ДИСТАНЦИОННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ И АНАЛИЗ ЭМИССИОННЫХ СПЕКТРОВ В ИНТЕРНЕТ-ЛАБОРАТОРИИ ПО ДИАГНОСТИКЕ ПЛАЗМЫ И ПЛАЗМЕННЫМ НАНОТЕХНОЛОГИЯМ

А.М. Зимин¹, А.В. Шумов¹, В.И. Тройнов¹, И.А. Земцов^{1, 2}

¹Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия

²НИИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

Статья посвящена созданной в МГТУ им. Н.Э. Баумана Интернет-лаборатории по спектральной диагностике плазмы и плазменным нанотехнологиям, в которой удаленный экспериментатор может проводить через глобальную сеть как лабораторные практикумы, так и полноценные научные исследования. Приведена схема организации сетевого управления оборудованием через глобальную сеть. Разработанная автоматизированная диспетчерская система позволяет формировать сценарии экспериментов и выполнять затем в согласованный период времени удаленные опыты. Представлено специализированное программное обеспечение для дистанционной обработки и анализа зарегистрированных спектров. Рассмотрены особенности работы автоматизированного комплекса при проведении учебных практикумов по атомной спектроскопии и исследовательских работ по молекулярной спектроскопии изотопов водорода и нанотехнологиям. На основе технологий, разработанных в Интернет-лаборатории, в НИИЦ «Курчатовский институт» создана система молекулярной диагностики плазмы изотопов водорода на токамаке Т-10.

Ключевые слова: диагностика плазмы, Интернет-лаборатория, удаленная обработка эмиссионных спектров, молекулярная диагностика плазмы токамака, плазменные нанотехнологии.

REMOTE REGISTRATION AND ANALYSIS OF EMISSION SPECTRA IN THE INTERNET LABORATORY FOR PLASMA DIAGNOSTICS AND NANOTECHNOLOGIES

A.M. Zimin¹, A.V. Shumov¹, V.I. Troynov¹, I.A. Zemtsov^{1, 2}

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

²NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

The article is devoted to the created in BMSTU Internet laboratory for spectral plasma diagnostics, in which a remote experimenter can conduct laboratory workshops and full-fledged scientific research via a global network. The scheme of organization of network management of equipment via the global network is given. The developed automated dispatch system allows you to create experiment scenarios and then perform remote experiments in an agreed period of time. Specialized software for remote processing and analysis of recorded spectra is presented. The features of the automated complex during training workshops and research are considered. For registration and analysis of atomic-molecular spectra of T-10 tokamak plasma using the technology developed in the laboratory, a molecular diagnostic system has been created.

Key words: spectral plasma diagnostics, Internet laboratory, remote processing of emission spectra, molecular diagnostics of tokamak plasma, plasma nanotechnology.

DOI:10.21517/0202-3822-2020-43-1-84-94

ВВЕДЕНИЕ

В учебном процессе и научных исследованиях все большую роль играют современные информационные и телекоммуникационные технологии (ИКТ). Для подготовки высококвалифицированных выпускников классических и технических университетов, владеющих навыками работы с современным исследовательским оборудованием и готовых сразу же после окончания обучения включаться в процесс исследований в ведущих НИИ, в настоящее время имеется острая необходимость в индивидуализации лабораторных практикумов и существенном повышении уровня учебно-исследовательской работы студентов. Это требует постоянного расширения перечня доступных им современных, а зачастую и уникальных экспериментальных стендов. Новые возможности в совершенствовании этих сторон учебно-исследовательского процесса предоставляет организация сетевого доступа к сложным научно-учебным установкам [1—4], поскольку при этом оборудование становится доступным студентам сразу нескольких учебных заведений, территориально удаленных друг от друга. С некоторыми современными лабораториями удаленного доступа, созданными в университетах различных стран, можно ознакомиться в коллективной монографии [5], а один из примеров современной учебной физической лаборатории описан в работе [6].

В настоящей статье рассмотрены возможности углублённой подготовки студентов технических университетов, выпускающих для ведущих научно-исследовательских институтов специалистов по физике низко- и высокотемпературной плазмы и её различным техническим приложениям, в области спектральной диагностики плазмы. С этой целью в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана (МГТУ им. Н.Э. Баумана) была создана Интернет-лаборатория [7], которая предусматривала проведение сетевых практикумов с удалённым доступом по спектральному анализу излучения различных разрядов. В системе ИНДУС [2], разработанной авторами с целью всесторонней поддержки удалённых экспериментов, программный комплекс для функционирования Интернет-лаборатории при формировании сценария опыта обеспечивал диалог удалённого пользователя с Web-сервером, а также реализовал выполнение эксперимента с заданными им параметрами и трансляцию результатов на Web-сайт практикума.

На всех этапах выполнения практикума осуществлялась его методическая поддержка с помощью обучающей подсистемы, которая содержала описание стенда и методики измерений, а также различные справочные материалы. В такой конфигурации лаборатория удалённого доступа успешно использовалась в течение нескольких лет в учебном процессе при проведении лабораторных практикумов как по общему курсу физики, так и по диагностике плазмы, пока физически и морально не устарела его аппаратная база, основанная на применении в качестве спектрального прибора монохроматора МДР-23.

В последующем авторами настоящей статьи была создана интегрированная сетевая лаборатория по спектроскопии плазмы, основанная на удалённом управлении современным спектральным прибором с электронной системой регистрации и рассчитанная на проведение не только учебных, но и полноценных научных исследований. С целью расширения возможностей лаборатории с точки зрения анализа всё большей совокупности физических процессов она постоянно совершенствовалась. При этом модернизация не ограничивалась только добавлением новых объектов исследований, но была направлена и на всё более широкое использование ИКТ при проведении удалённых экспериментов и оперативной сетевой обработке первичных результатов. Рассмотрим далее особенности учебно-научной спектроскопической лаборатории при её использовании в различных целях.

УЧЕБНАЯ ИНТЕРНЕТ-ЛАБОРАТОРИЯ «СПЕКТРОМЕТРИЯ ПЛАЗМЫ»

Для проведения сетевых лабораторных практикумов создан программно-аппаратный комплекс [5, 8] удалённого управления современным экспериментальным оборудованием для спектральной диагностики плазмы (рис. 1). Его основу составляет многоканальный спектрометр AvaSpec-2048, связанный с персональным компьютером посредством USB-интерфейса.

Рис. 1. Поток команд и данных в лаборатории удалённого доступа «Спектрометрия плазмы»

Связь удалённого пользователя с автоматизированным стендом для диагностики плазмы в этом комплексе осуществляется с помощью сетевых средств при использовании различных протоколов обмена данными и командами. При этом с целью обеспечения безопасной работы аппаратуры Web-сервер лаборатории и управляющий работой спектральной аппаратуры компьютер (Lab-сервер) физически разделены. При случайном разрыве связи удалённого клиента с сервером управляющий компьютер продолжает выполнение эксперимента по условиям, заданным пользователем, и режим работы стенда не нарушается.

Управление электронными системами спектрометра осуществляется с помощью встроенного микропроцессора, который поддерживает также обмен командами и данными с Lab-сервером. Используемая нами конфигурация прибора рассчитана на видимый диапазон длин волн и включает четыре канала, различающихся диапазонами регистрации излучения, характеристиками используемых дифракционных решёток, размерами щелей, фильтрами для обрезания гармоник второго порядка.

Управляющий работой спектрометра Lab-сервер связан локальной сетью с Web-сервером, доступным из сети Интернет. При проведении сетевого эксперимента с помощью генерируемого посредством PHP-скриптов интерфейса удалённого управления в виде динамических HTML-страниц задаются режим и параметры работы спектрометра, которые после проверки на корректность заносятся в интегрированную базу данных и затем реализуются.

Структура и взаимодействие компонентов программно-аппаратного комплекса. Программное обеспечение комплекса (рис. 2) поддерживает функционирование подсистем регистрации, авторизации, обучения пользователей и контроля их знаний, пользовательские Web-интерфейсы удалённого управления и сетевой обработки результатов проведённых экспериментов, а также включает в себя интегрированную базу данных [9], реализованную под управлением MySQL.

Рис. 2. Схема связей элементов программно-аппаратного комплекса учебной Интернет-лаборатории

Созданная нами Windows-служба SpectrService периодически опрашивает таблицы базы данных, в которых хранится информация об отправленных удалёнными пользователями запросах на регистрацию спектров, и ставит соответствующие сценарии в очередь на выполнение. Удалённому экспериментатору оперативно предоставляются сообщения о ходе проведения эксперимента («сценарий поставлен в очередь на выполнение», «проводится регистрация спектра» и т.п.). Заказ на проведение удалённого учебного эксперимента, поддержка его проведения и анализ результатов также обеспечиваются работой созданной диспетчерской системы [5, 9].

После регистрации на сайте лаборатории и согласования по электронной почте условий проведения практикума пользователь может через свой личный кабинет сформировать заявку на проведение выбранной им лабораторной работы в удобное для него время. При этом предусмотрена также возможность группового выполнения практикумов под руководством удалённого преподавателя. Администратор лаборатории просматривает поступившие заявки и заносит их в график экспериментов, после чего управление их выполнением и сохранением результатов происходит в автоматическом режиме. В обусловленное время система разрешает формирование сценария и задание параметров удалённого эксперимента. При этом доступ к сетевому пульту управления стендом становится возможным лишь после успешного прохождения теста об усвоении опубликованных на сайте ме-

тодических материалов. Контроль за допустимыми значениями условий эксперимента и его осуществимостью также осуществляется автоматически.

Сайт Интернет-лаборатории. Web-сервер лаборатории, доступный для регистрации пользователей и подачи заявок на проведение практикумов только в рабочее время по адресу <http://plasma.bmstu.ru>, позволяет проводить в согласованное с администрацией лаборатории время учебные практикумы, исследовательские работы и осуществлять обработку первичных данных. Электронные учебные пособия, опубликованные также и на страницах доступного круглосуточно демо-сайта <http://lud.bmstu.ru> (русскоязычная и англоязычная версии), позволяют студентам подготовиться к проведению практикумов и содержат краткие теоретические основы, необходимую информацию об используемом оборудовании, перечне и пределах изменения параметров управления системой диагностики, методиках и последовательности измерений (рис. 3). Изучение этих материалов даёт возможность пройти входное тестирование, после которого студенты могут быть допущены к проведению удалённого эксперимента.

Рис. 3. Некоторые страницы сайта Интернет-лаборатории: а — главная страница; б — описание спектрального оборудования

Windows-служба SpectrService по USB-интерфейсу задаёт режим работы спектрометра в соответствии с указанными удалённым пользователем параметрами и по завершении регистрации спектра обеспечивает сохранение результатов на Web-сервере, а в базу данных заносятся только имена файлов с результатами. Такой подход позволяет реализовать на спектрометрическом комплексе многопользовательский режим работы, что особенно важно при проведении учебных практикумов для удалённых групп студентов, находящихся в компьютерных классах своего университета.

По окончании опыта удалённый экспериментатор через личный кабинет получает доступ к его результатам. Он реализован с помощью PHP-скриптов, которые предоставляют пользователю результаты в графическом и табличном видах как во время проведения сеанса управления, так и по его завершении. Созданное программное обеспечение даёт дополнительные возможности для обработки первичных данных с учётом специфики источника излучения.

Интегрированная база данных содержит информацию о перечне и атрибутах практикумов в Интернет-лаборатории, об удалённых пользователях, о сеансах удалённого управления оборудованием конкретным пользователем, а также о статистике загрузки и режимах работы оборудования Интернет-лаборатории.

В лабораторных практикумах используются источники излучения, позволяющие регистрировать сплошные и линейчатые атомные или ионные спектры разрядов. В качестве объектов исследования применяются газоразрядные лампы (AvaLight-CAL, OSRAM, набор ламп ВСБ-2 с различным наполнением), которые широко используются для калибровки спектрофотометрических устройств.

Удалённое проведение учебных экспериментов. Сгенерированный с помощью PHP-скриптов интерфейс удалённого пользователя (рис. 4) позволяет изменять основные параметры регистрации спектра — время интегрирования и количество регистраций для усреднения, задавать параметры сглаживания, включать, выключать и настраивать режимы коррекции по динамическому темновому фону и детектирования насыщения.

Задать параметры сканирования			
	Время интегрирования (IT): 100 мс	Уровень детектирования насыщения (SDL): 1	Сглаживание (SM):
	Количество регистраций спектра для усреднения (AV): 2	☒ Коррекция по динамическому темновому фону (CDD): 100 %	Master: 0 Slave1: 0 Slave2: 0 Slave3: 0

Рис. 4. Интерфейс удалённого управления спектрометром

Перечень проводимых удалённых практикумов включает в себя несколько лабораторных работ. Первая из них посвящена освоению методики корректной регистрации спектра исследуемого источника излучения, который затем будет использован при выполнении следующих практикумов.

МОДЕРНИЗАЦИЯ ПРОГРАММНОЙ ЧАСТИ ИНТЕРНЕТ-ЛАБОРАТОРИИ

В процессе эксплуатации учебной лаборатории она была несколько раз модернизирована. Этот процесс относится как к программному комплексу для поддержки проведения удалённого эксперимента и сетевой обработки результатов, так и к аппаратной части лаборатории.

Принцип построения последовательности выполняемых в лаборатории практикумов и научных исследований основан на движении «от простого к сложному». Если на первых этапах учебно-научных исследований основное внимание уделялось методикам корректной регистрации спектров и получению соответствующих навыков, то на последующих — их оперативному анализу. На завершающих этапах экспериментов при проведении подробного анализа спектров предусматриваются автоматизированная обработка и обобщение результатов. Таким образом, отработанные в предыдущих практикумах операции с учётом полученных студентами навыков занимают в последующем существенно меньшее время, что позволяет сократить длительность проведения удалённого практикума (например, в нашей лаборатории оно составляет 45 мин, включая входное тестирование).

Так, если на первом этапе после регистрации первичных данных предусмотрен лишь анализ спектра с помощью атласа спектральных линий в режиме offline (использование справочника или электронных таблиц [10]), для определения состава при исследовании параметров плазмы разряда было разработано специальное программное обеспечение, позволяющее на более поздних этапах автоматизировать и существенно ускорить этот процесс с учётом ранее полученных навыков «ручного» распознавания.

Автоматизированное распознавание спектра. Разработанный интерфейс сетевой обработки результатов предназначен для анализа первичных данных как во всём регистрируемом диапазоне длин волн, так и на отдельных его участках, что особенно актуально при наличии в спектре большого числа спектральных линий. При этом пользователю выводится информация о насыщенных спектральных линиях (длины волн, на которых произошла засветка пикселей CCD-линейки, а интенсивность сигнала определена с ошибкой). При проведении первого практикума «Техника и практика спектрометрии» в его ранних версиях интерфейс обработки данных предусматривал лишь отображение зарегистрированного спектра и табличных спектральных линий некоторых выбранных элементов из атласа (для визуализации линий элементов использовалась база данных Национального института стандартов и технологии США <https://www.nist.gov/>).

«Качественный анализ спектра источника излучения» и «Определение электронной температуры плазмы». Последующие практикумы подразумевали определение методами спектральной диагностики плазмы состава исследуемых излучающих сред различных источников излучения, а затем и нахождение параметров самой плазмы. Обязательным условием допуска студента к каждому последующему практикуму является выполнение предыдущего с получением соответствующих практических навыков.

В ходе создания необходимого Web-приложения были разработаны алгоритмы и соответствующие скрипты, поддерживающие следующие функции:

- визуализация и масштабирование спектров;
- работа с базой данных спектральных линий;
- автоматизированный поиск линий по максимумам интенсивности;
- идентификация найденных линий путём сравнения их длин волн с табличными значениями;
- вывод и сохранение информации об идентифицированных линиях с квантовыми характеристиками соответствующих электронных переходов.

На рис. 5 показан Web-интерфейс для визуализации и качественного анализа зарегистрированных спектров.

Рис. 5. Web-интерфейс для удалённой обработки и качественного анализа зарегистрированных спектров

Здесь реализована возможность обработки полного (составного) спектра, зарегистрированного с оптимальными для каждого канала спектрометра параметрами при выполнении предыдущего практикума. Удалённому пользователю доступны функции масштабирования спектра для выбора интересующего участка длин волн. Так как для построения графика использованы java-скрипты, масштабирование спектра происходит без обновления всей HTML-страницы и не требует обмена данными с Web-сервером.

Следующим этапом работы с приложением является загрузка характеристик спектральных линий из баз данных. Пользователь в соответствующих разделах страницы выбирает элемент, указывает диапазон длин волн. Также в приложении можно задать минимальную табличную интенсивность линии в процентах от максимума. Это позволяет исключить из рассмотрения слабые спектральные линии с высокими квантовыми числами, которые не наблюдаются в плазме в условиях проводимых экспериментов. После этого, нажав кнопку «Построить», пользователь отправляет запрос на поиск линий в базе данных. Для удобства проведения анализа спектральные линии выбранных элементов из базы данных накладываются поверх зарегистрированного спектра. При наведении пользователем курсора на выбранную спектральную линию она подсвечивается, а в таблице выделяется строка с квантовыми характеристиками электронного перехода, соответствующего выбранной линии.

В разработанном Web-приложении реализован автоматический поиск пиков интенсивности, соответствующих линиям в спектре. С целью возможного проведения последующей корректировки списка линий предусмотрены функции добавления и удаления пиков с помощью кнопок мыши. Если пользователь осуществил загрузку спектральных линий элементов из базы данных, то после поиска пиков интенсивности автоматически запускается функция их идентификации. Для каждого пика интенсивности производится сравнение его длины волны с табличными значениями. Если разность значений длин волн оказывается меньше оптического разрешения спектрометра, линия считается идентифицированной и ей ставятся в соответствие табличные квантовые характеристики данного электронного перехода. На рис. 6 показан участок спектра с идентифицированными линиями. Они помечены большими зелёными кружками. Если же одной линии из зарегистрированного спектра соответствуют несколько линий для выбранного элемента из базы данных, то она считается переналоженной и на спектре отмечается красным кружком.

Рис. 6. Идентификация линий в спектре

На рис. 7 показана итоговая таблица результатов распознавания спектра, содержащая список идентифицированных линий.

Wavelengths, nm (in spectrum)	Rel. Intensities (in spectrum)	Element (atom or ion)	Wavelengths, nm	A_{ki}, s^{-1}	$E_i - E_k, eV$	$g_i - g_k$
696.57	13615	ArI	696.543	6390000	11.548 - 13.328	5 - 5
703.03	52	ArI	703.025	2670000	13.076 - 14.839	7 - 7
714.68	563	ArI	714.704	625000	11.548 - 13.283	5 - 5
727.31	3062	ArI	727.294	1830000	11.624 - 13.328	3 - 3
737.23	52	ArI	737.212	1900000	13.076 - 14.757	7 - 7
738.43	4911	ArI	738.398	8470000	11.624 - 13.302	3 - 3
750.37	12548	ArI	750.387	44500000	11.828 - 13.480	3 - 3
751.44	4916	ArI	751.465	40200000	11.624 - 13.273	3 - 3
763.49	15878	ArI	763.511	24500000	11.548 - 13.172	5 - 5
772.43	11565	ArI	772.421	11700000	11.723 - 13.328	1 - 1
794.80	4617	ArI	794.818	18600000	11.723 - 13.283	1 - 1
800.60	3585	ArI	800.616	4900000	11.624 - 13.172	3 - 3
801.45	3367	ArI	801.479	9280000	11.548 - 13.095	5 - 5

Рис. 7. Список идентифицированных линий

Таким образом, разработанное Web-приложение позволяет осуществить быстрые автоматизированные поиск и идентификацию спектральных линий. При этом разработанный интерфейс даёт возможность отобразить поверх экспериментального спектра табличные линии, соответствующие различным элементам для данного участка длин волн. Такая визуализация существенно облегчает качественный анализ сложных спектров, содержащих спектральные линии нескольких элементов. Список идентифицированных линий с характеристиками электронных переходов, полученный студентом в результате данной лабораторной работы, позволяет в дальнейшем приступить к оценке электронной температуры плазмы, что составляет основное содержание третьего лабораторного практикума по спектроскопии плазмы.

Отметим, что в дальнейшем предполагается включить в список исследуемых объектов изучения и разряды с молекулярными спектрами. В этом случае к базе данных будут подключены также таблицы и атлас молекулярных полос изотопов водорода [11].

МОДЕРНИЗАЦИЯ АППАРАТНОЙ ЧАСТИ ИНТЕРНЕТ-ЛАБОРАТОРИИ

Исследовательская работа студентов является очень важным компонентом, характеризующим уровень и эффективность инженерно-физического образования. В этом направлении в дополнение к учебным практикумам прежде всего была существенно расширена научная часть лаборатории, предоставляющая новые возможности для изучения плазменных нанотехнологий как студентам, так и научному персоналу. В частности, удалённые пользователи теперь получили возможность изменять параметры работы исследуемых источников излучения, используемых для плазменного нанесения плёнок и покрытий с требуемыми характеристиками (например, магнетронных распылительных систем).

Модернизация аппаратной базы, расширяющая исследовательский потенциал Интернет-лаборатории. Научная часть лаборатории позволяет изучать и удалённо корректировать рабочие параметры некоторых подсистем обслуживания плазменных устройств. Таким образом студентам и научным работникам предоставляется возможность использовать уникальное оборудование и современные экспериментальные методики. Список параметров, присутствующих в учебных сценариях эксперимента, и их диапазоны изменения при выполнении научных опытов существенно расширены, что требует повышенного внимания к обеспечению степени защиты оборудования от возможных неверных действий удалённого пользователя.

Студенты старших курсов, инженерный персонал и научные сотрудники могут получить доступ к индивидуальному пульту для управления режимами работы плазменных устройств и проводить экспериментальные исследования по генерации и ускорению заряженных частиц в магнетронном разряде, который реализуется в широком диапазоне давлений практически любого плазмообразующего газа. На рис. 8 приведён интерфейс для проведения учебно-научных экспериментов по плазменным нанотехнологиям [12]. Такие эксперименты проводятся в течение 10 лет студентами и сотрудниками МГТУ им. Н.Э. Баумана, НИЯУ МИФИ и МЭИ.

В отличие от учебной части лаборатории здесь используется не только спектральное диагностическое оборудование (оно в отличие от [13] оснащено здесь системой двухкоординатного перемещения приёмника излучения в вакууме), но и система динамической откачки вакуумной камеры, где реализуется разряд.

Созданная система дистанционного управления позволяет изучать пространственные распределения параметров плазмы, а также изменять состав и давление плазмообразующего газа и, таким образом, изменять поток и энергетический спектр частиц, поступающих на подложку. Для систем удалённого управления натеканием плазмообразующего газа и двухкоординатного перемещения оптической головки были разработаны отдельные Web-приложения [5, 8].

Рис. 8. Web-страница учебно-научной лаборатории

Сетевой эксперимент проводится с помощью интерфейса удалённого управления, который также генерируется с помощью PHP-скриптов в виде HTML-страницы. В ходе эксперимента устанавливаются параметры разряда и системы регистрации спектра, которые проверяются на предмет осуществимости и безопасности выполнения.

Модернизация системы удалённого доступа и расширение возможностей преподавателя при выполнении практикумов. Модернизация Интернет-лаборатории включала в себя и некоторые изменения в организации связи составляющих лаборатории и функций преподавателя в проведении удалённого практикума. Так, на рис. 1 была показана модернизированная схема сопряжения объектов лаборатории [14], где пунктирной линией отмечено добавленное в 2019 г. устройство удалённого

Рис. 9. Личный кабинет преподавателя в модернизированной Интернет-лаборатории

управления питанием источника излучения с помощью аппаратуры Cloogy, основанной на использовании технологии ZigBee. По сравнению с исходной реализацией, где включение и выключение исследуемого источника излучения проводились на экспериментальной установке оператором вручную, в настоящее время предусмотрена возможность удалённого управления питанием источника излучения с помощью аппаратуры Cloogy. Модернизированный интерфейс личного кабинета преподавателя, дополненный кнопкой включения источника излучения в режиме онлайн, представлен на рис. 9. Отметим, что преподаватель может также включать и выключать источник излучения с любого устройства под управлением операционных систем iOS, Android, Linux, macOS или Windows, используя сайт <https://mydata.cloogy.com> или соответствующие приложения Cloogy.

Описанные новации будут также использованы и в научной части лаборатории, где основными объектами исследования в настоящее время являются стационарные и нестационарные тороидальные плазменные образования в молекулярных средах (изотопы водорода, воздух).

В заключение отметим, что описанная в настоящей статье Интернет-лаборатория стала прототипом созданной в Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт» системы молекулярной диагностики плазмы изотопов водорода на токамаке T-10 [15], которая предоставляет удалённому экспериментатору возможность осуществлять следующие операции:

- регистрироваться в базе данных системы;
- заказывать в своём личном кабинете сеансы на участие в удалённой диагностике плазмы токамака во время проводимых экспериментов;
- формировать сценарии удалённого управления диагностическим оборудованием;
- просматривать и обрабатывать спектры, полученные в результате выполнения сценариев.

На рис. 10 представлены страницы сайта системы удалённой молекулярной диагностики плазмы токамака с описанием оборудования (а) и распознаванием участка молекулярного спектра дейтерия (б).

а

б

Рис. 10. Страницы сайта системы удалённой молекулярной диагностики плазмы токамака с описанием оборудования (а) и распознаванием участка молекулярного спектра дейтерия (б)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате организации сетевого доступа к сложному и уникальному оборудованию в МГТУ им. Н.Э. Баумана создана и постоянно совершенствуется Интернет-лаборатория по спектральной диагностике плазмы, используемая в течение ряда лет в учебном процессе нескольких российских университетов. В последние годы проведена её глубокая модернизация, затрагивающая как аппаратную, так и программную часть лаборатории.

Одно из направлений модернизации привело к созданию учебно-исследовательской Интернет-лаборатории по плазменным нанотехнологиям, позволяющей экспериментально изучать пространственные распределения основных параметров плазмы и проводить оптимизацию плазменных устройств.

Доступ к работе в лаборатории может осуществляться не только из РФ, но и из других стран, для чего сайт лаборатории выполнен двуязычным (русский и английский языки). Созданная информационно-диспетчерская система позволяет удалённым пользователям формировать, а затем выполнять индивидуальные сценарии экспериментов, используя технологии удалённой регистрации и обработки первичных данных опытов.

Разработано программно-методическое обеспечение для поддержки проведения практикумов, содержащее наряду с подсистемами обучения и тестирования автоматизированную систему доступа к оборудованию, сбора и обработки результатов экспериментов. Предусмотрена возможность организации групповых практических занятий студентов под контролем преподавателя. Многолетнее проведение практикумов по диагностике плазмы показало достижение студентами ведущих университетов более высокого уровня практических навыков, чем при использовании только традиционных методик выполнения лабораторных работ.

REFERENCES

1. **Arodzero A.** World Wide Student Laboratory Project. — E-Print archive arXiv, Physics #9806044. February 20, 1995. Revised June 19, 1998. 8 p.
2. **Norenkov I.P., Zimin A.M.** Information technologies in education. — M.: Pub.house of N.E.Bauman MSTU, 2004. 352 p. (in Russian).
3. **Informmatization** of education: directions, tools, technologies. Ed. by Maslov S.I. — M.: Pub.house of MEI, 2004. 868 p. (in Russian).
4. **Gomes L., Bogosyan S.** Current trends in remote laboratories. — IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, vol. 56, № 12, pp. 4744—4756.
5. **Online Experimentation: Emerging Technologies and IoT.** Ed. A. Cardoso, A.M. Lopes, M.T. Restivo. — Barcelona: International Frequency Sensor Association Publishing S.L., 2016. 496 p.
6. **Fedorovich S.D., Shcherbakov P.P., Lukashevskiy M.V., Krylova E.V.** Development of an automated laboratory of mechanics and molecular physics with remote access. — Planning and providing of specialists training for the industrial and economic complex of the region, 2017, vol. 1, pp. 243—246 (in Russian).
7. **Zimin A.M., Averchenko V.A., Labzov S.Yu. et al.** Laboratory workshop on spectral plasma diagnostics with remote Internet access. — Informatsionnye tekhnologii (Information technologies), 2002, № 3, pp. 37—42 (in Russian).
8. **Zimin A.M., Shumov A.V., Krivitskiy S.E., Troynov V.I.** Automated networked educational and scientific laboratory on plasma spectroscopy. — Informatsionnye tekhnologii (Information technologies), 2011, № 6, pp. 72—78 (in Russian).
9. **Shumov A.V., Troynov V.I., Zimin A.M.** Dispatch and information system for control and keeping records of remote laboratory experiments. — In: Proc. of 3rd Experiment@ International Conference: Online Experimentation (exp.at'15). Ponta Delgada, Portugal, 2015, pp. 187—190.
10. **Zaydel A.N., Prokof'ev V.K., Rayskiy S.M. et al.** Tables of spectral lines. — M.: Nauka (Science), 1977. 800 p. (in Russian).
11. **Zimin A.M., Troynov V.I., Nurgaliev M.R.** Digital atlas of electronic-vibro-rotational transitions in deuterium and protium molecules. — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermo-nuclear Fusion), 2017, vol. 40, issue 4, pp. 86—91 (in Russian).

12. **Zimin A., Shumov A., Krivitskiy S., Troynov V.** The remote plasma nanotechnologies laboratory for experimental research and practical training — In: Proc. of the 2nd Experiment@ International Conference «Online Experimentation». Portugal, Coimbra, 2013, pp. 118—121.
13. **Gradov V.M., Zimin A.M., Krivitskiy S E., Shumov A.V.** Automated spectrometric complex for diagnostics of magnetron discharge plasma. — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2009, issue 1, pp. 64—71 (in Russian).
14. **Zimin A., Troynov V., Zemtsov I.** Upgraded plasma spectroscopy internet laboratory. — In: Proc. of 5th Experiment@ International Conference: Online Experimentation (exp.at'19). Funchal, Portugal, 2019, pp. 204—207.
15. **Zimin A.M., Troynov V.I., Krupin V.A. et al.** Remote network control plasma diagnostic system for tokamak T-10. — J. of Physics: Conference Series, 2016, vol. 747, № 1, p. 012021.

AUTHORS

Zimin A.M. N.E.Bauman MSTU, 2-ya Baumanskaya str. 5, 105005 Moscow, Russia; zimin_am@bmstu.ru

Shumov A.V. N.E.Bauman MSTU, 2-ya Baumanskaya str. 5, 105005 Moscow, Russia; shum_ov@mail.ru

Troynov V.I. N.E.Bauman MSTU, 2-ya Baumanskaya str. 5, 105005 Moscow, Russia; 3off_vlad@mail.ru

Zemtsov I.A. N.E.Bauman MSTU, 2-ya Baumanskaya str. 5, 105005 Moscow, Russia; NRC «Kurchatov Institute», pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; zemtsov_ia@nrcki.ru

Received 11 November 2019

Revised 25 December 2019

Accepted 30 December 2019

Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Thermonuclear Fusion, 2020, vol. 43, issue 1, pp. 84—94