывает наличие значительного количества публикаций в области нового учебного физического эксперимента и новых приборов, авторами которых являются учителя физики.

В предисловии к третьему выпуску сборника «Физический эксперимент в школе» его составитель С. Я. Шамаш пишет: «Развитие

школьного эксперимента является одной из актуальных задач совершенствования преподавания физики и астрономии. В процессе решения этой важной задачи передовые учителя непрерывно разрабатывают новые демонстрационные опыты и лабораторные работы, конструируют новые приборы и вносят усовершенствования к имеющемуся оборудованию» [57, с. 2]. Далее в предисловии отмечается, что содержание выпусков обсуждаемого сборника составляют работы, представленные в журнал «Физика в школе», «но не опубликованные из-за ограниченного объема этого журнала». Таким образом, даже несмотря на развитую систему учебного эксперимента, обеспеченную надежным, системно обновляемым оборудованием, учителя физики и методисты осознавали актуальность работы по совершенствованию известного и созданию нового учебного физического эксперимента.

**7. Новый учебный физический эксперимент в зарубежных журналах.** Здесь мы можем только бегло представить наиболее авторитетные зарубежные журналы по проблемам физического образования, входящие в наукометрические системы *Web of Science* и *Scopus*.

Американская ассоциация преподавателей физики много десятилетий издает журнал *American Journal of Physics* [58]. Этот журнал — Американский журнал физики — публикует результаты исследований ученых, относящиеся к изучению физики в высшей школе. Теоретический уровень публикаций достаточно высок, но значительное число статей связано с учебным лабораторным и демонстрационным экспериментом. В журнале имеются рубрики *Apparatus and Demonstration Notes* или *Instructional Laboratories and Demonstrations*, которые включают работы по учебному физическому эксперименту. Они содержат функциональные схемы экспериментальных установок, схемы электронных приборов, фотографии результатов опытов, таблицы, графики и другую информацию. В качестве примера: в 2016 году в рубрике *Apparatus and Demonstration Notes* опубликованы 10 статей, а в 2020 году в рубрике *Instructional Laboratories and Demonstrations* опубликованы 11 статей. Работы, рассматривающие результаты учебного физического эксперимента, встречаются и в других рубриках журнала.

В Европе выходят журналы *European Journal of Physics* [59] и *Physics Education* [60], которые также посвящены проблемам физического образования. Значительная доля публикаций в них связана с новым учебным физическим экспериментом и новыми методиками изучения физических явлений средствами эксперимента.

**8. Заключение.** В послевоенный период произошел бурный рост научных исследований учебного физического эксперимента.

По всем разделам физики разрабатывались новые демонстрационные опыты, позволяющие увидеть такие физические явления, которые до этого изучались только умозрительно. Создавались новые лабораторные эксперименты для количественного исследования явлений физики. Конструировались системы учебного эксперимента, дающие экспериментальное обоснование фундаментальных физических теорий. Учебный эксперимент осваивал такие достижения физической науки, как кумулятивный эффект, ультразвука, термоакустика, полупроводники, техника СВЧ, лазерная техника, голография, градиентная оптика, ядерная физика и др. Были созданы и внедрены в учебный процесс средней школы комплекты приборов по механике, молекулярной физике, электродинамике, оптике и квантовой физике.

Очевидна общая тенденция этого процесса: основная цель научных исследований послевоенного периода в учебном физическом эксперименте заключалась в обеспечении цикла научного познания *факты* → *модель* → *следствия* → *эксперимент* простыми и доступными для воспроизведения физическими опытами. В итоге на основе нового эксперимента были созданы новые технологии и методики обучения физике.

Однако в последнее двадцатилетие научная активность в учебном эксперименте заметно снизилась. Несмотря на возросшие возможности публикации результатов исследований, количество научных работ в области учебного эксперимента уменьшается. Обозначилось и углубляется противоречие между необходимостью активизации научной деятельности в учебном физическом эксперименте и снижением статуса этой деятельности не только в физической науке, но и в теории и методике обучения физике. Поэтому одной из актуальных проблем является разработка методологии научных исследований в области учебного физического эксперимента, обеспечивающей повышение качества профессиональной подготовки и профессиональной деятельности учителя и преподавателя физики.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-013-00157. *Acknowledgments:* The reported study was funded by RFBR, project number 20-013-00157.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Капица П. Л. Эксперимент. Теория. Практика. — М.: Наука, 1977. — 352 с.
2. Майер В. В. Новые элементы учебной физики как основа организации научного познания в современной системе физического образования: дис. . . . д-ра пед. наук. — Глазов, 2000. — 409 с.
3. Mayer V. V., Varaksina E. I. Visualization of equal phase lines of progressing flexural wave // European Journal of Physics. — 2015. — V. 36. — 015021.
4. Лекционные демонстрации по физике / М. А. Грабовский, А. Б. Млодзеевский, Р. В. Телеснин, М. П. Шаскольская, И. А. Яковлев; под ред. В. И. Ивероновой. — М.: Наука, 1972. — 640 с.

5. Вараксина Е. И., Майер В. В. Взаимодействие электрического тока и постоянного магнита // Учебная физика. — 2019. — № 4. — С. 23–25.
6. Демонстрационный эксперимент по физике в старших классах средней школы: Т. 1. Механика, теплота. Пособие для учителей / В. А. Буров, Б. С. Зворыкин, А. П. Кузьмин, А. А. Покровский, И. М. Румянцев; под ред. А. А. Покровского. — М.: Просвещение, 1971. — 368 с.
7. Демонстрационный эксперимент по физике в старших классах средней школы: Т. 2. Электричество. Оптика. Физика атома / В. А. Буров, Б. С. Зворыкин, А. П. Кузьмин; под ред. А. А. Покровского. — М.: Просвещение, 1972. — 448 с.
8. Гирке Р., Шпрокхоф Г. Эксперимент по курсу элементарной физики. Часть 1. Механика твердого тела. Перевод с немецкого А. П. Ломана. Под редакцией проф. П. А. Знаменского и проф. П. А. Рымкевича. — М.: Государственное учебно-педагогическое издательство министерства просвещения РСФСР, 1959. — 264 с.
9. Гирке Р., Шпрокхоф Г. Эксперимент по курсу элементарной физики. Часть 2. Жидкости и газы. Перевод с немецкого А. П. Ломана. Под редакцией проф. П. А. Знаменского и проф. П. А. Рымкевича. — М.: Государственное учебно-педагогическое издательство министерства просвещения РСФСР, 1959. — 368 с.
10. Шпрокхоф Г. Эксперимент по курсу элементарной физики. Часть 3. Теплота. Перевод с немецкого А. П. Ломана. Под редакцией проф. П. А. Знаменского и проф. П. А. Рымкевича. — М.: Просвещение, 1965. — 227 с.
11. Шпрокхоф Г. Эксперимент по курсу элементарной физики. Часть 4. Электричество (вводный курс). Перевод с немецкого А. П. Ломана. Под редакцией проф. П. А. Знаменского и проф. П. А. Рымкевича. — М.: Государственное учебно-педагогическое издательство министерства просвещения РСФСР, 1961. — 263 с.
12. Шпрокхоф Г. Эксперимент по курсу элементарной физики. Часть 5. Электричество (основной курс). Перевод с немецкого А. П. Ломана и Э. А. Ломана. Под редакцией проф. П. А. Знаменского и проф. П. А. Рымкевича. — М.: Просвещение, 1967. — 344 с.
13. Шпрокхоф Г. Эксперимент по курсу элементарной физики. Часть 6. Геометрическая оптика. Перевод с немецкого А. П. Ломана. Под редакцией проф. П. А. Знаменского и проф. П. А. Рымкевича. — М.: Государственное учебно-педагогическое издательство министерства просвещения РСФСР, 1960. — 368 с.
14. Шахмаев Н. М., Каменецкий С. Е. Демонстрационные опыты по электричеству: Пособие для учителя. — М.: Учпедгиз, 1963. — 327 с.
15. Шахмаев Н. М., Каменецкий С. Е. Демонстрационные опыты по электродинамике. — 2-е изд., перераб. — М.: Просвещение, 1973. — 352 с.
16. Шахмаев Н. М., Павлов Н. И. Физический эксперимент в средней школе. В 2 ч. Ч. 1: пособие для учителя. — М.: Мнемозина, 2010. — 224 с.
17. Шахмаев Н. М., Павлов Н. И. Физический эксперимент в средней школе. В 2 ч. Ч. 2: пособие для учителя. — М.: Мнемозина, 2010. — 192 с.
18. Шахмаев Н. М., Шилов В. Ф. Физический эксперимент в средней школе: Механика. Молекулярная физика. Электродинамика. — М.: Просвещение, 1989. — 255 с.
19. Разумовский В. Г. Развитие творческих способностей учащихся в процессе обучения физике: пособ. для учителей. — М.: Просвещение, 1975. — 272 с.
20. Физический практикум. Механика и молекулярная физика / под ред. В. И. Ивероновой. Составлен А. Г. Белянкиным, Г. П. Мотулевич, Е. С. Четвериковой, И. А. Яковлевым. — М.: Наука, 1967. — 352 с.

21. Физический практикум. Электричество и оптика / под ред. В. И. Ивероновой. Составлен А. Г. Белянкиным, Г. П. Мотулевым, Е. С. Четвериковой, И. А. Яковлевым. — М.: Наука, 1968. — 818 с.
22. Как измерить скорость пули в домашних условиях. <https://www.youtube.com/watch?v=jHcOA0v5ses> (дата обращения: 24.04.2021).
23. Майер В. В., Вараксина Е. И. Модель педагогического эксперимента по реализации исследовательского проекта // Модели и моделирование в методике обучения физике: Материалы докладов VIII Всероссийской научно-практической конференции: 8 ноября 2019 г. — Киров: ООО «Издательство «РАДУГА-ПРЕСС», 2019. — С. 74–78.
24. Майер В. В., Вараксина Е. И. Звук и ультразвук в учебных исследованиях. — Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2011. — 336 с.
25. Лабораторные занятия по физике : учеб. пособие для физ. спец. вузов / Л. Л. Гольдин, Ф. Ф. Игошин, С. М. Козел, В. В. Можяев, Л. В. Ногинова, Ю. А. Самарский, А. В. Францессон; Под ред. Л. Л. Гольдина. — М.: Наука, 1983. — 704 с.
26. Лабораторный практикум по физике: учеб. пособие для студентов вузов / А. С. Ахматов, В. М. Андреевский, А. И. Кулаков и др.; под ред. А. С. Ахматова. — М.: Высш. шк., 1980. — 360 с.
27. Майсова Н. Н. Практикум по курсу общей физики: учеб. пособие. — М.: Высш. шк., 1970. — 448 с.
28. Кортнев, А. В. Практикум по физике / А. В. Кортнев, Ю. В. Рублев, А. Н. Куценко. — М.: Высш. шк., 1963. — 516 с.
29. Практикум по физике для медицинских вузов / В. А. Хитун, В. В. Складчиков, И. А. Гофман, М. А. Юрьев. — М.: Высшая школа, 1972. — 360 с.
30. Практикум по общей физике: учеб. пособие для физ.-мат. фак. пед. ин-тов / под ред. проф. В. Ф. Ноздрева. — М.: Просвещение, 1971. — 311 с.
31. Лабораторный практикум по общей физике: учеб. пособие для студентов физ.-мат. фак. пед. ин-тов / Ю. А. Кравцов, А. Н. Мансуров, Н. Г. Птицина и др.; под ред. Е. М. Гершензона, Н. Н. Малова. — М.: Просвещение, 1985. — 351 с.
32. Практикум по физике в средней школе: пособ. для учителя / А. А. Покровский, В. А. Буров, А. И. Глазырин и др.; под ред. А. А. Покровского. — М.: Учпедгиз, 1963. — 224 с.
33. Анциферов Л. И. Физический практикум. Факультативный курс: пособ. для учителей / под ред. А. А. Покровского. — М.: Просвещение, 1972. — 120 с.
34. Практикум по физике в средней школе: дидакт. материал: пособ. для учителя / Л. И. Анциферов, В. А. Буров, Ю. И. Дик и др.; под ред. В. А. Букова, Ю. И. Дика. — М.: Просвещение, 1987. — 191 с.
35. Дик Ю. И., Кабардин О. Ф. Физический практикум для классов с углубленным изучением физики.— М.: Просвещение, 1993. — 208 с.
36. Марголис А. А., Парфентьева Н. Е., Иванова Л. А. Практикум по школьному физическому эксперименту: учеб. пособие для студентов физ.-мат. фак. пед. ин-тов. — М.: Просвещение, 1977. — 304 с.
37. Марголис, А. А., Парфентьева Н. Е., Соколов И. И. Практикум по школьному физическому эксперименту: учеб. пособие для пед. ин-тов. — М.: Просвещение, 1968. — 390 с.
38. Анциферов Л. И., Пищиков И. М. Практикум по методике и технике школьного физического эксперимента: учеб. пособие для студентов пед. ин-тов физ.-мат. спец. — М.: Просвещение, 1984. — 255 с.

39. Рязанов Г. А. Лекционные опыты по теории электромагнитного поля. — М.–Л.: Государственное издательство технико–теоретической литературы, 1952. — 216 с.
40. Шахмаев Н. М. Основные демонстрации при изучении электромагнитного поля. — М.: Издательство академии педагогических наук, 1960. — 184 с.
41. Перкальскис Б. Ш. Использование современных научных средств в физических демонстрациях [Текст]. — 2–е изд., перераб. — М.: Наука, 1971. — 208 с.
42. Перкальскис Б. Ш. Волновые явления и демонстрации по курсу физики. — Томск: Изд–во Том. ун–та, 1984. — 280 с.
43. Перкальскис Б. Ш. Использование некоторых современных научных и технических средств в физических демонстрациях: Автореф... канд. пед. наук. — Томск, 1963. — 9 с.
44. Перкальскис Б. Ш. Методика демонстраций по общей теории колебаний и волн и их роль в курсе физики: дисс... докт. физ.–мат. наук. — Томск, 1974. — 421 с.
45. Амстиславский Я. Е. Некоторые пути совершенствования методики и техники демонстрационного эксперимента по волновой оптике в курсе физики пединститута: дисс... канд. пед. наук. — Бирск, 1974. — 239 с.
46. Амстиславский Я. Е. Светосильные учебные эксперименты по волновой оптике: Учеб. пособие. — Уфа: Башк. пед. ин–т, 1985. — 112 с.
47. Гринбаум М. И. Самодельные приборы по физике. Из опыта: пособ. для учителей. — М.: Просвещение, 1972. — 200 с.
48. Майер В. В. Простые опыты с ультразвуком. — М.: Наука, 1978. — 160 с.
49. Майер В. В. Простые опыты по криволинейному распространению света. — М.: Наука, 1984. — 128 с.
50. Майер В. В. Простые опыты со струями и звуком. — М.: Наука, 1985. — 128 с.
51. Майер В. В. Полное отражение света в простых опытах. — М.: Наука, 1986. — 128 с.
52. Майер В. В. Кумулятивный эффект в простых опытах. — М.: Наука, 1989. — 192 с.
53. Майер В. В., Вараксина Е. И. Мираж в неравномерно нагретой воде // Потенциал. — 2008. — № 1. — С. 71–77.
54. УФН. Выпуски / 1918 / Январь / От редакции. <https://ufn.ru/ru/articles/1918/1/a/> (дата обращения: 24.04.2021).
55. Шпольский Э. В. «Успехам физических наук» пятьдесят лет // Успехи физических наук. — 1968. — Том 95, вып.1. — С.7–13
56. УФН. Выпуски. <https://ufn.ru/ru/articles/> (дата обращения: 05.03.2021).
57. Физический эксперимент в школе. Выпуск 3. Пособие для учителя. — М.: Просвещение, 1966. — 160 с.
58. American Journal of Physics. <https://aapt.scitation.org/toc/ajp/current> (дата обращения: 24.04.2021).
59. European Journal of Physics. <https://iopscience.iop.org/journal/0143-0807> (дата обращения: 24.04.2021).
60. Physics Education. <https://iopscience.iop.org/journal/0031-9120> (дата обращения: 24.04.2021).