



УДК 537.5

*Марек Вероника Петровна,
Чирцов Александр Сергеевич*

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ПРИБЛИЖЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ К НАУЧНЫМ ИССЛЕДОВАНИЯМ

Аннотация

В работе рассматриваются новые варианты использования компьютерных технологий в обучении экспериментальной физике. Обсуждается возможность усиления лабораторной работы «Газовый разряд в воздухе при пониженных давлениях» с помощью использования компьютерных технологий. Интенсификация чисто экспериментальной работы осуществляется путем ее дополнения заданиями компьютерного моделирования с целью превращения чисто учебной работы в мини-исследование, самостоятельно выполняемое студентами. Обсуждаются варианты микро- и макро моделирования газового разряда. Представлены результаты тестовых измерений в совокупности с данными численного моделирования. Предложены дополнительные новые шаги в направлении развития симбиоза лабораторного практикума с численным моделированием.

Ключевые слова: численное моделирование, лабораторный практикум, исследовательская работа студентов, тлеющий разряд, газоразрядная плазма, катодный слой, положительный столб.

1. Введение: проблема развития активных форм обучения с элементами поисковой деятельности старшекласников и студентов младших курсов

Задача привлечения учащихся к научным исследованиям на ранних стадиях вузовского и даже в довузовском образовании поставлена довольно давно, а в настоящее время приобретает все большую популярность. В отличие от профессиональных научных исследований, основной целью кото-

рых является получение новых знаний, рассматриваемый вид учебно-педагогической деятельности ориентирован на приобретение учащимися функциональных навыков исследования, как универсального способа освоения действительности, развития способности к исследовательскому типу мышления [1]. В связи с этим членам многочисленных школьных научных обществ в качестве тем для самостоятельных исследований, как правило, предлагаются задания на написание реферативной работы, либо постановку эксперимента, идея и интерпретация которого выходят за рамки образовательных программ, освоенных к моменту выполне-

© Марек В.П., Чирцов А.С., 2014

ния учебных исследований [2–4]. В немногочисленных случаях учащиеся старших классов оказываются допущенными к участию в реальных научных экспериментах, проводимых на базе исследовательских и учебных лабораторий вузов и НИИ, сотрудничающих со средними учебными заведениями. Для поддержки подобной деятельности создаются разнообразные факультативы, летние школы и практики. Результаты исследовательской работы учащихся представляются на организуемых для них конференциях и конкурсах научных работ. Наиболее представительные интеллектуальные состязания обеспечивают победителям возможность участия в их международных аналогах и дают определенные льготы при зачислении в высшие учебные заведения [5, 6]. Несмотря на активную профессиональную работу отдельных преподавателей и научных работников в области привлечения старшеклассников к исследованиям, следует признать, что подобная деятельность сегодня не носит массового характера, а концентрируется вокруг отдельных энтузиастов и сравнительно небольшого числа учебных заведений, развернувших активность в этом направлении.

Ситуация с участием в исследовательской деятельности студентов младших курсов во многом аналогична. К научно-исследовательским работам, выполняемым в высших учебных заведениях физико-математического и естественнонаучного профилей, как правило, привлекаются только магистранты и студенты старших курсов бакалавриатов, работающие над своими дипломными проектами. Что же касается предшествующих этапов учебного процесса (зачастую включая выполнение курсовых работ), то на них поисковая и творческая работа будущих исследователей представлена достаточно слабо. Исключение составляют отдельные случаи приходов студентов младших курсов в исследовательские лаборатории, происходящие в инициативном порядке. По-видимому, подобные положительные примеры не следует пытаться трансформировать в массовую деятельность. Существующая многолетняя практика привлечения к выполняе-

мым вузами НИР только студентов старших курсов давно сложилась и прошла длительную апробацию. Более перспективной кажется возможность частичного изменения традиционно используемых на младших курсах форм обучения (практических занятий, лабораторных и компьютерных практикумов) в направлении увеличения в них доли самостоятельной исследовательской работы студентов и приближения последней к научной деятельности. Представляется разумным не менять сложившееся предметное и методическое наполнение практических занятий, а расширять его путем включения дополнительных (возможно – не обязательных) заданий, выполнение которых будет способствовать развитию навыков, необходимых для будущей исследовательской работы.

Одним из наиболее эффективных механизмов решения сформулированной задачи является использование новых возможностей, предоставляемых современными информационными и компьютерными технологиями. С одной стороны, их использование позволяет существенно интенсифицировать работу студентов по усвоению традиционной (обязательной) части программы и хотя бы частично освободить время для решения поставленной новой задачи. С другой стороны, разумное применение компьютерных и информационных технологий позволяет частично скомпенсировать недостаток необходимых для исследовательской деятельности знаний и практических навыков, неизбежно присутствующий у студентов младших курсов.

Одной из пионерских работ по использованию компьютеров для организации достаточно массового студенческого практикума с самостоятельными мини-исследованиями было создание серии виртуальных лабораторных работ по физике колебаний и законам движения космических тел [7, 8]. В таком варианте компьютерные модели использовались в учебном практикуме для студентов физического факультета СПбГУ, при чтении специального курса по физике колебаний в НИУ ИТМО и для организации выполнения курсовых работ для студентов пер-

вого курса, обучающихся по образовательному направлению «Прикладные математика и физика». Последнее создавалось с целью организации согласованного и сбалансированного обучения информационным технологиям и традиционным дисциплинам физико-математического цикла. На втором и третьем курсах обучения для студентов всех четырех учебных групп (около 50 человек) было организовано выполнение семестровых курсовых работ, темами которых были небольшие самостоятельные исследования в области компьютерного моделирования изучаемых на курсах физики систем или компьютерное решение задач, формулируемых кафедрами [9]. Качество ряда работ, выполненных студентами младших курсов, позволило рекомендовать их к представлению на научно-методических конференциях международного уровня (см., например, [10–13]).

Таким образом, была успешно апробирована методика организации массового привлечения студентов младших курсов к самостоятельным работам с элементами исследования в области численного моделирования физических систем и процессов, визуализации его результатов. Аналогичная деятельность также может быть апробирована в области экспериментальной физики. В качестве наиболее естественного варианта может быть предложено усиление исследовательской составляющей в лабораторных работах учебных практикумов. На этом пути естественным образом происходит сближение конкретного наполнения реализуемого на младших курсах учебного процесса с исследованиями, проводимыми в рамках НИР учебного заведения. Последнее полностью соответствует современной идеологии организации обучения в университетах.

2. Новые возможности использования компьютерных технологий в учебных лабораторных практикумах

К настоящему времени накоплен значительный опыт использования компьютерных и мультимедийных технологий для сопро-

обсуждения об оптимальных формах использования компьютеров в лабораториях до сих пор продолжают [14]. По-видимому, наиболее радикальным вариантом является создание виртуальных лабораторных работ, в которых реальные физические системы заменяются их компьютерными симуляциями. Сегодня весьма популярно использование компьютерных симуляций в учебных практикумах по экономическим дисциплинам, менеджменту, администрированию компьютерных сетей и в других дисциплинах, где создание реальных систем для учебного эксперимента является трудновыполнимой задачей. В естественных науках, использующих эксперимент в качестве базиса для своего развития, виртуальный практикум также находит ограниченное применение (см., например, [15–17]).

Подобные разработки представляют интерес не как вариант замены реальных физических экспериментов их симуляциями, а как способ удобного и наглядного представления теоретических моделей изучаемых объектов, систем и явлений, их поэтапного усложнения и приближения к реальности [18]. Замена же реального эксперимента виртуальным представляется оправданной лишь в определенных случаях. К ним, в первую очередь, следует отнести организацию массового независимого выполнения учащимися одного эксперимента в максимально сходных условиях [19] в ходе олимпиад и иных состязаний и выполнение трудно реализуемых в учебных заведениях работ, требующих использования уникального оборудования или вредных/опасных объектов [20]. К последнему варианту тесно примыкает практика создания компьютерных тренажеров, позволяющих учащимся получить предварительные навыки работы со сложным и уязвимым оборудованием [21].

Другим популярным направлением использования цифровых технологий в лабораторных практикумах является создание автоматизированных лабораторных установок с компьютеризированным управлением экспериментом, сбором экспериментальных данных и их обработкой [22, 23]. Естественным развитием идеи создания компьютеризи-

зированных лабораторных работ является переход к удаленным учебным практикумам, использующим дистанционное управление установками по компьютерным сетям [24, 25]. Разработка таких практикумов представляет интерес с точки зрения решения актуальных задач демократизации образования, а также подготовки квалифицированных кадров для участия в глобальных международных физических экспериментах.

В рамках работ по созданию и развитию электронных сборников мультимедийных материалов для информационного и методического сопровождения преподавания физики [26] был апробирован оригинальный подход к созданию мультимедийных описаний к учебным лабораторным работам и сложным приборным комплексам [27]. Такая электронная продукция объединяет традиционную текстовую часть описаний, анимированные аудио инструктажи по выполнению работы, видеозаписи непосредственного выполнения эксперимента и методов обслуживания, юстировки и ремонта установки. В блок видеоресурсов также включается и другая полезная для будущих исследователей информация, полное практическое освоение которой не может быть предложено в рамках стандартной организации прохождения практикумов.

Использование мультимедийных описаний позволяет существенно интенсифицировать процесс подготовки учащихся к выполнению лабораторных работ и сократить время на их выполнение в рамках стандартных требований, предъявляемых к заданиям учебных студенческих практикумов. Последнее позволяет поставить принципиально новую задачу приближения стандартных учебных лабораторных работ к небольшим самостоятельным научным исследованиям. Вносимые с этой целью в работу дополнения могут включать, например, выполнение изначально не предусмотренных измерений, в том числе требующих внесения изменений в конструкцию оригинальной установки, поиск и/или разработку теоретических моделей, описывающих изучаемое явление, и т. д. Важным новым элементом, способствующим эффективному решению постав-

ленной задачи, является объединение изначально чисто экспериментальных работ с численным моделированием явления. Возникающий при этом симбиоз лабораторного и компьютерного практикумов открывает для обучаемых возможность дополнить экспериментальные исследования элементами самостоятельного теоретического осмысления их результатов, построением оригинальных моделей, поэтапного приближения этих моделей к реальности.

Для апробации сформулированных идей модификации имеющихся лабораторных работ с целью придания им научно-исследовательского характера были выбраны две стандартные установки фирмы LDDIDACTIC [28]: «Изучение газового разряда» и «Аэродинамическая труба». Критерием выбора этих работ была сложность подлежащих экспериментальному изучению систем, уязвимость оборудования, а также недостаточно полное освещение тематики данных работ в изучаемых студентами младших курсов теоретических курсах. Последнее добавляет к работе элемент поиска и требует от учащихся анализа научной литературы и публикаций (в том числе, зарубежных).

Настоящая статья посвящена демонстрации практической возможности подобной модернизации традиционной учебной лабораторной работы и созданию ее углубленной версии на примере первой из двух упомянутых работ. Поскольку представляемая работа имела двоякую цель исследования - апробация возможностей расширения использования компьютера для проведения учащимися исследований на базе конкретной лабораторной работы и демонстрация примера таких исследований, представляется не только возможным, но и необходимым кратко познакомить читателя с особенностями исходного варианта работы и физическими явлениями, знакомству с которыми эта работа (и разработанный авторами ее усиленный вариант) была посвящена.

3. Описание объектов исследования лабораторной работы

«Изучение газового разряда и тлеющего разряда в воздушной смеси при пониженных давлениях»

Газовые разряды – весьма распространенные в природе явления, находящие широкое применение в технике и современных технологиях. Их изучению и численному моделированию посвящены многочисленные исследования, выполнявшиеся в XX веке и продолжающиеся сегодня. В случае разрядов в воздухе на современном этапе наибольший интерес вызывают разряды при атмосферных давлениях (см., например, подборки публикаций [29, 30]). Несмотря на это, в традиционных общих курсах физики (вплоть до университетских) явление газового разряда рассматривается весьма конспективно, практически только на качественном уровне. При этом какая-либо информация о методах количественного описания газовых разрядов в простых газах (не говоря уж о таких сложных смесях, как воздух) у большинства учащихся, как правило, просто отсутствует. Вместе с тем, наряду с большой практической значимостью, физика газового разряда сама по себе весьма необычна хотя бы уже потому, что занимается описанием одной из немногочисленных систем неживой природы, в которой существенная роль принадлежит процессам самоорганизации.

Электрические разряды сильно различаются в зависимости от составов газовых смесей, их физических параметров (давлений и температур), геометрии разрядного

промежутка и электрических параметров цепей питающего напряжения. В случае атмосферного электричества наибольший интерес вызывают разряды, возникающие при нормальных давлениях в коротких межэлектродных промежутках [31–33]. Их интенсивное исследование обусловлено, прежде всего, большим практическим значением. Зажигаемые же в длинных трубках при пониженных давлениях разряды в воздушных смесях интенсивно исследовались экспериментально в середине XX века [34]. В тот период попытки построения теоретического описания, приводящего к количественным моделям разрядов, предпринимались, главным образом, в отношении протекания токов в однокомпонентных газах [35]. Что же касается газовых разрядов в многокомпонентных смесях, то претендующие на надежность методы начали становиться доступными лишь в современную эпоху компьютеризации, предоставившей пользователям практически неограниченные вычислительные ресурсы. В связи с этим комплексные экспериментально-теоретические исследования разрядов в газовых смесях (в том числе воздушной) в настоящее время приобрели актуальность как с точки зрения фундаментальной науки, так и прикладной. Именно эта особенность делает привлекательным исследование возможностей трансформации учебной работы в элемент практикума нового типа. Его отличительной чертой являются практически неограниченные для обучаемых возможности углубленного исследо-

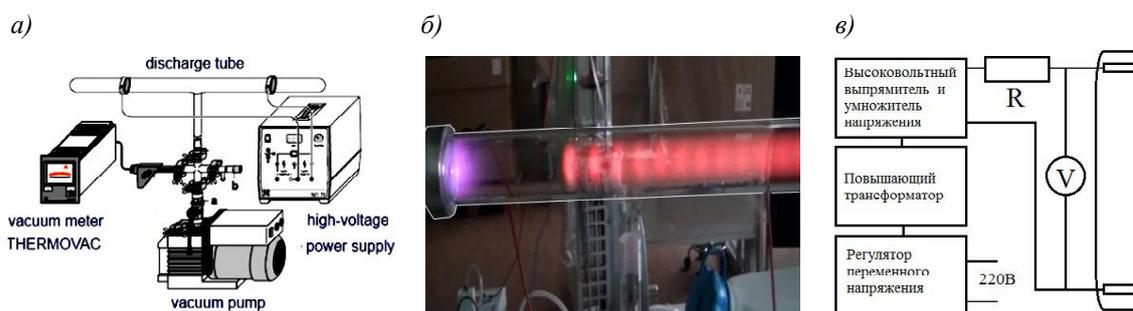


Рис. 1. Стандартная комплектация лабораторной установки для изучения газового разряда:

- a) схема учебной установки;
- b) общий вид разрядного промежутка: четко видны катодное свечение (справа) и стратифицированный положительный столб;
- c) электрическая схема высоковольтного питания разрядной трубки

вания системы, вплоть до получения значимых для науки результатов.

Устройство и параметры поставляемой для учебных практикумов установки [28] (рис. 1 а) позволяют получать разряды постоянного тока в воздушной смеси в откачиваемом разрядном промежутке, ограниченной стеклянной трубкой диаметром 50 мм и двумя холодными алюминиевыми электродами, разведенными на расстояние 500 мм. Модернизированная установка допускала измерения давления воздуха в разрядном промежутке, падения напряжения на нем, силы разрядного тока, геометрических размеров светящихся областей газового разряда. При питающих напряжениях 3–10 кВ наблюдался тлеющий разряд. Его характерной особенностью является наличие прикатодной области, характеризующейся большой величиной падения напряжения. Именно в ней происходит самосогласованный процесс генерации свободных электронов, необходимых для поддержания разряда [34]. Вблизи катода свободные электроны разгоняются электрическим полем до энергий, достаточных для ионизации атомов и молекул воздушной смеси электронным ударом. Возникшие ионы под действием того же поля движутся в направлении холодного катода и, достигнув его, выбивают с поверхности новые электроны. Другой часто реализуемой (но необязательной) особенностью тлеющего разряда является наличие положительного столба – светящегося объема, ионизированный газ в котором хорошо соответствует

приближению низкотемпературной плазмы. Его основными особенностями являются электронейтральность и термодинамическая неравновесность. Помимо двух описанных важнейших для понимания физики процесса областей, структура тлеющего разряда содержит множество более мелких элементов, изучение которых на рассмотренной учебной установке кажется проблематичным.

В оригинальном варианте работы предлагалось лишь изучение на качественном уровне зависимости конфигурации и размеров светящейся части разряда от давления воздушной смеси и приложенного к электродам напряжения. Подобный «созерцательный» вариант лабораторной работы не соответствовал традициям обучения физике студентов физико-математических специальностей. В результате проведенной модернизации работа была дополнена заданиями на получение количественных зависимостей от давления напряжения пробоя, падения напряжения на трубке, ее эффективного электрического сопротивления и геометрических размеров основных элементов структуры разряда (рис. 2). Последнее вывело работу на уровень стандартных требований учебного физического практикума, поскольку подразумевало получение серий экспериментальных зависимостей, их статистическую обработку, возможность наблюдения гистерезисных явлений у границ области существования разряда и проверки закона подобия Пашена [36, 37].

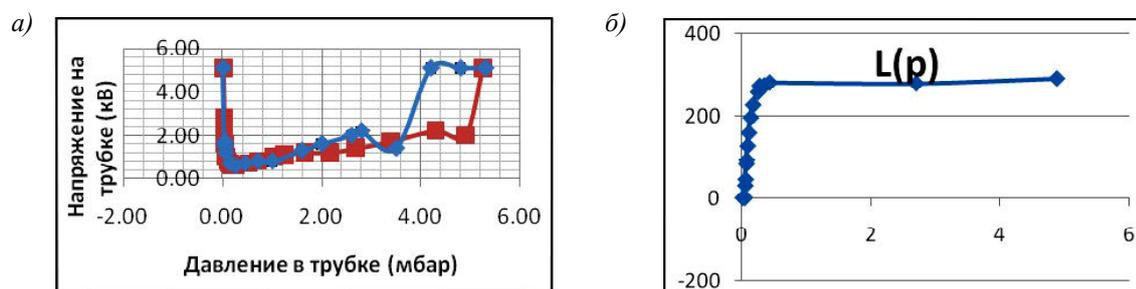


Рис. 2. Примеры характерных экспериментальных зависимостей, получаемых на установке в воздушной смеси при пониженных давлениях при питающем напряжении 5.1 кВ:

- зависимость падения напряжения на разрядном промежутке от давления смеси, демонстрирующая гистерезис условий существования разряда;
- зависимость длины положительного столба (в мм) от давления в трубке для трех питающих напряжений.

Рассмотренный дополненный вариант работы практически исчерпывал предоставляемые установкой возможности развития работы учебного практикума в рамках традиционных подходов. Следующий этап усложнения заданий связан с переходом к моделированию предложенной для изучения системы.

4. Возможности и перспективы использования численного микромоделирования плазмы газового разряда для анализа результатов учебного эксперимента

По-видимому, наиболее радикальный путь построения теории газового разряда состоит в его моделировании на «усредненно-микроскопическом» уровне. Подразумевается численное решение задачи на расчет пространственных и временных распределений концентраций наиболее важных для динамики системы компонент газоразрядной смеси: электронов, фотонов, ионов, атомов и молекул в различных квантовых состояниях. Помимо проблем чисто вычислительного характера (макроскопическая система с большим числом подансамблей, взаимодействующих друг с другом в элементарных плазменных процессах превращающихся друг в друга частиц), задача осложнена рядом принципиальных физических проблем. К ним относятся алгоритмы ограничения набора учитываемых процессов и числа квантовых состояний частиц плазмы. Кроме того, для расчетов динамики системы необходимы вероятностные характеристики элементарных процессов: констант скоростей $k_{p+q \rightarrow j+\{j'\}}$ (или соответствующих сечений) реакций рождения частицы определенного сорта в квантовом состоянии j и прочих продуктов $\{j'\}$ в результате столкновения двух частиц p и q :

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial n_j^{(\Sigma)}}{\partial t} &= \sum_{p,q,j'} k_{p+q \rightarrow j+\{j'\}}^{(+)} n_p n_q - \\ &\quad - \sum_{p,j'} k_{j+p \rightarrow \{j'\}}^{(+)} n_j n_p - (\nabla, \mathbf{J}_j^{(\alpha)}), \quad (1) \\ \mathbf{J}_j^{(\alpha)} &= -D_j \nabla n_j^{(\alpha)} + \mu_j q_j n_j^{(\alpha)} \mathbf{E}. \end{aligned} \right.$$

В системе уравнений для концентраций (1), помимо процессов рождения и гибели частиц j в результате столкновений, учтены процессы переноса, описываемые их потоками \mathbf{J}_j , возникающими в результате диффузии и дрейфа под действием сил электрического поля (коэффициенты D_j и μ_j соответственно). Помимо уравнений баланса, численная модель газоразрядной среды должна быть дополнена уравнениями для электрического поля:

$$\mathbf{E} = -\nabla\varphi, \quad \Delta\varphi = -4\pi \sum_j q_j n_j \quad (2)$$

и аналогичными (1) уравнениями баланса для энергий:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{3}{2} \frac{\partial}{\partial t} (n_j T_j) &= S_{elastic}^{T_j} + S_{inelastic}^{T_j} + \\ &\quad + q_j (\mathbf{E}, \mathbf{J}_j) - (\nabla, \mathbf{Q}_j) \quad , (3) \\ \mathbf{Q}_j &= -\left(\frac{5}{2} D_j\right) \nabla (n_j T_j) + \left(\frac{5}{2} \mu_j\right) q_j \mathbf{E} n_j T_j \end{aligned} \right.$$

где через S^T обозначены скорости поглощения и выделения тепловой энергии.

Систематические приближенные квантовомеханические расчеты входящих в систему сечений или констант скоростей элементарных процессов оказываются возможными лишь в тех случаях, когда хотя бы одна из сталкивающихся частиц оказывается бесструктурной (электроны, фотоны). Если задачи вычислений вероятностей радиационных процессов теперь приближаются к хрестоматийным, то проблема развития методов расчета вероятностей возбуждения и ионизации атомов электронным ударом еще не утратила своей актуальности. На сегодняшний день для прикладных расчетов традиционно используется первое борновское приближение [38] и его различные модификации [39, 40]. Результаты даже в случае простых для описания столкновений могут отличаться от экспериментальных данных в полтора-два раза [41, 42]. Что же касается столкновений между атомами, молекулами и/или ионами, то соответствующие расчеты крайне трудоемки и далеко не всегда могут считаться достаточно надежными. В результате экспериментальные измерения

вероятностей элементарных процессов нередко остаются незаменимым источником данных для «микроскопического» моделирования газового разряда. Несмотря на то, что к настоящему времени уже накоплены весьма объемные банки теоретических и экспериментальных значений констант и сечений элементарных процессов (например [43]), возможности весьма привлекательно подхода (1–3) сильно ограничиваются набором имеющихся исходных данных.

Подходы к численному решению системы (1–3) во многом зависят от того, какая модель плазмы (одно-, двух- или трехмерная) используется в рассматриваемой задаче. В любом случае претендующие на адекватное описание реальности модели оказываются столь сложны, что для выполнения соответствующих расчетов приходится использовать профессиональные пакеты численного моделирования, например Comsol [44]. Интерфейс указанного пакета весьма прост и по существу требует лишь задания геометрии разряда, параметров электрической цепи и списка учитываемых элементарных процессов. Это делает его доступным для использования даже учащимися, еще не изучавшими курсов кантовой механики и физики плазмы. К настоящему времени имеется положительный опыт привлечения учащейся молодежи (от студентов бакалавриата до аспирантов) к исследованиям в описанной области через выполнение ими вычислительных работ. В результате мотивированные студенты даже младших курсов

оказываются способными к полноценному участию в исследовательской работе, результатом которого являются их первые научные публикации (например [45–48]).

При всей привлекательности предлагаемая идея объединения ориентированного на массовое выполнение студентами учебного исследования воздушного разряда с его численным моделированием пока кажется явно преждевременной. Во-первых, даже в существенно более простых случаях разрядов в гелии (имеется большое количество данных по константам скоростей, не возникает необходимости учета возбуждения колебаний многоатомных молекул) результаты численного моделирования пока еще не имеют достаточно надежной предсказательной силы [49]. Во-вторых, моделирование газового разряда в многокомпонентной смеси требует значительных вычислительных ресурсов и весьма скрупулезной деятельности по описанию модели совокупности элементарных процессов в ионизированной газовой смеси. Возникающие при этом трудности явно выходят за рамки практических возможностей и методических интересов учебного практикума. Наконец, первичные результаты численного моделирования плазмы газового разряда на микроскопическом уровне получаются в виде пространственных и временных профилей полей, токов и концентраций частиц (см., например, [50, 51], рис. 3). Такие данные оказываются заведомо избыточными с точки зрения точности и идеологии учебного эксперимента, позволяющего, по

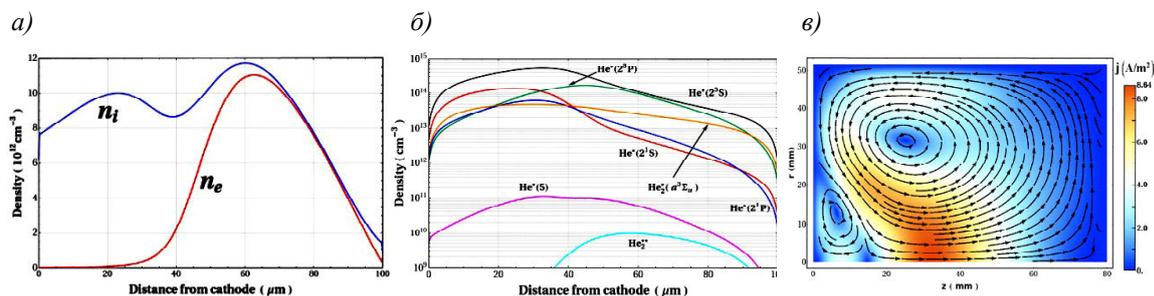


Рис. 3. Характерные примеры результатов численного усредненного 1-d и 2-d микромоделирования плазмы газового разряда пространственного распределения населенности компонент плазмы микроразряда в аргоне:
a, b) продольные профили распределения по межэлектродному промежутку концентраций электронов, ионов и атомов [50];
c) двумерное распределение плотности электронной составляющей тока в разряде [51]

существо, определять лишь интегральные электрические характеристики разряда. Экспериментальное изучение продольных распределений локальных характеристик, получающихся в результате расчетов в рамках одномерных моделей, возможно, но требует существенно более сложного оборудования, профессиональной работы с ним и трудозатрат, заведомо превосходящих уровень учебной работы в даже ее усиленном варианте. Что же касается данных двумерных моделей, их непосредственная экспериментальная проверка на сегодняшний день представляется проблематичной.

По этой причине на современном этапе в рамках учебного практикума представляется целесообразным использование более грубых теоретических подходов к описанию разряда в воздухе при пониженных давлениях.

5. Возможности и перспективы использования полуэмпирических макроскопических моделей газового разряда для численного моделирования тлеющего разряда в воздушной смеси

Более оправданным и соответствующим духу экспериментальной части учебной работы практикума является сопоставление результатов измерений с полуэмпирическими моделями характерных областей тлеющего разряда, ориентированных на интегральное описание их электрических свойств. Поскольку основной вклад в измеряемое на опыте падение напряжения на межэлектродном зазоре дает прикатодная область и положительный столб, процессы в этих двух областях должны учитываться в первую очередь. Выполнение приближенных оценок величин падений напряжений представляет собой отдельную и достаточно сложную физическую задачу. Ее решение требует от обучаемого самостоятельного знакомства с рядом дополнительных вопросов теории, проверки соответствия экспериментальных условий областям применимости приближений, выполнения численного моделирования и расчетов. Выполнение перечисленных ра-

бот должно способствовать приобретению учащимися компетенций, необходимых для будущей научной деятельности, и развивать навыки использования компьютерных и информационных технологий для решения сложных физических задач.

Описание электрических свойств стационарного положительного столба может быть построено на основе его макроскопической модели, требующей выполнения условий баланса энергий и числа электронов [52].

Уравнение для баланса энергий позволяет связать необходимую для вычисления падения напряжения в положительном столбе напряженность электрического поля E с электронной температурой T_e :

$$\frac{3}{2}T_e = \langle \varepsilon \rangle = 0.8 \frac{q_e}{\sigma \sqrt{\delta}} \frac{E}{N}. \quad (4)$$

Приведенное уравнение (4) получается из условия равенства энергий, получаемых электронами от электрического поля и отдаваемых при столкновениях с частицами газа. В случае столкновений с атомами или ионами отдаваемая энергия оценивается, исходя из изучаемой в рамках школьной физики теории упругих столкновений. Столкновения же с молекулами требуют нетривиального учета процессов возбуждения колебаний последних. Соответствующие потери описываются введенным параметром δ . Определение его величины, существенно зависящей от состава газа, требует от учащегося кропотливого поиска информации в Интернет или знакомства с оригинальными работами [52–55].

В свою очередь, входящая в (4) электронная температура связана с частотой ионизации электронным ударом $Z_i(T_e)$ и поперечными размерами трубки R . Эта связь следует из упрощенного (одномерного) варианта уравнения (1), в котором учитываются лишь доминирующий процесс прямой ионизации невозбужденных молекул и гибель свободных электронов в результате диффузии на стенку разрядной трубки:

$$\frac{d^2 n_e}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dn_e}{dr} + \frac{Z_i(T_e)}{D} n_e = 0.$$

В соответствии с распределением Саха (понятного учащимся, познакомившимся с

классической статистикой Максвелла-Больцмана в рамках курса общей физики) частота ионизации экспоненциально зависит от отношения потенциала ионизации U_i к энергии электронов. Совместно с граничным условием $n_e(r = R) = 0$, соответствующим гибели электронов на стенке, решение приведенного дифференциального уравнения Бесселя позволяет определить T_e по радиусу разрядной трубки. Процесс решения уравнения Бесселя потребует от студентов младших курсов либо самостоятельного знакомства с соответствующим разделом математической физики, либо использования пакета Wolfram Mathematica (или его аналогов), либо самостоятельного выполнения численного моделирования процесса миграции частиц в системе с цилиндрической симметрией.

В результате описанных процедур для электронной температуры получается трансцендентное уравнение

$$\sqrt{\frac{kT_e}{q_e U_i}} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{q_e U_i}{kT_e} \right) \exp\left(-\frac{q_e U_i}{kT_e} \right) 1.16 \cdot 10^7 (CpR)^2 = 1 \quad (5)$$

или его численный аналог. Численное решение уравнения (5) относительно T_e для различных давлений газа p должно быть доступной задачей для учащихся, знакомых с основами информатики и компьютерной грамотности и планирующих специализироваться в области точных наук. Входящие в

(5) константы C и потенциалы ионизации U_i зависят от сорта газа и имеются в доступной для поиска неспециалистами электронной литературе.

Тестовое решение уравнения (5) было получено с использованием пакета WolframMathematica 8.0 (рис. 4 а). Зависимость от давления напряженности электрического поля в положительном столбе (рис 4б) получалась в результате его подстановки в соотношение (4). Соответствующее падение напряжения определялось в результате умножения результата на экспериментально измеренную длину положительного столба.

Вторая (доминирующая) часть измеряемой разности потенциалов разрядного промежутка приходится на катодную область, играющую определяющую роль в обеспечении стационарного горения тлеющего разряда.

Приближенная одномерная модель однородного прикатодного слоя рассмотрена в [34] на базе известного из элементарных курсов условия самоподдержания разряда,

$$\alpha d = \ln(1 + \gamma^{-1}), \quad (6)$$

связывающего между собой толщину прикатодного слоя d , ионизационный коэффициент α и параметр γ , характеризующий вероятность выбивания электрона с катода в результате прихода на него иона. При использовании для α эмпирической формулы Таундсена

$$\alpha(E) = Ap \exp(-Bp/E),$$

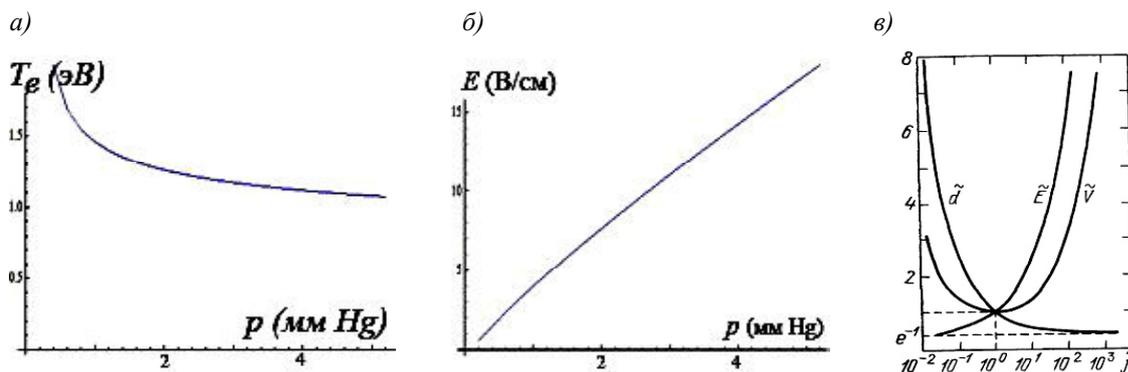


Рис. 4 а, б, в. К расчету падения напряжений на положительном столбе и в катодном слое:
 а) полученная в результате численного решения (5) зависимость $T_e(p)$;
 б) рассчитанная зависимость напряженности поля в трубке от давления;
 в) полученная в [25] зависимость толщины катодного слоя, поля на катоде и падения катодного напряжения в безразмерном

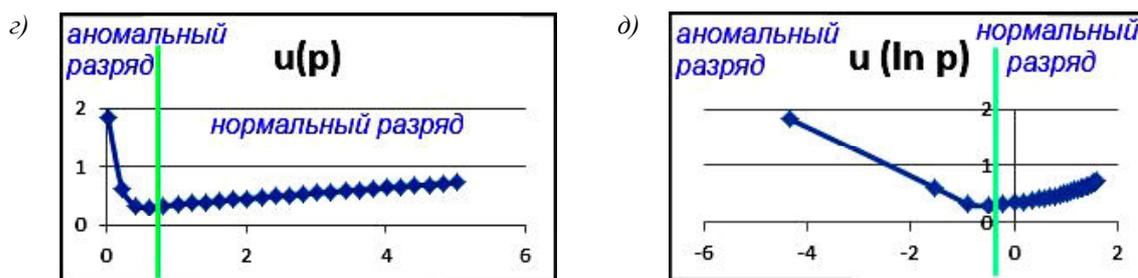


Рис. 4 з, д. К расчету падения напряжений на положительном столбе и в катодном слое:
 з, д) полученные зависимости катодного падения напряжения (в кВ) в трубке от давления воздуха (в мбар) в ней в обычном и логарифмическом масштабах первые 4 точки графиков соответствуют аномальному режиму разряда)

где A и B – подгоночные параметры, модель позволяет оценить минимальное падение напряжения в слое и соответствующее ему «нормальное значение» плотности тока на катоде j_n (рис. 4 в). Произведение этой нормальной плотности тока на площадь катода дает предельную величину разрядного тока, до достижения которой падение напряжения в прикатодной области остается постоянным («нормальный разряд»). При дальнейшем увеличении тока падение напряжения в слое начинает резко возрастать, что соответствует переходу к аномальному режиму разряда.

Для тестовой оценки падения напряжения в катодном слое взяты результаты, полученные в [34] в рамках простейших приближений (6). Расчеты соответствующих плотностей тока при допускаящих разряд давлениях показали, что на рассматриваемой установке могут реализоваться оба типа разряда: нормальный и аномальный (рис. 4 з, д).

Относительная простота одномерной модели, использованной для получения изображенных на рис. 4 в графиков, и ее доступность для понимания студентами младших курсов открывает возможность уточнений предложенного рассмотрения катодного слоя и выполнении соответствующего численного моделирования. Например, представляется перспективным учет наблюдаемой неоднородности электрического поля в прикатодном слое путем обобщения (6) на случай пространственно неоднородного поля:

$$\int_0^d \alpha(E(z)) dz = \ln(1 + \gamma^{-1}). \quad (7)$$

Примеры полученных описанным образом результатов численного моделирования разряда приведены на рис. 5. Сопоставление результатов эксперимента и численного моделирования показывает, что использованная модель правильно описывает общий тренд зависимости на фоне систематического занижения результатов моделирования (особенно в области высоких давлений в районе пробоя). Одна из существенных причин расхождений может быть связана с заведомо упрощенной моделью газовой смеси, включающей только азот и кислород. Например, в рамках модели вообще не учитывалось наличие трехатомных молекул (CO_2 , H_2O и т. д.), обладающих богатыми колебательным и вращательным спектрами и, следовательно, оказывающих заметное влияние на столкновительные потери энергии электронами, описываемые параметром δ в (4).

Приведенные соображения открывают перед заинтересованными учащимися широкие перспективы исследовательской деятельности, результаты которой могут представлять интерес для физики нелокальной плазмы.

6. Основные направления дальнейшего развития работ по организации учебно-научных исследований и численного моделирования газовых разрядов

Помимо работ по совершенствованию моделирования, наблюдаемого в условиях

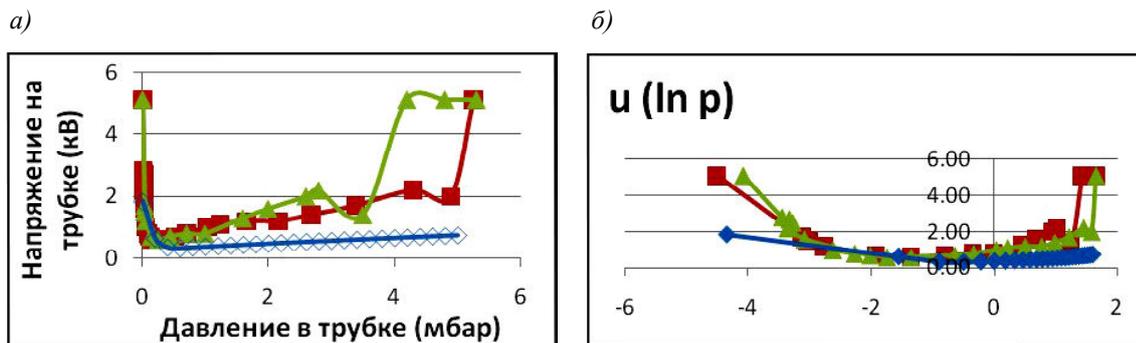


Рис. 5. Сравнение теоретически полученной зависимости напряжения между электродами трубки от давления в ней (нижние синие графики) с экспериментально полученными гистерезисными зависимостями (откачка трубки – маркеры в виде квадратов, напуск воздуха – треугольные маркеры) для питающего напряжения 5.1 кВ

учебной установки разряда, может быть предложено несколько направлений развития экспериментальной части работы, влекущих за собой постановку новых задач в области использования информационных технологий и численного моделирования для организации учебно-научных исследований. Целесообразно доукомплектование установки системой напуска и набором баллонов с инертными и молекулярными газами, плазменным зондом и перемещаемыми электродами. Это позволит обеспечить практическую уникальность (различные геометрии разрядного промежутка, давления и химические составы газовых смесей) каждой из предлагаемых учащимся реализаций усиленной поточной лабораторной работы. Кроме того, измерения в чистых инертных газах позволят развивать работы по сопоставлению эксперимента с описанным выше моделированием плазмы по (1–3). Указанное направление деятельности представляет наибольший научный интерес, поскольку соответствует исследованиям, направленным на развитие современных методов численного моделирования низкотемпературной плазмы и газоразрядных сред, представляющих сегодня актуальную задачу, имеющую фундаментальную и прикладную составляющие.

Еще одним важным усовершенствованием установки является ее комплектация перемещаемыми электродами и плазменным зондом. Наличие зонда позволит контролировать температуру электронов в положи-

тельном столбе, что представляет интерес для контроля работоспособности приближений, используемых при построении на основе (4–5) численной модели. Плазменный зонд также обеспечивает контроль зависимостей от координаты потенциала и напряженности поля, используемых в (7) при моделировании катодного слоя. Наконец, наличие подвижных электродов открывает возможность более детальной экспериментальной проверки законов подобия, формулируемых для газоразрядной плазмы. Одновременно с этим возникают перспективы постепенного перехода от разрядов в длинных трубках при пониженном давлении к актуальным сегодня исследованиям микрозарядов при высоких (атмосферных) давлениях.

Рекомендации по усовершенствованию лабораторной установки переданы фирме-изготовителю учебного оборудования. Макет описанной установки в настоящее время создается на базе НИУ ИТМО. Ввод в эксплуатацию такого макета позволит говорить о создании экспериментального стенда, ориентированного на организацию для студентов и мотивированных учащихся старших классов систематических циклов экспериментальных и теоретических учебных работ, важнейшей частью которых является компьютерное моделирование. Одновременно такие исследования должны стать важным дополнением к реализуемому циклу НИР по исследованию процессов в нелокальной плазме.

7. Заключение

Выполнение описанной углубленной лабораторной работы немислимо без использования информационных и компьютерных технологий. Для иллюстрации на рис. 6 приведена схема алгоритма выполнения рассмотренной работы, являющейся своеобразным симбиозом физического эксперимента и численного моделирования. Степень интеграции в нее цифровых технологий легко оценить, сравнивая числа модулей, выполняемых по традиционным методикам и с использованием компьютеров.

Предложенный вариант лабораторной работы нового типа по существу является естественным развитием стандартных учебных лабораторных работ и допускает возможность его выполнения как в традиционной форме, так и в углубленной. В первом варианте учащемуся предоставляются дополнительные более комфортные и эффективные формы подготовки к выполнению традиционной экспериментальной части.

Само выполнение учебного эксперимента практически не отличается от традиционного. В случаях, когда это оправдано и соответствует специфике эксперимента, возможна автоматизация и компьютеризация экспериментальной части.

Принципиально новым является блок заданий по созданию теоретической модели изучаемого явления и проверке ее соответствия результатам выполненного эксперимента. Обдуманное и оправданное использование компьютерного моделирования и численных методов на этом этапе позволяет в значительной степени компенсировать вполне возможный дефицит знаний учащихся младших курсов в области математики и физики и предоставить им возможность приобретения навыков поисковой научной работы.

Авторы выражают искреннюю благодарность А.А. Кудрявцеву за идеи, поданные при постановке работы и в ходе ее выполнения, и Е.И. Бутикову за замечания по тексту статьи.

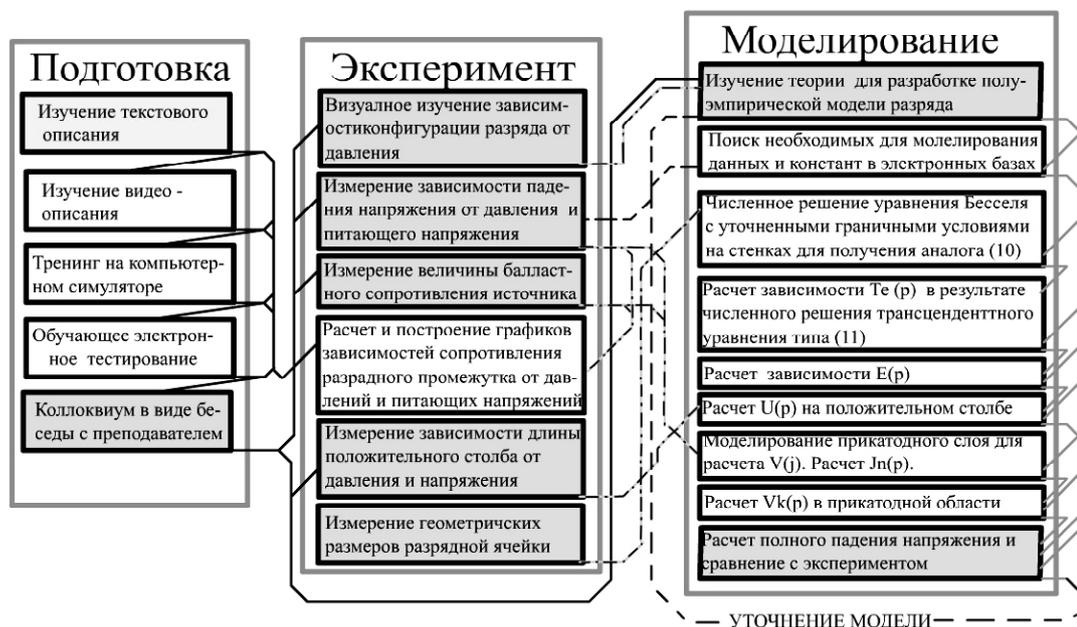


Рис. 7. Алгоритм выполнения углубленной лабораторной работы «Исследование газового разряда в воздухе»: блоки модулей «Подготовка» и «Эксперимент» соответствуют модернизированной работе в рамках традиционного подхода к организации учебного практикума; блок «Моделирование» реализует предложенную концепцию приближения лабораторной работы к научному исследованию в результате использования информационных технологий. Серым цветом помечены традиционные для лабораторных практикумов модули, белым – модули, использующие компьютерные и информационные технологии.

Литература

1. Исследовательские работы школьников. [Электронный ресурс] / Уроки, справочники, рефераты [Сайт]. [2012]. URL: <http://do.gendocs.ru/docs/index-197350.html> (дата обращения: 20.09.13).
2. Розман Г.А. Научная работа школьников и темы их исследований. [Электронный ресурс] / Моим ученикам [Сайт]. [2008]. URL: <http://mychildren.ucoz.ru/publ/3-1-0-17> (дата обращения: 20.09.13).
3. Васильева Г.Н. Исследовательская деятельность учащихся по физике // Актуальные задачи педагогики: материалы III межд. науч. конф. Чита: Издательство Молодой ученый, 2013. С. 91–93.
4. Исследовательские работы по физике. [Электронный ресурс] / Новосибирская открытая образовательная сеть [Сайт]. [2010]. URL: <http://www.edu54.ru/node/101734> (дата обращения: 20.09.2013).
5. Всероссийский конкурс научно-исследовательских работ школьников «Юниор». [Электронный ресурс] / Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» [Сайт]. URL: <http://merphi.ru/entrant/olimpiads/junior/> (дата обращения: 20.09.2013).
6. Фестиваль науки. Научная работа школьников. [Электронный ресурс] СУНЦ МГУ. Лаборатория научного творчества. [Сайт]. [2012]. URL: <http://www.aesc.msu.ru/nauchnaya-rabota-shkolnikov-vsunts-mgu.html> (дата обращения: 20.09.13).
7. Бутиков Е.И. Лаборатория компьютерного моделирования по физике колебаний // Компьютерные инструменты в образовании, 1999. № 5. С. 24–39.
8. Бутиков Е.И. Движения космических тел в компьютерных моделях. I. Задача Кеплера // Компьютерные инструменты в образовании», 2001. № 3/4. С. 20–44.
9. Венедиктов В.Ю., Микушев В.М., Надолинский А.А., Чирцов А.С. Опыт организации интенсивного обучения и эффективного контроля качества в бакалавриате по направлению «Прикладные математика и физика» // В сб. Материалы X Межд. Конф. «Физика в системе современного образования» (ФССО-09)», СПб, 31 мая – 4 июня 2009 г., Т. 1. СПб, 2009. С. 42–44.
10. Меркушев А.Г., Чирцов А.С. Интерактивная программа «Линейные цепи» // В сб. «Матер. XIV Межд. конф. «Современное образование: содержание, технологии, качество», 23 апр. 2008 г. СПб. 2008. С. 75–76.
11. Елкин Д.И., Цветов А.А., Чирцов А.С. Интерактивные тесты для мультимедийного курса общей физики // В сб. Матер. межд. конф. «Современное образование: содержание, технологии, качество» 19 апр. 2007 г. СПб, 2007. Т. 1. С. 261–263.
12. Марек В.П., Чирцов А.С. Использование мультимедийных ресурсов для организации самостоятельной работы студентов при реализации на Физическом факультете СПбГУ новых образовательных стандартов // В сб. «Материалы XV Межд. Конф. «Современное образование: содержание, технологии, качество» 22 апреля 2009 г.», Т. 1. СПб, 2009. С. 219–221.
13. Марек В.П., Смирнов В.Г., Микушев С.В., Чирцов А.С. Использование технологий виртуальной реальности в лекционных демонстрациях по курсам физики // В сб. «Физика в системе современного образования» (ФССО-11). Материалы XI Межд. Конф.», Волгоград, 19–23 сент. 2011г. Т. 2. С. 238–240.
14. Кириллова Н.М. Использование компьютера на уроках физики при выполнении лабораторных работ. [Электронный ресурс] / Конгресс конференций Информационные технологии в образовании. [Сайт]. URL: <http://ito.edu.ru/2009/Tomsk/II/II-0-39.html> (дата обращения: 20.09.13).
15. Баяндин Д.В., Мухин О.И. Модельный практикум и интерактивный задачник по физике на основе системы STRATUM 2000 // Компьютерные учебные программы, 2002. № 3. С. 28–37.
16. Электричество и магнетизм. Оптика и волны. Виртуальные лаборатории ЕНКА. [Электронный ресурс] / INT- Институт Новых Технологий: [сайт]. [2010]. URL: <http://www.int-edu.ru/object.php?m1=1033&m2=2&id=1030> (дата обращения: 10.12.10).
17. Виртуальный эксперимент и его использование в обучении химии. // «Методика обучения химии» [Сайт], URL: http://meth-chem.ucoz.ru/index/virtualnyj_eksperiment_i_ego_ispolzovanie_v_obuchenii_khimii/0-102 (дата обращения 25.03.13).
18. Бобович А.В., Колинко К.П., Космачев В.М., Чирцов А.С. Использование современных компьютерных технологий для информационной поддержки квалифицированного преподавания физики // Компьютерные учебные программы, 1999 № 3 (18). С. 8–16.
19. Монахов В.В., Стафеев С.К. и др. Назначение и опыт проведения интернет-олимпиад по физике // Физическое образование в ВУЗах, 2007. Т. 13, № 4. С. 53–63.
20. Компьютерные тренажеры. Учебный стенд по перезарядке ядерного реактора ЯЭУ «Перегрузчик» [Электронный ресурс] / Научно-производственная фирма АРГОС: [сайт]. [2009]. URL: http://argos-navy.ru/content/Computer_simulators (дата обращения: 26.11.10).
21. Куценко С.С., Сивченко Е.И. Использование компьютерных тренажеров при подготовке и проведении работ лабораторного практикума по физике // Физика в школе, 2006. № 7. С. 43–47.

22. Монахов В.В., Кашин А.Н., Кожедуб А.В и др. Автоматизированный практикум по физике: механика // Учебное Пособие для студентов 2 курса физического факультета СПбГУ, СПб.: Из-во СПбГУ, 1998.
23. Павлов Н.И. Автоматизированный практикум по гидравлике. Основы гидродинамики [Электронное пособие]. / Электронные издания для ВПО/НПО.СПО/: [сайт]. [2011]. URL: http://emediateca.ru/news/novoe_izdanie_pavlova_n_i_avtomatizirovannyj_praktikum_po_gidravlike_osnovy_gidrodinamiki_ehlektronnoe_posobie/2011-09-18-5 (дата обращения: 10.10.11).
24. Инновационно-образовательный комплекс «Лаборатория удаленного доступа кафедры 77» Национального исследовательского ядерного университета МИФИ [Электронный ресурс] / RNN – Российская национальная нанотехнологическая сеть: [сайт]. [2011]. URL: <http://www.rusnanonet.ru/nns/57667/> (дата обращения: 14.10.11).
25. Афонин А.М., Горелик В.С., Корниенко В.Н. и др. Распределенная физическая лаборатория удаленного доступа МГТУ им. Н.Э. Баумана. [Электронный ресурс] RNN – Информационно-коммуникационные технологии в образовании: [сайт]. [2011]. URL: www.ict.edu.ru/vconf/files/tm00_023.doc/ (дата обращения: 14.10.11).
26. Чирцов А.С., Марек В.П. Новые подходы к созданию и использованию мультимедийных ресурсов // Компьютерные инструменты в образовании, 2011. № 1. С. 58–68.
27. Марек В.П., Чирцов А.С., Микушев С.В., Абутин М.В. Новые варианты использования информационных и мультимедийных технологий для реализации непрерывного высшего образования // Физическое образование в ВУЗах, 2012. Т. 18, № 1. ISSN 1609 – 3143.
28. Catalogue of Physics experiments [Электронный ресурс] / LD DIDACTIC [Официальный сайт]. URL: <http://www.ld-didactic.de/index.php?id=54&L=2> (дата обращения: 12.05.13).
29. Современные проблемы физики газового разряда. [Электронный ресурс] / Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова [Сайт]. [2010] URL: <http://physelec.phys.msu.ru/science/discharge/discharge.html> (дата обращения: 12.11.13).
30. Газовый разряд. [Электронный ресурс] / Физика, химия, математика студентам и школьникам [Сайт]. [2012] URL: http://www.ph4s.ru/book_ph_razryad.html (дата обращения: 12.11.13).
31. Автаева С.В., Оторбаев Д.К., Скорняков А.В. Экспериментальное исследование характеристик тлеющего разряда в воздухе // Вестник КРСУ, 2002. № 2.
32. Shankar Mahadevan, Laxminarayan L. Raja. Simulations of direct-current airglow discharge at pressures 1 Torr: discharge model validation // J. Appl. Phys. 107, 093304 (2010).
33. W.A. Gambling, H. Edels. The high-pressure glow-discharge in air // Br. J. Appl. Phys. Vol. 5, № 1.
34. Грановский В.Л. Электрический ток в газе. Установившийся ток // «Наука», 1971.
35. Кудрявцев А.А., Смирнов А.С., Цендин Л.Д. Физика тлеющего разряда. СПб.: Изд-во Лань, 2010.
36. F. Paschen. «Ueber die zum Funkenbergang in Luft, Wasserstoff und Kohlensäurebeiverschiedenen Drucken erforderliche Potentialdifferenz». Annalen der Physik und Chemie 273 (5): 1889. P 69–96. DOI: 10.1002/andp.18892730505.
37. Lisovskiy V.A., Yakovin S.D., Yegorenkov V.D. (2000). «Low-pressure gas breakdown in uniform dc electric field». J. Phys. D: Appl. Phys. 33 (21): 2722–2730.
38. Вайнштейн Л.А., Собельман И.И., Юков Е.А. Сечения возбуждения атомов и ионов электронами. М.: Наука 1973.
39. Очкур В.И. О методе Борна-Оппенгеймера в теории атомных столкновений // ЖЭТФ, 1963, Т. 45. С. 753.
40. Гордеев С.В., Чирцов А.С. Столкновительные переходы между различающимися по спину высоковозбужденными уровнями атомов второй группы // Вестник С.Петербургского ун-та, сер. физ., 1991. Вып. 1, С. 146–149.
41. Марек В.П., Чирцов А.С. Исследование столкновительных переходов с изменением спина между высоковозбужденными состояниями атомов гелия методом лазерной накачки // Известия Международной Академии наук Высшей школы, 2012. №2 (60). С. 29–36.
42. Marek V., Chirtsov A. Research of collisional displacement of diverse highly excited states of Helium by means of the method of levels laser injection in cluster and plasma zone // Proceeding of Int. Scientific Seminar (Russia-China) «Physics of Laser Processes and Applications», 15–17 October, 2012, Ryazan, 2012, P. 96–101.
43. Phelps A.V. Collisional Transfer Data [Электронный ресурс] // Colorado.edu [сайт] (2012) URL: ftp://jila.colorado.edu/collision_data/electronneutral/electron.txt/ (дата обращения: 14.09.12).
44. Comsol 4.0a Plasma module user guide. [Электронный ресурс]. // HUMUSOFT [Сайт]. URL: <http://www.humusoft.com/produkty/comsol/ru/> (дата обращения: 14.09.10).
45. Буркова З.С., Чирцов А.С. Расширение возможностей программного пакета COMSOL для

численного моделирования нестационарной нелокальной плазмы / В сб «XVIII Межд.научно-методическая конф. «Современное образование: содержание, технологии, качество» 18 апр. 2012 г.» СПб., 2012. Т. 1. С. 148–149.

46. *Чирцов А.С., Якушев С.И.* Использование возможностей среды профессионального моделирования АНСИС и пакета «Математика» для сопровождения практикума решения задач по магнито-статике / В сб. «XVIII Межд. научно-методическая конф. «Современное образование: содержание, технологии, качество» 18 апр. 2012 г. СПб., 2012. Т. 1. С. 174–176.

47. *Марек В.П., Чирцов А.С.* Использование пакета МАТЕМАТИКА и технологий облачных вычислений для изучения особенностей взаимодействия постоянного магнита с высокотемпературным сверхпроводником / В сб. «XVIII Межд. научно-методическая конф. «Современное образование: содержание, технологии, качество» 18 апр. 2012 г. СПб., 2012. Т. 1. С. 149–151.

48. *Bogdanov E.A., Kudryavtsev A.A. and Ochikova Z.S.* “Main scenarios of spatial distribution of charged and neutral components in SF6 plasma” // IEEE Transactions on Plasma Sciences, 2013. Vol. 41.

49. *Богданов Е.А., Капустин К.Д., Кудрявцев А.А., Чирцов А.С.* Сопоставление различных вариантов гидродинамического (*fluid*) моделирования продольной структуры микроразряда атмосферного давления в гелии // ЖТФ, 2010. Т. 80. Вып. 10. С. 41–53.

50. *Кудрявцев А.А., Мустафаев А.С., Цыганов А.Б., Чирцов А.С., Яковлева В.И.* Спектры энергии электронов в гелии, наблюдаемые в микроплазменном детекторе CES // ЖТФ, 2012. Т. 82. Вып. 10. С. 1–6.

51. *Bogdanov E.A., Chirtsov A.S., Kudryavtsev A.A.* Fundamental non-ambipolarity of electron fluxes in 2D plasmas // Phys. Rev.Lett., 106.195001, 2011.

52. Райзер Ю.П.. «Физика газового разряда» – «Наука» Физматлит. 1987, с изменениями 1992 г.

53. *O. Ashihara.* The electron energy loss rates by polar molecules // Tokyo, University, Institute of Space and Aeronautical Science, 1975. Vol. 40, №. 530. P. 257.

54. *F.I. Dalidchik, Yu. S. Sayasov.* Recombination of electrons in molecular gases // J. Exptl. Theoret. Phys. (U.S.S.R.) 49, 302-305 (July, 1965).

55. *Rudge V.R.H.* Theory of ionization of atoms by electron impact // Rev.Mod.Phys., 1968. Vol. 40. P. 564.

DESIGNING STUDENT THESIS WITH MIND MAPS

Abstract

The paper presents new applications of computer technologies to the teaching of experimental physics. The upgrades of the laboratory sessions «Investigation spontaneous gas discharge in air» by computer simulation of gas discharge plasma has been proposed as a way of transformation of experimental training up to the self-sufficient student's research. The ways of plasma micro- and macro modeling are discussed. The comparison of experimental data with plasma macro modeling results are presented together with some next steps of development of symbiosis between lab experiments and computer-simulations.

Keywords: numerical modeling, laboratory, analytical research work of students, glow discharge, gas discharge plasma, the cathode layer, positive coulomb.

*Марек Вероника Петровна,
магистр по направлению
«Прикладные математика и
физика», студентка 4 курса Ecole
Polytechnic (Париж, Франция),
nika.marek@mail.ru*

*Чирцов Александр Сергеевич,
кандидат физико-математических
наук, профессор НИУ ИТМО,
Советник ректора Псковского
государственного университета,
alex_chirtsov@mail.ru.*



Наши авторы, 2014.
Our authors, 2014.