УДК. 533.9.082

ПРИМЕНЕНИЕ ЭМИССИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ИЗМЕНЕНИЯ ПРОПУСКАНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ТРАКТА ИЗ-ЗА ДЕГРАДАЦИИ ВНУТРИКАМЕРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПЛАЗМЕННЫХ УСТАНОВОК

Д.С. Кутузов, Д.А. Щеглов, Н.А. Молодцов

НИИ «Курчатовский институт», Москва, Россия

Применение на физических установках оптических диагностик, таких как эмиссионная спектроскопия, томсоновское рассеяние и лазерная флуоресценция, может быть осложнено деградацией оптических внутрикамерных элементов (оптические окна, зеркала, призмы и пр.). Для решения данной проблемы должна проводиться оценка ухудшения пропускания оптического тракта диагностической системы в ходе эксплуатации установки. В работе предложен метод оценки ухудшения пропускания оптического тракта, основанный на измерении интенсивности спектральных линий. Принципы методики были продемонстрированы на плазменной установке ПС-1. Результаты экспериментов сравнивались с результатами, полученными методом рэлеевского рассеяния с помощью перестраиваемого по длинам волн источника лазерного излучения. Таким образом, показана возможность использования данного метода для оценки ухудшения пропускания оптического тракта с целью уточнения количественной информации о параметрах измеряемой плазмы.

Ключевые слова: коэффициент пропускания окон, радиационное воздействие, эмиссионная спектроскопия, рэлеевское рассеяние, оптический параметрический генератор.

EMISSION SPECTROSCOPY APPLICATION FOR CHANGES EVALUATION OF THE OPTICAL PATH TRANSMISSION DUE TO DEGRADATION OF THE PLASMA FACILITIES IN-VESSEL ELEMENTS

D.S. Kutuzov, D.A. Shcheglov, N.A. Molodtsov

NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

Use of the optical diagnostics, such as emission spectroscopy, Thomson scattering, and laser fluorescence, in physical installations can be complicated due to degradation of interior optical elements (mirrors, optical windows, etc.). To solve this problem, optical monitoring of transmission degradation of the diagnostic system should be carried out during the operation of the installation. This paper presents a method for estimating the transmission degradation of the optical path, based on measuring the intensity of spectral lines. The principles of the technique have been demonstrated on a PS-1 plasma device. The results of the experiments were compared with the data obtained by the Rayleigh scattering method using a tunable laser source. Thus, it has been shown that this method can be used to estimate degradation level of the optical path transmission in order to clarify the quantitative information on the measured plasma parameters.

Key words: windows optical transparency, influence of irradiation, emission spectroscopy, Rayleigh scattering, optical parametric, generator.

DOI: 10.21517/0202-3822-2019-42-1-66-73

ВВЕДЕНИЕ

Для получения информации о параметрах исследуемой плазмы с помощью таких методик, как оптическая эмиссионная спектроскопия (ОЭС), лазерно-индуцированная флуоресценция (ЛИФ) и томсоновское рассеяние (ТР), необходимо располагать результатами настройки и калибровки соответствующей диагностической системы. Настройка аппаратуры является необходимой процедурой, и её результаты учитываются в системе регистрации параметров диагностических систем. Наиболее сложной задачей при использовании оптических систем диагностики является оценка параметров внутрикамерных элементов (оптические окна, зеркала, призмы и пр.) при длительной работе установки. Эта проблема связана со сложностью разгерметизации установки с целью измерения деградации оптического тракта (особенно для больших установок). Характерным рабочим диапазоном для ОЭС является область $200 \text{ нм} < \lambda < 1000 \text{ нм}$, поэтому оценку параметров оптического тракта требуется проводить в широком спектральном диапазоне. Например, ОЭС [1] планируется использовать для мониторинга параметров рабочих газов и примесей в диверторной плазме сооружаемой установки ИТЭР. Это делает актуальными проблемы оценки состояния оптического тракта подобных систем. Для планируемых вариантов диагно-

стики ТР этой же установки в связи с релятивистскими эффектами необходимо проводить измерения спектра рассеяния до длины волны $\lambda \approx 0,35\lambda_L$, где λ_L — длина волны лазера, т.е. для характерных рабочих $\lambda_L = 1064$ нм или $\lambda_L = 532$ нм максимум спектра рассеяния будет находиться соответственно на 372 нм и 186 нм, как следует из работ [2, 3], описывающих создание системы ТР для ИТЭР.

Для калибровки аппаратуры, расположенной вне установки, широко используют эталонные лампы накаливания, а также другие современные методы калибровок. Для настройки многоканальных систем регистрации ТР применялись современные источники излучения, например, оптический параметрический генератор (ОПГ), перестраиваемый в широком диапазоне длины волны [4]. В работе [5] для определения пропускания оптического окна, используемого при измерении электронной температуры методом ТР, в качестве источника калибровочного излучения был применён тлеющий разряд в водороде при фиксированных условиях (рабочее давление газа, магнитное поле, напряжение разряда и др.). Применимость такого метода калибровки связана с воспроизводимостью спектра излучения используемого разряда. В диапазоне полихроматора ТР (450—700 нм) содержатся балмеровские линии водорода от H_α до H_γ , а также линии молекул водорода. Таким образом, фактически для наблюдения используется небольшое число ярких линий излучения, что упрощает техническую реализацию системы наблюдения.

Если система сбора излучения содержит элементы, расположенные внутри вакуумной камеры (например, оптические окна, зеркала, призмы и др.), то радиационное воздействие, плазменное распыление и осаждение плёнок могут существенно изменить их оптические характеристики. Например, осаждение плёнок оказалось серьёзной проблемой в экспериментах на установке TFTR с графитовым лимитером. При высокой мощности нагрева плазмы ошибка измерений электронной температуры методом ТР превысила 25% при $T_e = 9$ кэВ. Это явилось результатом образования углеродной плёнки на внутренней поверхности окна в ходе серии экспериментов [6]. Для углеродных плёнок характерна сильная зависимость коэффициента пропускания τ_λ от длины волны, что оказалось существенным при проведении серии измерений методом ЛИФ на гелиеподобном ионе углерода C V и особенно при измерении методом ОЭС в разрядах с графитовым лимитером на токамаке T-10 [5].

Оценка состояния оптического тракта диагностической системы является основной проблемой, рассматриваемой в настоящей работе. Для оценки состояния оптического тракта был предложен метод использования регистрации интенсивности двух и более спектральных линий конкретного энергетического уровня. Фактически рассматривается методика, использованная в работе [5], поскольку речь идёт о регистрации излучения разрядов плазменной установки. При разработке методики учитывались возможность проведения оценки пропускания оптических элементов в широком спектральном диапазоне и слабая зависимость результатов от параметров исследуемых разрядов. Для подтверждения работоспособности предложенного в настоящей статье метода и уточнения полученной с его помощью спектральной характеристики аппаратуры, применяемой для ОЭС, используется метод рэлеевского рассеяния.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И СХЕМА ИЗМЕРЕНИЙ

Исследование возможности демонстрации предложенной методики было проведено на установке ПС-1 [7] (рис. 1). Данная установка является открытой ловушкой с тороидальным дивертором (каспом), расположенным в сечении источника плазмы. Плазма создавалась вводом СВЧ-мощности в условиях электронного циклотронного резонанса, длительность разряда варьировалась в пределах 1—20 с.

Основным рабочим газом установки является аргон, поэтому все спектроскопические измерения были проведены на линиях атома Ar I и иона Ar II. Интерес к аргону связан, в частности, ещё и с тем, что этот газ наиболее часто применяется на плазменных установках, связанных с разработкой и применением плазменных технологий. Кроме того, достаточно часто при диагностике плазмы методом ОЭС применяются небольшие добавки инертных газов, включая аргон [8].

Рис. 1. Схема установки ПС-1

Рис. 2. Расположение диагностической аппаратуры: 1 — сканирующий модуль; 2 — оптоволоконно; 3 — монохроматор МДР-23; 4 — ФЭУ-84; 5 — осциллограф; 6 — персональный компьютер; 7 — брьюстеровское окно

объёме установки. Длительная эксплуатация установки приводит к образованию плёнок на оптических окнах установки, геометрия и размеры данной установки позволяют измерять пропускание окон и затем проводить их очистку.

МЕТОД ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ИНТЕНСИВНОСТЕЙ

В основе метода относительных интенсивностей были рассмотрены процесс излучения линий с конкретного выбранного энергетического уровня и их регистрация приёмной аппаратурой. Отношение потоков регистрируемых фотонов S_1/S_2 , где $S = A_{ki}n_k$, пропорционально отношению вероятностей спонтанных радиационных переходов A_1/A_2 . В этом случае отношение измеренных сигналов Φ_1/Φ_2 позволяет определить отношение спектральных чувствительностей всей системы наблюдения в целом $k(\lambda) = \tau_\lambda(\lambda)R(\lambda)$, где $\tau_\lambda(\lambda)$ — пропускание оптического тракта на соответствующих длинах волн, $R(\lambda)$ — спектральная чувствительность всей остальной части диагностики:

Спектроскопические измерения были проведены через зазор в диверторных катушках (см. сечение А—А на рис. 1) перпендикулярно оси установки (рис. 2), в этой же плоскости располагался передвижной одиночный ленгмюровский зонд для измерения температуры и плотности электронов плазмы, а также СВЧ-интерферометр, и рас-труб СВЧ-антенны. Система регистрации спектральных линий включает модуль пространственного сканирования, монохроматор МДР-23 со сменными дифракционными решётками. В качестве фотодетекторов были использованы фотоумножители ФЭУ 84-5 и Hamamatsu R562, сигналы регистрировались осциллографом Tektronix E-3032 с выводом на персональный компьютер. Калибровка чувствительности диагностики была проведена с помощью вольфрамовой лампы СИРШ 6-40, причём геометрия установки ПС-1 и условия её эксплуатации позволили выполнить калибровку с размещением лампы накаливания в

$$\frac{k(\lambda_1)}{k(\lambda_2)} = \frac{\Phi_1}{\Phi_2} \frac{A_2}{A_1}. \quad (1)$$

Например, если требуется определить отношение коэффициентов пропускания окна как единственного элемента оптического тракта в простейшей системе наблюдения, а калибровка аппаратуры, расположенной вне установки, проведена (известно отношение коэффициентов $R(\lambda_1)/R(\lambda_2)$), то параметр $\tau_\lambda(\lambda_1)/\tau_\lambda(\lambda_2)$ может быть найден по формуле

$$\frac{\tau_\lambda(\lambda_1)}{\tau_\lambda(\lambda_2)} = \frac{\Phi_1}{\Phi_2} \frac{R(\lambda_2)}{R(\lambda_1)} \frac{A_2}{A_1}. \quad (2)$$

Первым этапом программы ОЭС было составление групп из спектральных линий атома и ионов аргона, объединённых по номеру верхнего энергетического уровня данных линий. Для получения информации о спектральных переходах использовалась база данных NIST [10]. Длины волн отобранных линий приведены в табл. 1. Содержащийся в базе данных набор линий позволяет проводить измерения в спектральном диапазоне 250—1050 нм. Измерения методом ОЭС были выполнены с использованием всех групп линий Ar II, содержащихся в табл. 1, и линий атома аргона. Было проведено сравнение экспериментальных данных (значений $k(\lambda_1)/k(\lambda_2)$) и соответствующих значений, полученных при калибровке с помощью вольфрамовой лампы СИРШ 6-40 № 208 03.84. В диапазоне 500—650 нм расхождение в регистрируемой кривой от СИРШ 6-40 отличается из-за использования постоянного источника излучения. Следует отметить, что приведённая на рис. 2 система регистрации используется в экспериментах с применением ЛИФ и является перестраиваемой в широком спектральном диапазоне одноканальной аппаратурой. Воспроизводимость параметров разряда оценивалась исходя из данных ряда других диагностик (интерферометрия плазмы, данные о вводимой и отражённой СВЧ-мощности). Благодаря размерам установки имеется возможность оперативно снять окна и провести мониторинг их пропускания на спектрофотометре либо другим удобным способом. На ПС-1 существует независимая возможность измерять пропускание окон при помощи оптического параметрического осциллятора (ОПО) на основе Nd:YAG-лазера. Было показано, что изменение пропускания τ_λ слабо зависит от серии разрядов.

Таблица 1. Список групп линий, применяемых в работе

№	Длина волны линий в серии, нм			
1	912	966	1047	
2	801	842	978	
3	772	810	667	
4	764	801	922	
5	707	738	841	
6	715	747	841	
7	697	727	787	826
8	461	611		
9	443	668		
10	425	664		
11	459	617		
12	488	624		
13	379	488		
14	440	595	811	838
15	250,9	525,5	335,2	
16	348	272,5	266	
17	351,2	274,4	267,838	263,2
18	263,2	267,8	350	350,3

В том случае, если основной задачей оценки пропускания оптического окна в ходе проведения серии экспериментов (аналогично ситуации, описанной в работе [5]), например, в настоящих экспериментах на установке ПС-1, было показано, что для мониторинга начального участка ИК-диапазона (680—860 нм) достаточно использовать две группы по три линии.

Так как в короткой серии экспериментов на ПС-1, проведённых с целью демонстрации методики, изменение пропускания окон не происходило, т.е. сохранялась интенсивность спектроскопических линий при фиксированных параметрах разряда, было предложено продемонстрировать работоспособность методики, измерив относительную спектральную чувствительность всего измерительного тракта диагностики. Соответствующая зависимость отношений интенсивности спектральных линий, а значит, следуя формуле (1), и чувствительности $k(\lambda)$ от длины волны показана на рис. 3 и 4. Измерены интенсивности спектральных линий 696—727—772 нм и 706—738—840 нм. Для технической реализации мониторинга спектральной характеристики оптического тракта в заданном спектральном диапазоне необходимо применение многоканального фильтрового полихроматора. В табл. 1 указаны длины волн линий, объединённых по уровням, с которых происходит распад.

Рис. 3. Зависимость отношения линий Ag II от длины волны для диапазона 680—840 нм

Рис. 4. Зависимость отношения линий Ag II от длины волны для диапазона 440—640 нм

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДИКИ ПРИ РАДИАЦИОННОЙ ДЕГРАДАЦИИ ОПТИЧЕСКИХ ОКОН

Рис. 5. Зависимость пропускания кварцевого окна после радиационного облучения и набор возможных линий для диагностики изменения пропускания окна (цветом обозначен сдвиг полосы пропускания окна в результате облучения)

Аналогичный подход может быть применён для мониторинга коэффициента пропускания τ_λ оптических окон, находящихся в условиях гамма-нейтронного облучения. В качестве оптического материала для окон установки ИТЭР было предложено кварцевое стекло КУ-1 [11, 12]. Многочисленные исследования показали, что происходит изменение τ_λ в области ближнего УФ-диапазона. На рис. 5 показаны распределения зависимости пропускания от длины волны для облучённых образцов КУ-1, для графиков были использованы данные, приведённые в таблице работы [12].

При использовании рассматриваемой методики ОЭС для мониторинга пропускания облучаемых оптических окон были выбраны различные спектральные линии. В первом варианте может быть использована пара линий, находящихся в интервале наибольшего изменения τ_λ , во втором варианте одна линия находится в том же коротковолновом диапазоне, а вторая — на длинноволновом участке

спектра, где радиационное воздействие на пропускание τ_λ является несущественным.

Для применения данного метода были предложены показанные на рис. 5 линии $\lambda = 250,9$ нм, $\lambda = 334,5$ нм иона Ar III и линии иона He II $\lambda = 320,3$ нм, $\lambda = 1012,4$ нм. Наличие аргона в плазме ИТЭР связано с возможностью получения радиационно улучшенных режимов и реализацией ряда задач диагностики плазмы на этой установке. В частности, была рассмотрена возможность измерения ионной температуры на ионах аргона Ar XVI [13] с помощью доплеровского профиля.

ПРИМЕНЕНИЕ ПЕРЕСТРАИВАЕМОГО ПО ДЛИНАМ ВОЛН ИСТОЧНИКА ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ОЦЕНКЕ СОСТОЯНИЯ МЕТОДОМ РЭЛЕЕВСКОГО РАССЕЯНИЯ

Для сравнения и демонстрации работоспособности предложенной методики был использован метод рэлеевского рассеяния, широко применяющийся при абсолютной калибровке чувствительности систем томсоновского рассеяния, где источником служит, как правило, Nd:YAG-лазер, перестраиваемый по длинам волн.

Метод рэлеевского рассеяния уже применялся в экспериментах по ЛИФ [9] на установке ПС-1. В качестве линий флуоресценции были использованы линии иона аргона Ar II $\lambda_{\text{FLU}} = 460,9$ нм и $\lambda_{\text{FLU}} = 480,6$ нм, кроме того, были проведены измерения с применением резонансной флуоресценции на линии $\lambda_{\text{FLU}} = \lambda_{\text{L}} = 611,5$ нм. Таким образом, практический интерес представляла калибровка в области спектра, совпадающей в данном случае с рабочим диапазоном оптико-параметрического генератора (ОПГ) NT-342A-SH/SFG (рис. 6), использованного в экспериментах ЛИФ. Характеристики лазера:

Диапазон длины волны, нм . . .	210—2100
Энергия импульса ОПГ (450 нм), мДж . . .	15
Ширина линии, см^{-1} . . .	<5
Шаг сканирования «сигнального» импульса (420—709 нм) . . .	0,1
Шаг сканирования «холостого» импульса (710—2300 нм) . . .	1
Вторая гармоника «сигнального» импульса (210—419 нм) . . .	0,05
Длительность импульса, нс . . .	3—5
Типичный диаметр луча, мм . . .	4
Типичное расхождение луча, мрад . . .	<2
Длительность импульса, нс . . .	4—6
Стабильность энергии импульса, % . . .	<3,5
Частота повторения импульсов, Гц . . .	До 20

Максимальная энергия ОПГ составляет 15 мДж для длины волны 450 нм, в то время как энергия Nd:YAG-лазеров, применяемых в томсоновском рассеянии, составляет 0,5—2 Дж. С учётом зависимости сечения рэлеевского рассеяния от длины волны λ_{L} ($\sigma \approx 1/\lambda_{\text{L}}^4$) энергии ОПГ оказалось достаточно для калибровки оптической системы ПС-1 в указанном диапазоне. Следует отметить, что в конструкции ОПГ предусмотрен вывод первой, второй и третьей гармоник лазера накачки. Энергия лазера на второй гармонике $\lambda_{\text{L}} = 532$ нм составляет 65 мДж. В том случае, если выполнена оценка относительной спектральной чувствительности системы на плазменной установке, провести абсолютную калибровку можно, применив метод рэлеевского рассеяния для одной длины волны.

Одной из проблем, ограничивающих применение рэлеевского рассеяния для калибровки спектроскопической аппаратуры, является рассеяние зондирующего излучения на деталях плазменной установки. Роль этого фактора в значительной мере зависит от возможности обеспечить выход лазерного луча из установки. В экспериментах на ПС-1 был применён специальный узел с окном, расположенным под углом Брюстера к лазерной линии (см. рис. 2), что обеспечило минимальное отражение лазерного излучения в объёме установки. Кроме того, в видимом диапазоне спектра соотношение между интенсивностью рэлеевского рассеяния и интенсивностью излучения, рассеянного на деталях установки, является более благоприятным, чем в ближнем ИК-диапазоне, так как коэффициент отражения излучения от конструкционных материалов падает с уменьшением длины волны. Этот фактор является существенным,

Рис. 6. Диапазон длины волны и энергии различных типов ОПГ: — NT342C-SH/SFG; — NT342B-SH/SFG; — NT342A-SH/SFG

так как в поле зрения регистрирующей аппаратуры рассеянное излучение попадает после многократных отражений от элементов конструкции.

Поскольку основным рабочим газом на ПС-1 является аргон, было удобно проводить калибровку на этом газе. Измерения проводились при атмосферном давлении, затем давление в камере уменьшалось. Результаты калибровки методом рэлеевского рассеяния оказались близкими к данным, полученным ме-

Рис. 7. Сравнение чувствительности оптического тракта, полученное методом рэлеевского рассеяния и методом относительной интенсивности спектральных линий с эталонной лампой СИРШ 6-40: ▲ — метод спектральных линий; — аппроксимация для метода спектральных линий; □ — метод рэлеевского рассеяния; ● — лампа СИРШ 6-40

ионов аргона. Для начатой на ПС-1 разработки методики оценки локальной электронной температуры по отношению сигналов линий флуоресценции достаточно иметь относительную калибровку для соответствующей длины волны λ_{FLU} .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На установке ПС-1 была продемонстрирована предложенная авторами методика измерений спектральной чувствительности оптической системы путём регистрации интенсивности наборов спектральных линий. Результаты этих измерений хорошо согласуются с данными, полученными с помощью рэлеевского рассеяния. Источником излучения служил перестраиваемый по длинам волн оптический параметрический генератор. Показано, что оптическая эмиссионная спектроскопия может быть применена для оценки изменения пропускания оптического тракта больших установок (например, ИТЭР) при радиационном воздействии на него.

Авторы считают своим долгом выразить признательность коллективу установки ПС-1 за помощь в проведении экспериментов, а также выражают благодарность В.А. Жильцову за полезные обсуждения.

REFERENCES

1. Sugie T., Ogawa H., Nishitani T., Kasai S., Katsunuma J., Maruo M., Ebisawa K., Ando T., Kita Y. Divertor impurity monitor for International Thermonuclear Experimental Reactor. — Rev. Sci. Instrum., 1999, vol. 70, pp. 351—354.
2. Walsh M.J., Beurskens M., Carolan P.G., Gilbert M., Loughlin M., Morris A.W., Riccardo V., Xue Y., Huxford R.B., Walker G.I. Design challenges and analysis of the ITER core LIDAR Thomson scattering system. — Rev. Sci. Instrum., 2008, vol. 77, 10E525 (4 p.).
3. Bukreev I.M., Chernakov P.V., Kochergin M.M., Kukushkin A.B., Kukushkin A.S., Mukhin E.E., Razdobarin X.G., Samsonov D.S., Semenov V.V., Tolstyakov S.Yu., Kajita S., Masyukevich S.Y. A study of core Thomson scattering measurement in ITER using a multi-laser approach. — Nucl. Fusion, 2015, vol. 55, p. 053054.
4. Kurzan B., Murmann H.D. Edge and core Thomson scattering system and their calibration on the ASDEX upgrade tokamak. — Rev. Sci. Instrum., 2011, vol. 82, p. 053054.

5. **McNeil D.H.** Effect of changes in viewing transmission on high-temperature Thomson scattering data. — *Rev. Sci. Instrum.*, 1990, vol. 61, pp. 1263—1266.
6. **Moskalenko I.V., Shcheglov D.A.** The use of the laser induced fluorescence method in the study of helium-like carbon in a tokamak plasma. — *Nucl. Fusion*, 1988, № 1, pp. 169—172.
7. **Berezkin A.V., Bragin E.Yu., Zhil'tsov V.A., Kulygin V.M., Yanchenkov S.V.** Experimental investigation of plasma flows from open trap with the toroidal divertor under ECR discharge. — *VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion)*, 2014, vol. 37, issue 1, pp. 47—55 (in Russian).
8. **Donnelly V.M.** Plasma electron temperatures and electron energy distributions measured by trace rare gases optical emission spectroscopy. — *J. Phys. D. Appl. Phys.*, 2004, vol. 37, R217—R236.
9. **Moskalenko I.V., Kutuzov D.S., Molodtsov N.A., Shcheglov D.A., Zhil'tsov V.A., Bragin E.U., Yanchenkov S.V.** Laser-induced fluorescence measurements of ion density distribution on PS-1 device. — In: 44nd EPS Conf. on Plasma Phys. and Control. Fusion, 2017, p. 5.302.
10. **NIST Atomic Spectra Database Line Data.** <http://physics.nist.gov>.
11. **Orlinskiy D.V.** Study of radiation resistance and selection of windows material for thermonuclear reactor diagnostic systems. — *VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion)*, 2000, issue 2, pp. 21—30 (in Russian).
12. **Vukolov K.Yu., Levin B.A., Vukolov N.Yu.** Influence of irradiation and thermal annealing on optical transmission of quartz glass KU-1. — *VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion)*, 2000, issue 2, pp. 72—80 (in Russian).
13. **Donné A.J.H., Costley A.E., Barnsley R., Bindslev R., Boiven R., Conway G., Fisher R., Gianella R., Harthfuss H., von Hellermann M.G.** Chapter 7: diagnostics. — *Nucl. Fusion*, 2007, vol. 47, № 12, S337—S384.
14. **Lyu B., Chen J., Hu R.J., Wang F.D., Li Y.Y. et al.** Measurement of helium-like and hydrogen-like argon spectra using double-crystal X-ray spectrometers on EAST. — *Rev. Sci. Instrum.*, 2016, vol. 87, 11E326.
15. **Yan W., Chen Z.Y., Jin W., Lee S.G., Shi Y.J., Huang D.W., Tong R.H., Wang S.Y., Wei Y.N., Ma Y.N., Zhuang G.** Measurement of the electron and ion temperatures on joint Texas experimental tokamak. — *Rev. Sci. Instrum.*, 2016, vol. 87, 11E318.
16. **Tunable Nd:YAG-laser System NT342A-SH. EKSPLA.** <http://www.ekspla.com>.

AUTHORS

Kutuzov D.S. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; Kutuzov_DS@nrcki.ru

Shcheglov D.A. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia;
Shcheglov_DA@nrcki.ru

Molodtsov N.A. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia;
Molodtsov_NA@nrcki.ru

Received 15 May 2018
Revised 10 December 2018
Accepted 18 December 2018
Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Thermonuclear Fusion, 2019, vol. 42, issue 1, pp. 66—73