

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2026-1-19-28>

УДК 533.9.08; 621.039.66

## КОНЦЕПТУАЛЬНЫЙ ДИЗАЙН ДИАГНОСТИКИ ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ ТОКАМАКА КТМ

**Е. А. Кашикбаев<sup>1,2\*</sup>, Б. Ж. Чектыбаев<sup>1,2</sup>, А. Ж. Дүйсен<sup>1</sup>, Г. С. Курскиев<sup>3</sup>, Н. С. Жильцов<sup>3</sup>,  
Е. Е. Ткаченко<sup>3</sup>, Д. А. Ольховик<sup>1</sup>, А. Т. Кусаннов<sup>1</sup>, К. Женис<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

<sup>2</sup> НАО «Шакарим университет», Семей, Казахстан

<sup>3</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

\* E-mail для контактов: kashikbaev@nnc.kz

Статья посвящена выбору схемы реализации диагностики томсоновского рассеяния (ДТР) для токамака КТМ, предназначенной для проведения измерений пространственно-временной эволюции температурных и плотностных профилей электронов высокотемпературной плазмы. В статье приводится подробное описание наиболее важных систем диагностики, приведен обширный литературный обзор ДТР, реализованный на аналогичных установках. В результате анализа конструктивных особенностей токамака КТМ и существующих технических ограничений обоснован выбор схемы тангенциального зондирования в экваториальной плоскости как наиболее надёжной и практически реализуемой. Сформулированы ключевые технические требования к системе: диапазон измеряемых температур электронов – от 50 до 3100 эВ, диапазон плотностей – от  $1 \cdot 10^{19}$  до  $2,5 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ , а также наличие не менее 10 пространственных точек регистрации. Проведено сравнение различных схем размещения диагностического оборудования, включая вертикальное зондирование, и показана невозможность их реализации на КТМ по ряду инженерных и физических причин. Предложенная компоновка обеспечивает стабильность юстировки, защиту от паразитного излучения и высокое пространственное разрешение. Работа представляет собой обоснованный проект системы ДТР, реализация которого позволит существенно расширить диагностические возможности токамака КТМ для исследований плазмы и материалов в условиях управляемого термоядерного синтеза.

**Ключевые слова:** плазма, токамак, КТМ, ДТР, лазерное излучение, плотность плазмы.

### ВВЕДЕНИЕ

В Республике Казахстан создана уникальная электрофизическая установка токамак КТМ (Казахстанский токамак материаловедческий). Данная установка призвана решить проблему полномасштабного испытания материалов для установки ИТЕР и внести существенный вклад в развитие технологий управляемого термоядерного синтеза. Это первый в мире специализированный токамак, предназначенный для испытания функциональных и конструкционных материалов будущей термоядерной энергетики. Исследования, проводимые в настоящее время, направлены на повышение параметров плазмы и достижение проектных параметров установки.

Для достижения проектных параметров плазмы и проведения широкого спектра научных экспериментов необходимо внедрение современных диагностических систем (диагностик). В частности, ключевыми параметрами, определяющими поведение и устойчивость плазмы, являются температура и концентрация электронов. Одним из наиболее точных и универсальных методов диагностики, среди существующих, является метод томсоновского рассеяния, основанный на анализе рассеянного лазерного излучения на свободных электронах [1, 2].

ДТР используется на многих аналогичных установках в мире, однако применение одного и того же метода диагностики на различных токамаках имеет

свои особенности, ввиду различий самих токамаков. Токмак КТМ уникален по своей геометрии и набору характеристик, что не позволяет напрямую, без адаптации использовать методы диагностики плазмы других токамаков.

Данная работа посвящена разработке концептуальной схемы ДТР для токамака КТМ. В статье рассмотрены требования к системе, обзор реализованных решений на других установках, а также предложен вариант размещения системы с учётом конструктивных ограничений КТМ.

### ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К ДТР НА ТОКАМАКЕ КТМ

На многих установках управляемого термоядерного синтеза используется несколько видов диагностик плазмы для измерения плотности, такие как лазерные, дисперсионные интерферометры и ДТР. Основное преимущество ДТР перед интерферометрами – возможность измерения не только плотности, а также и температуры электронов в плазме.

Внедрение ДТР на токамаке КТМ откроет возможности к широкому типу исследований физики плазмы, что в дальнейшем позволит прямой контроль профилей температуры и плотности плазмы в реальном времени и использовать полученные данные в контуре управления плазменным разрядом, которые позволят перейти к экспериментам по достижению проектных значений плазменного разряда.

ДТР состоит из трех основных узлов – лазера, объектива и полихроматора. На токамаке КТМ планируется установка такой системы диагностики на основе Nd:YAG лазера и системы регистрации на основе фильтровых полихроматоров. Планируется реализовать несколько пространственных каналов измерения от центральной области до периферии плазменного шнура. Это позволит получить информацию о распределении температуры и плотности плазмы по радиусу плазменного шнура.

Для зондирования предполагается использовать импульсный лазер на кристаллах Nd:YAG модели LQ929A, излучающий на длине волны 1064 нм при длительности импульса 10 нс с частотой следования импульсов 10 Гц и энергией в импульсе 1,4 Дж. Длительность разряда на токамаке КТМ в режиме омического нагрева ожидается около 1 с, а в режиме с дополнительным нагревом – до 5 с. Таким образом, частота лазера в 10 Гц позволит проводить от 10 до 50 измерений в течение одного разряда. Выбор данного лазера обусловлен его доступностью по сравнению с аналогами.

Систему регистрации планируется реализовать на основе полихроматоров. Каждый из них имеет несколько спектральных каналов на основе полосовых фильтров. Каждый спектральный канал оснащается быстродействующим высокочувствительным лавинным фотодиодом. Полихроматор обладает сверхнизким уровнем шума, высокоскоростной системой детектирования спектральных каналов, оснащен оцифровщиком и одноплатным компьютером для управления системой и обработки данных.

Для системы сбора рассеянного лазерного излучения будет использован специальный объектив с рабочим спектральным диапазоном 700–1064 нм. Угловое поле (поле зрения) объектива  $2\omega = 15^\circ$ . Объектив целесообразно представить в виде насыпной конструкции. Крепление линз и линзовой склейки осуществляется резьбовыми кольцами. Преимуществами этого метода установки линз в корпусе являются обеспечение надёжного разъёмного крепления, простота сборки и демонтажа.

В качестве приемника излучения будет использоваться кварцевое волокно с числовой апертурой  $NA = 0,22$  и диаметром  $d = 440$  мкм. Диаметр оптоволоконного жгута (ОВЖ)  $D = 3$  мм со стороны спектральных приборов. Длина ОВЖ выбирается после окончательного размещения системы сбора и полихроматоров в экспериментальном зале токамака КТМ.

Диагностика томсоновского рассеяния на токамаке КТМ должна обеспечить измерение параметров от границы плазмы со стороны слабого магнитного поля до геометрического центра камеры токамака. Характерные значения температуры электронов на границе плазмы порядка 100 эВ [3]. С запасом и без усложнений в создании системы, можно взять нижнюю границу по температуре в 50 эВ. В центре

плазменного шнура температура может достигать до 3100 эВ, как видно из таблицы 1.

Таблица 1. Параметры температуры и концентрации электронов по расчету сценариев работы токамака КТМ

| Параметр   | Омический режим | Режим с доп. нагревом (5 МВт) |
|--|-----------------|-------------------------------|
| Средняя температура электронов, $\langle T_e \rangle$ , эВ                       | 283,2           | 1200                          |
| Температура электронов на оси, $T_{e0}$ , эВ                                     | 732,6           | 3100                          |
| Средняя концентрация электронов $\langle n_e \rangle$ , $10^{19} \text{ м}^{-3}$ | 5               | 5                             |
| Концентрация электронов на оси $n_{e0}$ , $10^{19} \text{ м}^{-3}$               | 5,3             | 5,3                           |

Предел Гринвальда по концентрации для рассчитанных сценариев разряда ( $I_p = 750$  кА,  $a = 45$  см)  $n_{G0} = 12 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ . Для пикированного профиля концентрации с параметром пикированности 2, в центре камеры концентрация может достигать до значения, в два раза превышающего предел Гринвальда. На границе плазмы значение концентрации порядка  $1 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ .

Технические требования к системам ДТР можно сформулировать следующим образом:

- диапазон измерений по температуре от 50 эВ до 3100 эВ;
- диапазон измерений по плотности плазмы от  $1 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$  до  $2,5 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ ;
- $\geq 10$  пространственных точек по большому радиусу;
- погрешность измерения по температуре 10% и по концентрации 5%.

#### ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ

Диагностика электронного компонента плазмы методом томсоновского рассеяния лазерного излучения позволяет достоверно измерить электронную температуру и плотность плазмы. На основании этих измерений можно определить: энергозапас электронного компонента плазмы, отношение давления электронов к давлению магнитного поля, среднее значение концентрации электронов, а также приведенную ширину градиентов температуры и концентрации. Знание этих параметров незаменимы для исследования протекающих в плазме физических процессов, влияющих на эффективность нагрева плазмы и ее магнитогидродинамическую устойчивость.

Для обработки сигналов рассеяния из плазмы на токамаках используются несколько систем, такие как телевизионные и фильтровые. Телевизионные системы имеют хорошее пространственное разрешение, но высокочувствительны к юстировке. Фильтровые системы просты в реализации регистрации спектров томсоновского рассеяния и зондирования. С помощью фильтрового полихроматора можно проводить измерение рассеяния от центра плазменного шнура до периферийной области на длине волны

$\lambda = 1064$  нм на нескольких точках одновременно. Телевизионная система предназначена для измерения параметров электронов на токамаке Т-10 [4]. Основным преимуществом системы регистрации такого типа является высокое пространственное разрешение. Однако такие недостатки, как необходимость создания многопроходной системы зондирования и как следствие, высокая чувствительность к юстировке, не позволили на Т-10 измерить профиль концентрации посредством телевизионной системы. Позднее, на Т-10 был, успешно протестирован фильтровый полихроматор [5], для измерения локальных значений температуры и концентрации электронов. На токамаке Т-15МД в качестве основной системы регистрации томсоновского рассеяния будет использоваться именно фильтровая система [5, 6] на основе полихроматоров со встроенным аналогово-цифровым преобразователем [7].

Система томсоновского рассеяния на основе фильтровых полихроматоров обладает рядом преимуществ, основное из которых заключается в простоте реализации системы регистрации спектров томсоновского рассеяния и системы зондирования. Благодаря использованию широких спектральных каналов и лавинных фотодиодов для регистрации сигналов рассеяния, измерения возможно проводить на одном проходе лазерного пучка через плазму, что существенно упрощает юстировку такой системы, а также позволяет использовать маломощные и относительно недорогие лазерные источники. Такая система стабильно работала на токамаке Глобус-М [8].

Основной особенностью фильтровой системы регистрации является возможность регистрировать временную форму сигналов лазерного рассеяния, что позволяет получить хорошую точность измерения температуры и плотности [9], а также работать в условиях интенсивной фоновой засветки паразитно-рассеянного лазерного излучения на элементах конструкции токамака в том случае, когда полезный сигнал и паразитный разнесены по времени [10].

Современная ДТР на основе фильтровых спектрометров была введена в эксплуатацию на сферическом токамаке Глобус-М2, которая позволяет в режиме реального времени управлять концентрацией плазмы [11]. Отдельно стоит отметить, что ДТР на токамаке Глобус-М2 является основным инструментом для широкого спектра исследований [12], который был разработан в далеком 2006 году, далее в 2012 году выполнена модернизация диагностики ДТР. Модернизация заключалась в увеличении числа пространственных каналов регистрации до 10, что позволило измерить профили температуры и концентрации электронов от внутренней до внешней границы плазмы. До модернизации система обеспечивала измерения в пяти пространственных точках, расположенных со стороны сильного магнитного поля. В ходе модернизации диагностики изменена геометрия наблюдения, реализована новая система сбора

света. Также были разработаны и изготовлены светосильный объектив для работы в больших углах, компактные спектральные приборы на основе интерференционных фильтров и лавинных фотодиодов. Для передачи рассеянного лазерного излучения на входные объективы полихроматоров подготовлены оптоволоконные линии. Реализованная система регистрации совместно с лазерным источником, позволяющие формировать произвольные временные сценарии генерации импульсов, обеспечат исследования кинетических параметров плазмы в широкой программе исследований. На рисунке 1 показана схема размещения диагностики ТР, используемая на токамаке Глобус-М2.

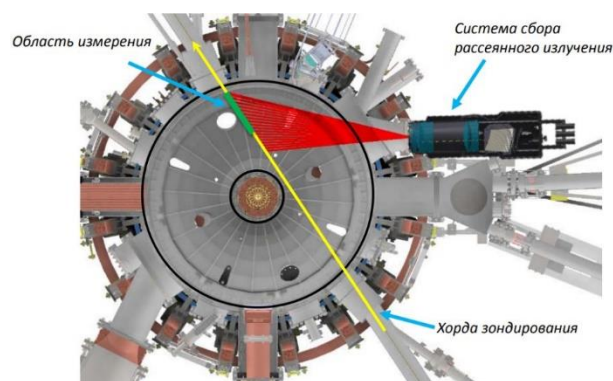


Рисунок 1. Схема размещения ДТР на токамаке Глобус-М2

При модернизации диагностики общая геометрия эксперимента сохранена – лазерный пучок проходит в экваториальной плоскости вблизи столба, как показано на рисунке 1, система сбора рассеянного излучения также расположена в экваториальной плоскости. Вместе с тем ракурс наблюдения был изменён для одновременной регистрации сигналов рассеяния из 10 пространственных точек, расположенных от внутренней до внешней границы плазмы. При этом угол наблюдения меняется в пределах  $82-24^\circ$  от центра к периферии, для внешней границы регистрируемый спектр заметно расширится, что актуально для измерений низких температур. В качестве зондирующего лазера используется Nd:YAG лазер с длиной волны 1064 нм, мощностью излучения 0,5–3 Дж. Отличительной особенностью лазера является возможность генерации 20 импульсов за один разряд токамака с энергией 2–5 Дж и частотой следования до 2 кГц, при этом задержка между каждой парой импульсов меняется независимо, в соответствии с программой исследования [4].

Для сбора излучения разработан малоабберационный светосильный объектив для работы в угле более  $40^\circ$  и с апертурой 130 мм. Рассеянное в плазме излучение собирается в угле  $1/7$  и проецируется на торцы оптических волокон кварц-полимер, расположенных в фокальной плоскости объектива. Оптоволоконная линия состоит из 10 жгутов, каждый из

которых осуществляет передачу собранного излучения на входной зрачок отдельного полихроматора. Для измерения спектра рассеянного сигнала были разработаны новые светосильные полихроматоры на основе высококонтрастных интерференционных фильтров и лавинных фотодиодов.

На модернизированном токамаке Т-15МД планируется установка двух систем ДТР с вертикальным и тангенциальным зондированием. Некруглая форма сечения камеры токамака вызывает интерес к измерению профилей электронной плотности и температуры не только вдоль вертикальной хорды наблюдения, но и вдоль большого радиуса плазмы. Вертикальная система планируется с телевизионной регистрацией аналогично системе, установленной на токамаке Т-10 [13]. Проект тангенциальной системы подразумевает использование первой гармоники Nd:YAG-лазера (рабочая длина волны 1064 нм) и системы регистрации на основе фильтровых полихроматоров [14]. Использование фильтровых полихроматоров с широкими спектральными каналами является одним из самых распространённых методов регистрации спектров рассеянного света в ближней инфракрасной области, так как позволяет достоверно осуществлять регистрацию даже при относительно низкой интенсивности зондирующего излучения. Данный метод диагностики плазмы используется во многих установках термоядерного синтеза, где он показал свою работоспособность. Планируется применение этого метода на токамаке ИТЭР. В таблице 2 показаны характеристики ДТР используемого на токамаке Т-15МД.

Таблица 2. Основные параметры ДТР на токамаке Т-15МД

|                                     |                 |
|-------------------------------------|-----------------|
| Углы рассеяния                      | от 12° до 53°   |
| Длина волны лазера                  | 1064 нм         |
| Энергия лазерного импульса          | 3 Дж            |
| Частота                             | 100 Гц (330 Гц) |
| Количество пространственных каналов | 10 (20)         |

На рисунке 2 показана схема размещения ДТР на токамаке Т-15МД. Учитывая конструкцию токамака КТМ, аналогичная схема установки ДТР является наиболее оптимальным решением.

Диагностику методом томсоновского рассеяния планируют установить на самую внушительную установку термоядерного синтеза в ИТЭР. Требования предъявляемые к диагностике томсоновского рассеяния на установке очень высоки, так система должна производить измерения  $T_e = 0,5-40$  кэВ,  $n_e = 3 \cdot 10^{19} - 3 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$  с погрешностью до 10%. Ее планируют установить в трех местах для наблюдения за электронной температурой и плотностью в режиме реального времени в центральной и диверторной области, а также на периферии. Это необходимо для управления положением плазменного шнура во время срывов. Такой подход позволит уменьшить последствия

срыва, а также для управления потоками в основную плазму примесей, возникающих при взаимодействии, плазма – поверхность в диверторе. [15]. Причиной использования именно томсоновского рассеяния является также тот факт, что работа будет происходить в крайне неблагоприятных условиях, таких как высокая радиационное излучение, эрозия стенок, ограниченный доступ к камере.

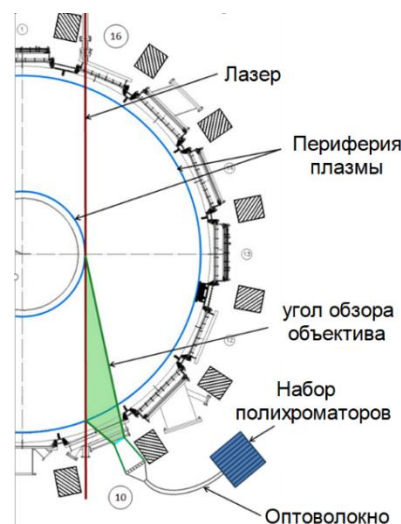
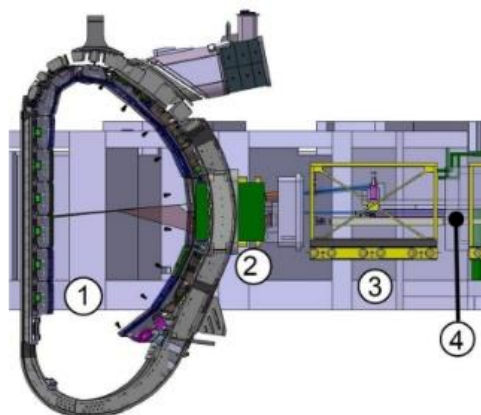


Рисунок 2. Схема размещения ДТР на токамаке Т-15МД

На рисунке 3 показана схема установки ДТР в полоидальном сечении для определения параметров плазмы в центральной области на токамаке ИТЭР.



1) вакуумная камера; 2) диагностический порт с ДТР; 3) межпространство; 4) биочит

Рисунок 3. Схема установки ДТР токамака ИТЭР

Именно фильтровая система будет использоваться на установках реакторного класса, таких как ИТЭР (все три системы томсоновского рассеяния – центральная [16], краевая [17] и диверторная [18]), где предполагается зондирование с помощью нескольких лазеров, работающих на разных длинах волн, одновременно [19, 20]. Это необходимо для надежного измерения температуры электронов плазмы в условиях неизвестной спектральной характеристики оптической системы, характерной для токамака.

В ДТР локальность измерений достигается двумя различными способами. В классическом исполнении рассеянное излучение наблюдается в наборе пространственных точек на пересечении лазерного пучка и набора хорд наблюдения. В другом варианте используется единственная ось наблюдения, совпадающая с осью зондирования. При этом пространственное разрешение основано на времяпролетном принципе регистрации в соответствии с временной задержкой сигналов рассеяния, относительно короткого лазерного импульса.

#### АНАЛИЗ ВОЗМОЖНЫХ ВАРИАНТОВ РЕАЛИЗАЦИИ ДТР НА КТМ

Предлагаемая схема размещения ДТР на токамаке КТМ обусловлена особенностями конструкции токамака. Реализация схемы вертикального зондирования в полоидальном сечении, характерной для токамаков с большим аспектным отношением сопряжена с рядом сложно предсказуемых рисков, ставящих под угрозу практическую реализацию проекта. Для вертикальной схемы зондирования на КТМ ввод лазерного излучения возможен только через верхний патрубок, как показано на рисунке 4, однако отсутствие нижнего патрубка, необходимого для вывода лазерного излучения из вакуумной камеры КТМ, приводит к необходимости размещения поглотителя для лазерного излучения внутри вакуумной камеры в непосредственной близости от области измерения, в районе дивертора, т.е. точки фокусировки лазерного излучения. Это создает критически важные условия: в фокусе пучка достигается высокая плотность мощности и следовательно, для предотвращения повреждения конструктивных элементов требуется разработка специального поглощающего элемента.

Второй проблемой будет являться регистрация интенсивного паразитно-рассеянного лазерного излучения одновременно с полезным сигналом томсоновского рассеяния из плазмы, что сделает невозможным определение температуры и плотности электронов. Так же необходимо отметить, дополнительные сложности вносит размещение элементов системы ввода (в том числе зеркал и линз) на опорной конструкции токамака. Колебания, возникающие вследствие работы электромагнитной системы установки, могут вызывать дестабилизацию юстировки оптической схемы, что приведёт к отклонению лазерного пучка от заданной траектории. Аналогичные проблемы были зафиксированы при попытке реализации вертикального зондирования на установке Т-10, где из-за флуктуаций положения зеркал и высокого уровня паразитного сигнала измерения профиля плотности электронов оказались невозможными [4]. Существенным требованием к юстировке является устойчивость по отношению к вибрациям и рассеянному магнитному полю в зоне расположения оптических компонентов. Ввиду этого спектральные приборы и все оптические компоненты планируется установить на неподвижной эстакаде вне зоны раз-

рядной камеры, оправки линз и крепежные узлы будут изготовлены из немагнитного материала – нержавеющей стали 12Х18Н10Т.

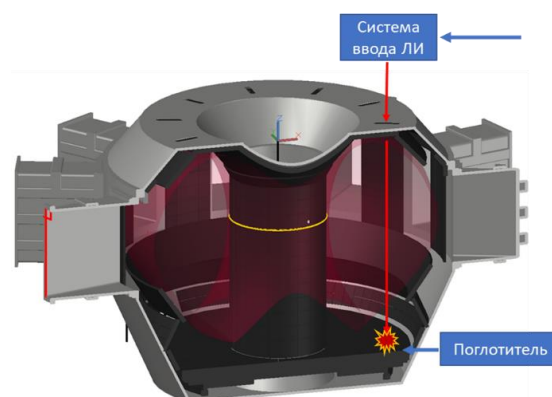
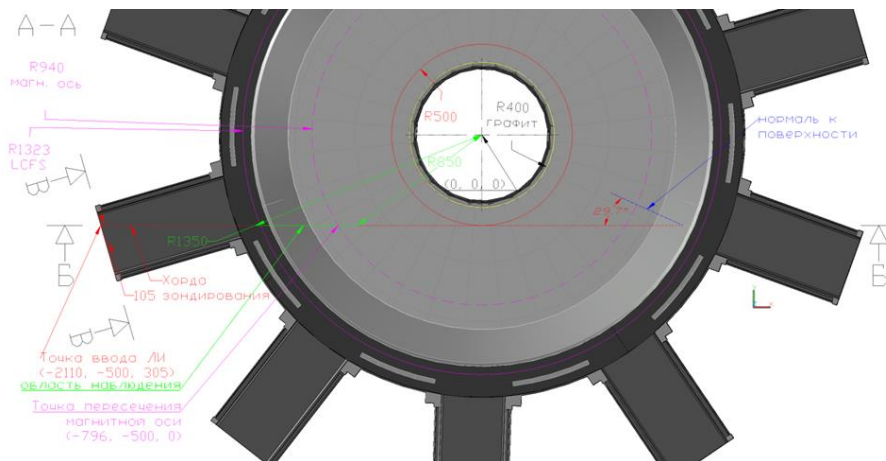


Рисунок 4. Вертикальная система томсоновского рассеяния

Таким образом, применение вертикальной схемы зондирования для реализации ДТР на токамаке КТМ сопряжено с рядом технических и физических ограничений, существенно затрудняющих её практическую реализацию. Предлагаемая компоновка диагностической системы обусловлена конструктивными особенностями токамака КТМ, в частности – ограниченным количеством технологических патрубков и их расположением. Учитывая вышеперечисленные обстоятельства, реализация вертикального зондирования на токамаке КТМ представляется технически сложной, рискованной и в текущей конфигурации малореализуемой. В связи с этим предпочтение отдано альтернативным, более стабильным и безопасным схемам размещения системы томсоновского рассеяния, обеспечивающим надёжную работу диагностики и получение достоверных экспериментальных данных.

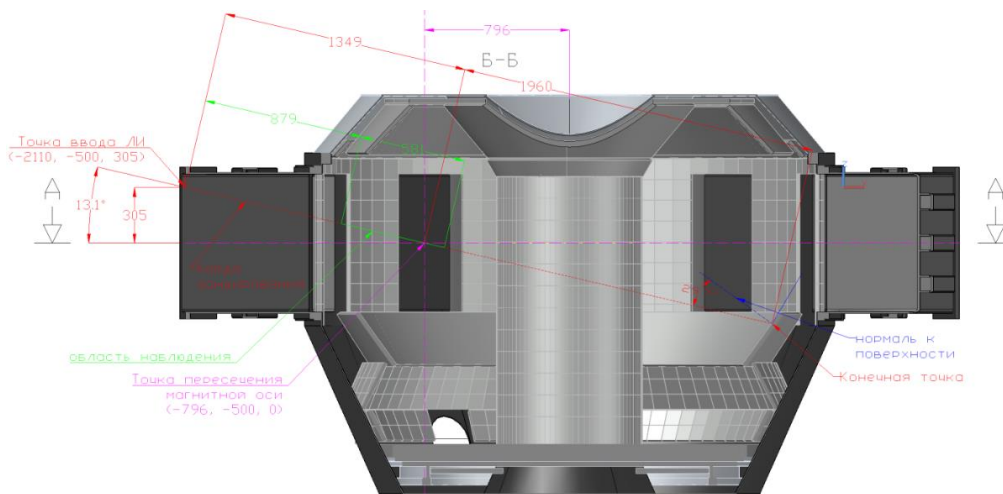
Наиболее привлекательной является схема диагностики с зондированием в экваториальной плоскости, характерной для токамаков с малым аспектным отношением Глобус-М [8], Глобус-М2 [7], MAST [21], NSTX [22] (к которым относится и КТМ) и других современных и перспективных установок, таких как Т-15МД [6], ИТЭР [19] и ТРТ [20].

Для оптимального размещения ДТР проработана и выбрана схема зондирования с вводом лазерного излучения (ЛИ) из экваториального патрубка как показано на рисунке 5. Вводить ЛИ в вакуумную камеру предлагается тангенциально с прицельным параметром 500 мм. В такой геометрии область наблюдения можно расположить на стороне слабого магнитного поля. Для измерения локальных значений  $T_e$  и  $n_e$  в центре плазменного шнура хорда зондирования проведена через магнитную ось. При этом точка ввода ЛИ поднята к верхней границе патрубка, т.е. хорда зондирования направлена вниз под углом к экваториальной плоскости, как показано на рисунке 6. Соответствующий угол между хордой зондирования и экваториальной плоскостью составляет  $13,1^\circ$ .



красная штриховая линия – хорда зондирования ДТР

Рисунок 5. Экваториальное сечение, вид сверху



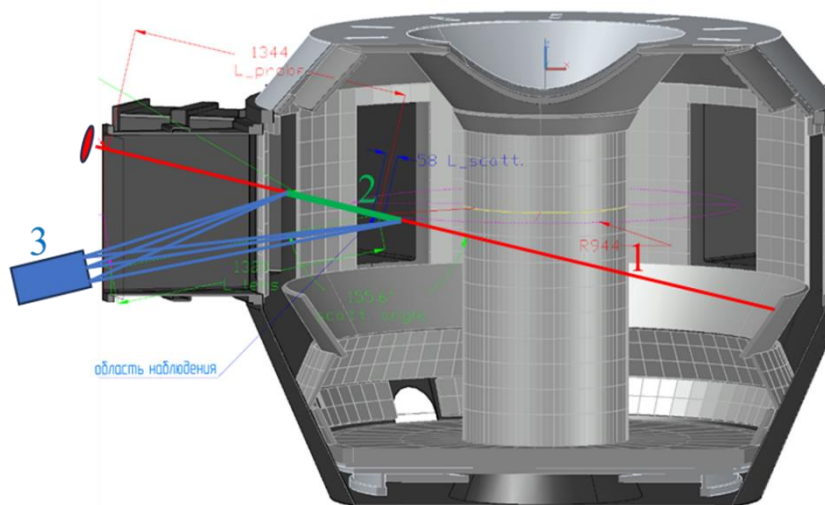
красная штриховая линия – хорда зондирования ДТР,  
горизонтальная штрихпунктирная линия – экваториальная плоскость,  
вертикальная штрихпунктирная линия проходит через магнитную ось в плоскости сечения)

Рисунок 6. Вертикальное сечение вдоль хорды зондирования

Для вывода лазерного излучения требуется ограничить ракурс зондирования и выделить ДТР второй экваториальный патрубок. Поэтому ЛИ предлагается не выводить из вакуумной камеры, а направить на графитовые пластины на противоположной стороне наружной стенки камеры. Рассеяние на графите может служить источником паразитного сигнала, который предлагается выделять из общего спектра по временной задержке.

Сбор рассеянного излучения предлагается организовать из того же патрубка, из которого производится ввод ЛИ, похожая схема относительного расположения систем зондирования и собирающей оптики применяется на токамаках MAST (для периферийной системы) [21], токамаке T-15МД [6] и предполагается для диагностик краевой и центральной области плазмы на ИТЭР [16, 17]. Максимальное пространственное разрешение достигается при раз-

несении на максимальное расстояние точек ввода ЛИ и точки сбора рассеянного излучения. Использование общего патрубка для ввода ЛИ и сбора рассеянного излучения повышает надёжность юстировки системы за счёт создания общей оптической базы. Для ввода ЛИ предлагается сварить патрубок ДУ-100. Апертура системы сбора имеет диаметр 150 мм. Таким образом, большая часть патрубка остаётся свободна и может быть использована для других систем токамака. Например, возможна установка предложенной схемы ДТР в экваториальном патрубке 2-го или 10-го сектора ВК КТМ. Окончательный выбор патрубка для размещения ДТР требует учёта окружающего пространства в экспериментальном зале. Отдельно стоит отметить, что предлагаемую схему ДТР возможно реализовать, используя любой из экваториальных патрубков на КТМ.



1 – зондирующая хорда; 2 – зона наблюдения; 3 – расположение системы сбора света рассеянного излучения

Рисунок 7. Схема сбора излучения ДТР токамака КТМ

Предложенная схема предполагает наблюдение излучения томсоновского рассеяния, рассеянного назад под углами 144-157°. В отличие от классической схемы с наблюдением под углом, близким к 90°. На рисунке 7 предложена схема измерения, которая требует меньший угол обзора и может быть реализована без использования специального лазерного поглотителя внутри вакуумной камеры КТМ. Наблюдение «сквозь хорду зондирования» также обеспечивает большую длину рассеяния, позволяя снизить энергию зондирующего импульса. Хорды наблюдения системы сбора направлены вверх, в противоположную сторону от диверторной области, являющейся источником интенсивной фоновой засветкой.

Выбранная геометрия измерения также задаёт оптимальное направление поляризации ЛИ. Интенсивность томсоновского рассеяния наибольшая в плоскости, перпендикулярной направлению поляризации ЛИ. Линейно поляризованное ЛИ предлагается заводить с поляризацией, перпендикулярной плоскости, в которой лежат точка ввода и точка сбора рассеянного излучения. Это будет учтено при детализации системы ввода ЛИ.

Выбор тангенциальной схемы зондирования в экваториальной плоскости для размещения ДТР на токамаке КТМ представляется наиболее обоснованным как с инженерной, так и с физической точки зрения. Данный подход соответствует лучшим практикам, реализованным на установках с малым аспектным отношением, а также на современных и перспективных установках нового поколения, к числу которых относится и КТМ. Таким образом, реализуемая на КТМ схема тангенциального зондирования в экваториальной плоскости сочетает в себе высокую точность измерений, конструктивную и технологическую реализуемость, стабильность оптической системы и устойчивость к паразитным воздействиям.

Этот подход является не только оптимальным, но и единственным целесообразным решением.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная концепция диагностики томсоновского рассеяния на токамаке КТМ учитывает конструктивные особенности установки и мировой опыт реализации аналогичных систем. Выбор тангенциальной схемы зондирования в экваториальной плоскости позволяет обеспечить надёжную и точную регистрацию профилей температуры и плотности электронов. Это обеспечит качественный уровень диагностики, необходимый для материаловедческих исследований и физики плазмы на КТМ.

Применение ДТР на токамаке КТМ имеет критическое значение для успешного проведения материаловедческих исследований и моделирования плазменных процессов, что в свою очередь, позволит добиться более глубокого понимания механизмов взаимодействия плазмы с конструкционными материалами и создать условия для дальнейшего развития технологий управляемого термоядерного синтеза.

Диагностика будет одним из основных инструментов изучения поведения электронной компоненты плазмы на токамаке КТМ в любых режимах независимо от величины магнитного поля и формы профиля электронной плотности. Разработка и внедрение ДТР на токамаке КТМ позволит существенно расширить возможности исследования физики плазмы и оптимизации параметров плазменного разряда. Применение импульсного лазера на кристаллах Nd:YAG с частотой импульсов 10 Гц обеспечит достаточную временную разрешающую способность измерений. Спектрометрическая система на основе полихроматоров с лавинными фотодиодами обеспечит высокую точность определения температуры и плотности электронов во всех режимах работы установки.

Следующими этапами работы станут: оценка ожидаемых сигналов томсоновского рассеяния, анализ уровня фонового излучения плазмы. Результаты этих исследований позволят сформулировать окончательные технические требования к основным компонентам системы – полихроматорам, фотодетекторам, системе регистрации сигналов и вспомогательному оборудованию.

В рамках подготовки к экспериментальной реализации планируется проведение испытаний импульсного лазера и спектрометрического комплекса цифровой регистрации сигналов томсоновского рассеяния в стендовых условиях. Это обеспечит возможность предварительной отладки системы перед её интеграцией и настройкой на токамаке КТМ.

На первом этапе внедрения планируется установка системы с одним пространственным каналом. В дальнейшем предусмотрено поэтапное расширение диагностического комплекса до трёх пространственных каналов, что существенно повысит пространственное разрешение и информативность диагностики.

#### Благодарность

*Работа выполнена при финансовой поддержке Агентства Республики Казахстан по атомной энергии (научно-техническая программа BR23891779 «Научно-техническое обеспечение экспериментальных исследований на казахстанском материаловедческом токамаке КТМ»).*

#### ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. B. Chektybayev, S. Zhunisbek, I. Tazhibayeva, D. Olkhovik, E. Batyrbekov, D. Zarva, A. Korovikov, A. Lee, V. Pavlov, E. Kashikbayev, A. Zhaksybayeva, A. Duisen. Overview of the first experiments at KTM tokamak to obtain plasma discharges // Fusion Engineering and Design. – Vol. 194. – Art. 113847.
2. B. Chektybayev, I. Tazhibayeva, E. Batyrbekov, Ye. Kashikbayev, D. Olkhovik, D. Zarva, A. Duisen, A. Zhaksybayeva. Improvement of plasma discharge performance at KTM tokamak // Fusion Engineering and Design. – Vol. 208. – Ar. 114684.
3. В. В. Солоха и др. Классификация краевых неустойчивостей на токамаке Глобус-М2 // Физика плазмы. – 2023. – Т. 49. – С. 322–331. [V. V. Solokha i dr. Klassifikatsiya kraevykh neustoychivostey na tokamake Globus-M2 // Fizika plazmy. – 2023. – Vol. 49. – P. 322–331. (In Russ.)]
4. G.M. Asadulin, I.S. Bel'bas, A.V. Gorshkov Upgraded TV Thomson scattering system on the T-10 tokamak // Fusion Engineering and Design. – 2022.
5. Г.М. Асадулин, А.Н. Баженов, И.С. Бельбас, А.В. Горшков, А.Н. Коваль, Г.С. Курский и др. Испытание полихроматора для тангенциальной системы томсоновского рассеяния токамака Т-15МД в составе диагностики токамака Т-10 // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. – 2019. – Т. 42. [G.M. Asadulin, A.N. Bazhenov, I.S. Bel'bas, A.V. Gorshkov, A.N. Koval', G.S. Kurskiy i dr. Ispytanie polikhromatora dlya tangentsial'noy sistemy tomsonovskogo rasseyaniya tokamaka T-15MD v sostave
6. G. M. Asadulin, I. S. Bel'bas and A. V. Gorshkov Tangential System of Thomson Scattering for Tokamak T-15 // Physics of Atomic Nuclei. – 2017. – Vol. 80. – P. 137–1331.
7. G.S. Kurskiy, A.I.P. Chernakov, V.A. Solovey [et al.] Digital filter polychromator for Thomson scattering applications // Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A. – 2020. – Vol. 963.
8. Г.С. Курский, С.Ю. Толстяков, А.А. и др. Модернизация диагностики томсоновского рассеяния на токамаке Глобус-М // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. – 2012. [G.S. Kurskiy, S.Yu. Tolstyakov, A.A. i dr. Modernizatsiya diagnostiki tomsonovskogo rasseyaniya na tokamake Globus-M // VANT. Ser. Termoyadernyy sintez. – 2012. (In Russ.)]
9. N.S. Zhiltsov, G.S. Kurskiy, E.E. Mukhin [et al.] A note on measurement accuracy and thermal stability of filter polychromators for Thomson scattering diagnostics // Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A. – 2020. – Vol. 976.
10. Н. В. Ермаков, Н. С. Жильцов, Г. С. Курский, Е. Е. Мухин и др. Диагностика плазмы в диверторной области токамака Глобус-М2 методом томсоновского рассеяния // Физика Плазмы. – 2023. – Т. 49. [N. V. Ermakov, N. S. Zhil'tsov, G. S. Kurskiy, E. E. Mukhin i dr. Diagnostika plazmy v divertornoy oblasti tokamaka Globus-M2 metodom tomsonovskogo rasseyaniya // Fizika Plazmy. – 2023. – Vol. 49. (In Russ.)]
11. Н.С. Жильцов, Г.С. Курский и др. Диагностика томсоновского рассеяния для управления концентрацией плазмы токамака Глобус-М2 // Письма в ЖТФ. – 2023. – Т. 49. [N.S. Zhil'tsov, G.S. Kurskiy i dr. Diagnostika tomsonovskogo rasseyaniya dlya upravleniya kontsentratsiyey plazmy tokamaka Globus-M2 // Pis'ma v ZhTF. – 2023. – Vol. 49. (In Russ.)]
12. Zhiltsov, N. S., Kurskiy, G. S., Tolstyakov, S. Y., Solovey, V. A., Koval, A. N., Tkachenko, E. E., ... & Yashin, A. Y. Thomson scattering diagnostics at the Globus-M2 tokamak // Fusion Engineering and Design. – 2025. – Vol. 211. – Art. 114753.
13. Asadulin G., Bel'bas I., Gorshkov A. 100-Hz Thomson scattering diagnostics on T-10 tokamak. – In: Proc. of 43rd European Physical Society Conf. on Plasma Physics, 2016.
14. Г.М. Асадулин, А.Н. Баженов, И.С. Бельбас и др. Тангенциальная система диагностики томсоновского рассеяния для токамака Т-15 // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. – 2016. – Т. 39, вып. 2. [G.M. Asadulin, A.N. Bazhenov, I.S. Bel'bas i dr. Tangentsial'naya sistema diagnostiki tomsonovskogo rasseyaniya dlya tokamaka T-15 // VANT. Ser. Termoyadernyy sintez. – 2016. – Vol. 39, Iss. 2. (In Russ.)]
15. Мухин Е. Е. и др. Диагностический комплекс томсоновского рассеяния для мониторинга электронного компонента плазмы в диверторной зоне токамака ИТЭР // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез. – 2010. – № 2. – С. 59–68. [Mukhin E. E. i dr. Diagnosticheskiy kompleks tomsonovskogo rasseyaniya dlya monitoringa elektronnoy komponenta plazmy v divertornoy zone tokamaka ITER // Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Seriya: Termoyadernyy sintez. – 2010. – No. 2. – P. 59–68. (in Russ.)]

16. Bassan M., Kurskiev G., et. al. Thomson scattering diagnostic systems in ITER // G. J. Instrum. – Vol. 11.
17. E Yatsuka, M Bassan, T Hatae, M Ishikawa, T Shimada, G Vayakis, M Walsh, R Scannell, R Huxford, P Bilkova et. al. Progresses in development of the ITER edge Thomson scattering system // JINST. – 2013. – Vol. 8.
18. E. Mukhin, R.A. Pitts, P. Andrew, P.V. Chernakov, L. Giudicotti et. al. Physical aspects of divertor Thomson scattering implementation on ITER // Nucl. Fusion. – 2014. – Vol. 54.
19. G.S. Kurskiev, P.A. Sdvizhenskii, M. Bassan et. al. A study of core Thomson scattering measurements in ITER using a multi-laser approach // Nucl. Fusion. – 2015. – Vol. 55.
20. Г.С. Курскиев, Н.С. Жильцов, А.Н. Коваль, А.Ф. Корнев, А.М. Макаров, Е.Е. Мухин, Ю.В. Петров и др. Измерение температуры электронов плазмы токамака Глобус-М2 методом мультилазерного томсоновского рассеяния // Письма в ЖТФ. –2021. – Т. 47. [G.S. Kurskiev, N.S. Zhil'tsov, A.N. Koval', A.F. Kornev, A.M. Makarov, E.E. Mukhin, Yu.V. Petrov i dr. Izmerenie temperatury elektronov plazmy tokamaka Globus-M2 metodom mul'tilazernogo tomsonovskogo rasseyaniya // Pis'ma v ZhTF. –2021. – Vol. 47. (In Russ.)]
21. Scannell. R. [et al.] A 130 point Nd:YAG Thomson scattering diagnostic on MAST // Rev.Sci. Instrum. – 2010. – Vol. 81.
22. B. P. LeBlanc, R. E. Bell, D. W. Johnson, D. E. Hoffman, D. C. Long, and R. W. Palladino. Operation of the NSTX Thomson scattering system // Rev.Sci. Instrum. – 2003. – Vol. 74.

### КТМ ТОКАМАГІНІҢ ТОМСОН ШАШЫРАУ ДИАГНОСТИКАСЫНЫҢ КОНЦЕПТУАЛДЫҚ ДИЗАЙНЫ

**Е. А. Кашикбаев<sup>1,2\*</sup>, Б. Ж. Чектыбаев<sup>1,2</sup>, А. Ж. Дүйсен<sup>1</sup>, Г. С. Курскиев<sup>3</sup>, Н. С. Жильцов<sup>3</sup>,  
Е. Е. Ткаченко<sup>3</sup>, Д. А. Ольховик<sup>1</sup>, А. Т. Қусайнов<sup>1</sup>, К. Женис<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан

<sup>2</sup> «Шәкәрім университеті» КеАҚ, Семей, Қазақстан

<sup>3</sup> А.Ф. Иоффе атындағы физика-техникалық институты, Санкт-Петербург, Ресей

\* Байланыс үшін E-mail: kashikbaev@nnc.kz

Мақалада ҚТМ токамақтағы плазманың электрондық тығыздығын өлшеуге арналған ТШД кешені қарастырылады. ҚТМ плазмасының электрондық тығыздығын өлшеу бойынша алғашқы тәжірибелік нәтижелері және де ТШД құрамы ұсынылған, оларды орындау және орналастырудың техникалық ерекшеліктері талқыланады. ТШД құрылғылардың жұмыс істеу принципіне және диагностиканың токамақта орналасқан жеріне ерекше көңіл бөлінеді. КТМ токамағының конструктивтік ерекшеліктері мен қолданыстағы техникалық шектеулерді талдау нәтижесінде экваторлық жазықтықта тангенциалды зондтау сұлбасы ең сенімді және іс жүзінде іске асырылуы мүмкін нұсқа ретінде негізделіп таңдалды. Жүйеге қойылатын негізгі техникалық талаптар тұжырымдалды: электрондардың өлшенетін температура диапазоны 50–3100 эВ, тығыздықтар диапазоны  $1 \cdot 10^{19}$ – $2,5 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ , сондай-ақ кемінде 10 кеңістіктік нүктеде тіркеу мүмкіндігі. Диагностикалық жабдықты орналастырудың әртүрлі сұлбалары, соның ішінде тік зондтау нұсқалары салыстырылып, бірқатар инженерлік және физикалық себептерге байланысты олардың КТМ-де жүзеге асырылмайтыны көрсетілді. Ұсынылған жүйелік компоновка юстировка дәлдігін, паразиттік сәулеленуден сенімді қорғанысты, сондай-ақ жоғары кеңістіктік айырымдылықты қамтамасыз етеді. Бұл жұмыс – КТМ токамағы үшін ғылыми-негізделген жобасы болып табылады. Жүйені іске асыру басқарылатын термоядролық синтез жағдайында плазма мен материалдарды зерттеу мақсатында КТМ токамағының диагностикалық мүмкіндіктерін едәуір кеңейтуге мүмкіндік береді.

**Түйін сөздер:** плазма, токамак, КТМ, ТШД, лазерлік сәулелену, плазма тығыздығы.

CONCEPTUAL DESIGN OF THE THOMSON SCATTERING DIAGNOSTICS  
FOR THE KTM TOKAMAK

Ye. A. Kashikbaev<sup>1,2\*</sup>, B. Zh. Chektybayev<sup>1,2</sup>, A. Zh. Duisen<sup>1</sup>, G. S. Kurskiev<sup>3</sup>, N. S. Zhiltsov<sup>3</sup>,  
E. E. Tkachenko<sup>3</sup>, D. A. Olkhovik<sup>1</sup>, A. T. Kusainov<sup>1</sup>, K. Zhenis<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Branch "Institute of Atomic Energy" RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

<sup>2</sup> NP JSC "Shakarim University", Semey, Kazakhstan

<sup>3</sup> Ioffe Institute, Saint-Petersburg, Russia

\* E-mail for contacts: kashikbaev@nnc.kz

The article is devoted to the development of a conceptual design for Thomson scattering diagnostics (TSD) for the KTM tokamak, intended for conducting experimental studies, measuring the dynamics of temperature profiles and the electron concentration of high-temperature plasma. The work shows an extensive literature review of TSD implemented on similar installations. Schemes for plasma probing and collection of scattered laser radiation of TSD are presented. Based on an analysis of the structural features of the KTM tokamak and existing technical constraints, the choice of a tangential diagnostic layout in the equatorial plane has been justified as the most reliable and practically feasible option. Key technical requirements for the Thomson scattering diagnostic system have been defined: an electron temperature measurement range of 50 to 3100 eV, an electron density range of  $1 \cdot 10^{19}$  to  $2.5 \cdot 10^{20} \text{ m}^{-3}$ , and coverage of at least 10 spatial observation points. Various diagnostic configurations, including vertical viewing schemes, were analyzed, and their implementation on KTM was shown to be infeasible due to a number of engineering and physical limitations.

The proposed configuration ensures alignment stability, protection against parasitic radiation, and high spatial resolution. This work represents a well-substantiated design of a Thomson scattering diagnostic system, the implementation of which will significantly enhance the diagnostic capabilities of the KTM tokamak for plasma and material research under controlled thermonuclear fusion conditions.

**Keywords:** *plasma, tokamak, KTM, TSD, laser radiation, plasma density.*