

УДК 621.039.647 + 539.125.5.03

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ НЕЙТРАЛЬНОЙ ИНЖЕКЦИИ ДЛЯ ПРОЕКТА ТЕРМОЯДЕРНОГО ИСТОЧНИКА НЕЙТРОНОВ ДЕМО-ТИН

С.С. Ананьев, Е.Д. Длугач, Б.В. Кутеев, А.А. Панасенков

НИИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

В работе [1] была представлена концепция системы нейтральной инжекции (СНИ) для нагрева плазмы и генерации тока для термоядерного источника нейтронов ДЕМО-ТИН. Рассмотрены вопросы выбора схемы инжектора нейтрального пучка и его параметров, которые были определены на основе оптимизационных расчётов, но методика, коды и процесс оптимизации остались за рамками статьи. Задача эффективной транспортировки пучка в СНИ многопараметрическая и требует 3-мерного моделирования и оптимизационных расчётов для всех элементов пучкового тракта. Цели оптимизации — минимизация потерь пучка при его транспортировке и ограничение тепловых нагрузок на компонентах инжектора до величин, допускающих эффективное охлаждение. Представлены методология поиска оптимальной геометрии и результаты исследования различных режимов работы СНИ. Рассмотрены основные факторы, влияющие на эффективность транспортировки, включая неточности настройки и внешние магнитные поля, для которых сформулированы ограничения. Приводится краткое описание моделей и кодов, используемых на различных этапах оптимизации. PDP-код используется для поиска оптимальной геометрии СНИ и её «тонкой настройки», BTR-код применяется для детального исследования траекторий отдельных частиц, их взаимных превращений, а также для расчётов карт полной нагрузки на всех поверхностях от всех компонентов пучка. Выбрана оптимальная самосогласованная конфигурация инжектора и исходного ионного пучка, определены рабочие интервалы параметров. Рассчитаны полные потери, эволюция профиля мощности пучка, построены детальные распределения нагрузок на всех компонентах СНИ, которые должны использоваться для инженерного проектирования.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, оптимизация, нейтральная инжекция, геометрия инжектора, тепловые нагрузки, термоядерный источник нейтронов, ДЕМО-ТИН, BTR-код, PDP-код.

MODELLING AND OPTIMIZATION OF NEUTRAL BEAM INJECTORS FOR FUSION NEUTRON SOURCE DEMO-FNS

S.S. Ananyev, E.D. Dlugach, B.V. Kuteev, A.A. Panasenkov

NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

The concept of neutral beam injection (NBI) for DEMO-FNS neutron source is introduced in [1]. The choice of injector configuration and operational parameters are based on computer simulations. The optimization approach and techniques, the numerical models with associated computer codes applied are not discussed in [1]. The problem of effective neutralization of high energy source ion beam and its transportation to tokamak plasma requires a 3-dimensional analysis involving tens of input parameters. The code-based optimization target is to obtain the NBI geometry and operational conditions which would allow for minimum beam losses along the beam path as well as the thermal loads reduction on the injector components with account of cooling circuits arrangement. The general approach of NBI optimization and the specific methods of the solution related to DEMO-FNS injector are represented here. The main factors affecting the beam transportation efficiency, including beam steering inaccuracies and background magnetic fields, are considered, the relevant operational restrictions are stated. The simulation models are described with their implementations in computer codes. For geometry optimization and its «fine tune» we use PDP-code. For more detailed analysis, involving beam particles tracing with mutual transforms, as well as for thermal load calculations including all beam species, we use BTR-code. The results of the optimization technique include the most effective «self-consistent» geometry of the injector and the source beam, the operational intervals, the beam total losses during the neutralization and transportation, the beam power profile evolution and the thermal loads distributions — for all injector components, and under different scenarios of operation. These results are proposed for engineering design of target NBI system.

Key words: optimization, neutral beam injection, beamline geometry, thermal loads, fusion neutron source, DEMO-FNS, BTR-code, PDP-code.

DOI: 10.21517/0202-3822-2018-41-3-57-79

ВВЕДЕНИЕ

Система нейтральной инжекции (СНИ) термоядерного источника нейтронов ДЕМО-ТИН [2] должна обеспечить нагрев плазмы и поддержание тока с помощью инжекции пучков быстрых атомов. В проекте ДЕМО-ТИН предполагается использовать шесть инжекторов, из которых четыре обеспечат стационарный ввод 30 МВт мощности дополнительного нагрева в виде пучков атомов энергией 500 кэВ, один инжектор — на регенерации и один — в резерве/ремонт. В качестве базовой схемы для инжектора ДЕМО-ТИН в статье [1] рассмотрена схема инжектора для проекта ИТЭР, которая построена на базе источника-ускорителя отрицательных ионов, на выходе которого сформирован пучок ионов D^- энергией 1 МэВ и током 40 А [3].

В выбранной схеме инжектора для ДЕМО-ТИН предусматривается использование аналогичного источника пучка, но с уменьшенной до 500 кэВ энергией. Для его нейтрализации и очистки от ионов, а также для дальнейшей его транспортировки в токамак требуются достаточная протяжённость пучковой линии (~20 м) и высокая точность угловой настройки пучка. Поэтому эффективная транспортировка пучка с минимальными потерями требует 3-мерного моделирования и оптимизации геометрии всех элементов пучкового тракта с учётом реалистических оценок оптических свойств пучков на основе отрицательных ионов [4]. Задача оптимизации геометрии инжектора и условий его работы многопараметрическая, с большим числом ограничений и высокой чувствительностью к малым изменениям параметров, что требует их «тонкой» взаимной настройки и высокой точности моделирования. В данной работе рассматриваются основные факторы, влияющие на эффективность работы инжектора, ограничения и сценарии работы. Среди внешних факторов отдельно рассмотрено влияние магнитного поля токамака на транспортировку пучка и инжектированную мощность. Для моделирования и оптимизации инжектора ДЕМО-ТИН используются два инженерно-физических кода PDP и BTR [5]. Они уже много лет применяются для проектирования систем нейтральной инжекции, прошли испытания и верификацию другими аналогичными кодами. В настоящее время оба они активно используются командами-участниками проекта ИТЭР. В данной работе кратко описаны модели этих кодов, их характеристики, постановки задач, а также методология поиска оптимальной геометрии. Основные результаты совместного моделирования включают в себя оптимальный вариант геометрии пучкового тракта и структуры исходного ионного пучка (т.е. параметры фокусировки осей апертур на выходе из источника-ускорителя), которые взаимно согласованы с точки зрения минимальных потерь пучка и допустимых предельных нагрузок на поверхностях. Для выбранной («оптимальной») конфигурации рассчитаны полные потери, эволюция профиля мощности пучка, включая сечение на входе в токамак. Определены приемлемые интервалы параметров — «операционное окно». Построены детальные двумерные распределения тепловой нагрузки на поверхностях компонентов пучкового тракта, которые могут быть использованы для инженерного проектирования СНИ ДЕМО-ТИН.

ИНЖЕКТОР

Концепция СНИ для установки ДЕМО-ТИН, её назначение и состав подробно описаны в [1]. Там же обоснована возможность адаптации схемы инжекторов ИТЭР, а также условия, облегчающие проектирование соответствующей схемы СНИ для ДЕМО-ТИН (идентичный ток ионного пучка при меньшей энергии частиц). Отмечено, что параметры пучка, заложенные в проект СНИ ИТЭР, пока не достигнуты в комплексе, но возможности их получения по отдельности уже продемонстрированы на различных экспериментальных стендах. Окончательные выводы о работоспособности выбранной схемы инжекторов должны быть сделаны по результатам испытаний полномасштабного тест-инжектора PRIMA в г. Падуде (Италия) в течение ближайших лет. Уменьшение энергии и мощности пучка в инжекторе ДЕМО-ТИН (по сравнению с ИТЭР) позволяет выбрать геометрию, которая обеспечивает максимально эффективную транспортировку пучка от ионного источника до плазмы токамака, сохраняя при этом тепловые нагрузки на компонентах, не превышающие допустимые значения [1].

Структурная схема инжектора нейтрального пучка для установки ДЕМО-ТИН показана на рис. 1. Нагревные инжекторы расположены симметрично относительно вакуумной камеры токамака

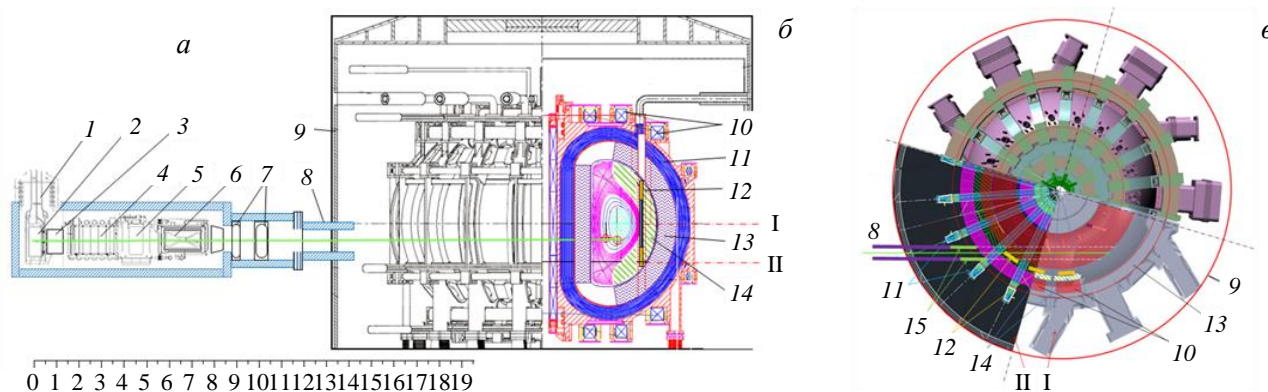


Рис. 1. Схема инжектора для СНИ ДЕМО-ТИН (а) и расположение компонентов ТИН, ограничивающих положение каналов инжекции (б), поперечный разрез (в): 1 — высоковольтный ввод источника ионов; 2, 3 — ускоритель отрицательных ионов; 4 — газовый нейтрализатор; 5 — приёмник ионов; 6 — приёмник атомов; 7 — быстрая заслонка и шибер; 8 — атомопровод; 9 — криостат; 10, 11 — катушки полоидального и тороидального полей; 12 — активная зона и патрубок загрузки; 13 — вакуумная камера и защита; 14 — бридерная зона; 15 — лайнер атомопровода; I — экваториальное сечение; II — сечение ниже экватора (–1,4 м)

под углом 57° , обеспечивающим тангенциальное введение пучка по касательной к оси шнура. Корпуса инжекторов размещаются за криостатом установки. Инжекторы соединены с вакуумной камерой токамака атомопроводами через сильфонные соединения, позволяющие обеспечить вакуумное уплотнение при возникновении взаимных смещений при захлаживании криостата токамака до рабочей температуры и при нагреве камеры токамака во время рабочего импульса. Патрубки инжекции расположены ниже экваториальной плоскости тора, и это позволяет размещать внутри вакуумной камеры элементы активной зоны-размножителя нейтронного потока и blankets-наработчика трития непосредственно над атомопроводом. Если с внешней стороны вакуумной камеры канал инжекции выполнен в виде патрубка, содержащего внутри себя элементы для снятия и отвода тепловой мощности (водоохлаждаемый лайнер), то внутри вакуумной камеры канал сформирован стенками элементов blankets. Исходя из плотной компоновки систем токамака (в том числе защиты катушек магнитной системы), сечение канала инжекции ограничено размером $0,5 \times 1,0$ м, и предлагалось рассмотреть размер выходного окна атомопровода $0,4 \times 0,8$ м в качестве базового. Минимальная длина атомопровода задана и составляет 11 м. Нейтрализация ионного пучка, электростатическая сепарация ионных компонентов и дальнейшая транспортировка в плазму требуют значительной длины пучковой линии, так что расстояние от точки генерации первичных ионов до окна инжекции в ДЕМО-ТИН составляет порядка 20 м. Для снижения потерь пучка на транспортировку длину инжектора и поперечные размеры пучка желательно сделать как можно компактнее. Благодаря более низкой энергии частиц и мощности пучка по сравнению с ИТЭР есть возможность сократить длину нейтрализатора вследствие снижения в 1,75 раза оптимальной толщины газовой мишени, а также продольные размеры электростатического приёмника остаточных ионов (ПОИ) и приёмника нейтрального пучка из-за снижения принимаемой плотности мощности. Наконец, как показали расчёты, целесообразно сделать меньшее число каналов.

Как уже было сказано, в качестве источника ионного пучка выбран источник-ускоритель, аналогичный СНИ ИТЭР, причём для ускорения ионов до энергии 500 кэВ используются три ступени ускорения с разностью потенциалов по 150—200 кВ.

В четырёхканальном варианте геометрия апертур в электродах ионно-оптической системы (ИОС) и соответственно структура пучка на выходе заземлённого электрода (ЗЭ) следующие (рис. 2, а):

- число отверстий, из которых выходят элементарные пучки («бимлеты»), равно 1280;

- отверстия сгруппированы в четыре вертикальные колонны, расстояние между осями колонн по горизонтали равно 160 мм, в каждой колонне отверстия разделены на четыре группы с расстояниями между центрами групп по вертикали 396 мм, т.е. всего имеется 16 (4×4) пучковых групп;

- в каждой группе 80 бимлет распределены по пять по горизонтали с шагом 20 мм и по 16 по вертикали с шагом 22 мм, размер одной группы 80×330 мм, размер всего пучка на выходе ЗЭ 560×1518 мм;

- ось каждой группы сфокусирована (нацелена) на центр выходного окна атомопровода путём механического профилирования электродов;

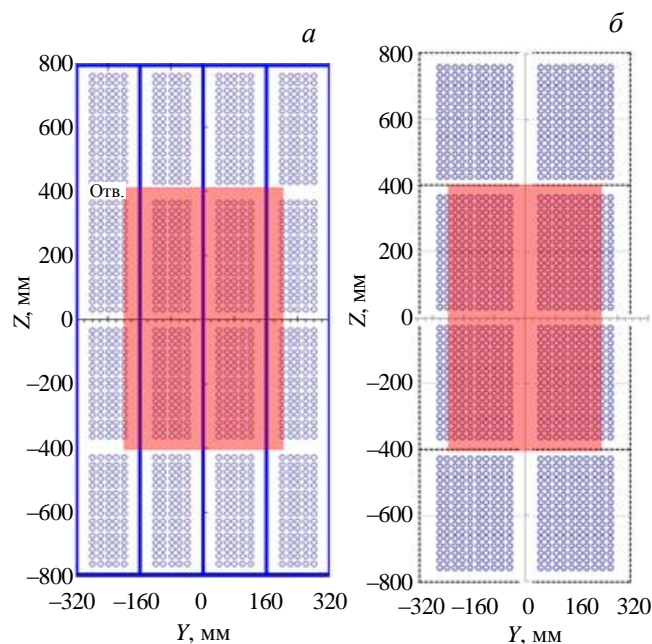


Рис. 2. Структура ионного пучка на выходе ИОС: четыре канала (16 групп) (а); два канала (8 групп) (б); отв. — прямоугольные группы отверстий на ЗЭ источника ионов для СНИ ДЕМО-ТИН; ■ — условно показана проекция выходного окна инжекционного тракта (40×80 см)

— внутри каждой группы фокусировка следующая: по вертикали оси бимлет параллельны оси группы, по горизонтали оси бимлет нацелены на вертикальную ось выходного окна соответствующего канала ПОИ (рис. 3, а).

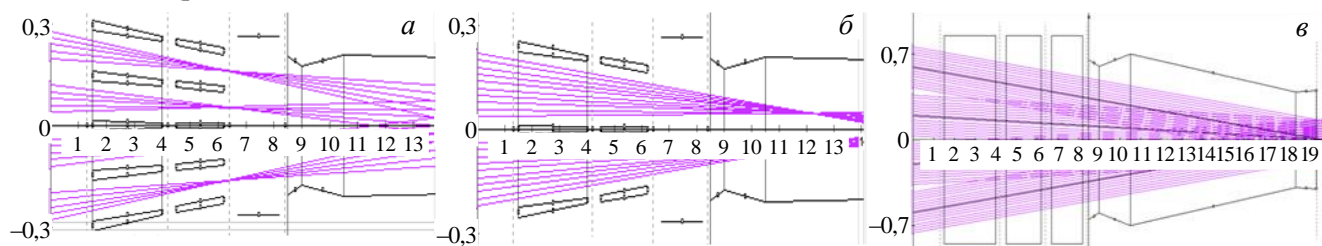


Рис. 3. Схема фокусировки бимлет в инжекторе ДЕМО-ТИН: горизонтальная фокусировка — четыре канала (а), два канала (б); вертикальная фокусировка — общая для обеих схем (в). По вертикали внутри каждой группы оси бимлет параллельны

В двухканальном варианте сохраняется количество бимлет, число пучковых групп снижается вдвое (2×4), число бимлет в группе удваивается (10×16). По вертикали группы расположены аналогично четырёхканальному варианту, по горизонтали расстояние между осями двух колонн 280 мм. Размер одной группы 180×330 мм, размер пучка на выходе ЗЭ 460×1518 мм, т.е. пучок стал более компактным по горизонтали (рис. 3, б). В основном все фокусировки сохраняются, за исключением горизонтального фокуса бимлет в группах. Эта фокусировка осуществляется либо смещением по горизонтали отверстий в одном из электродов (пропорционально расстоянию от вертикальной оси группы) относительно отверстий предыдущего электрода, либо с использованием профилированных накладок на выходных поверхностях электродов на краях каждой группы [4]. Но при этом возможности отклонения бимлет на достаточно большой угол ограничены, и с увеличением расстояния крайних отверстий от оси группы более, чем в 2 раза, горизонтальное фокусное расстояние для бимлет удлинится до 12—14 м (см. рис. 3, б).

В реальности идеальную настройку бимлет относительно оси инъекции — как по горизонтали, так и по вертикали — осуществить сложно [6], всегда есть отклонения, неточности фокусировки, которые обусловлены ограниченной точностью изготовления и монтажа электродов, а также их термическими деформациями. Кроме того, имеются физически обусловленные факторы — действие объёмного заряда соседних бимлет на стадии их ускорения в ИОС и влияние магнитных полей, перехватывающих электроны в области вытягивания и ускорения ионов в источнике. Чтобы это учесть, при оптимизации геометрии величина такого отклонения варьируется, при этом определяются «номинальные» (допустимые) значения углового отклонения — по горизонтали и по вертикали, при которых эффективность транспортировки пучка можно считать приемлемой.

Магнитные поля вдоль пучкового тракта тоже существенно влияют на транспортировку. Наиболее «опасен» вертикальный компонент магнитного поля (B_z), который вызывает горизонтальное отклонение ионов, вышедших из источника, до их нейтрализации, т.е. на участке от источника до выхода нейтрализатора, а также может привести к неполному перехвату остаточных ионов в приёмнике ионов. Магнитное поле искажает и внутреннее угловое распределение бимлет. После выбора геометрии инжектора обычно проводится серия расчётов с целью определить допустимые величины магнитного поля на различных участках пучкового тракта и обозначить требования к экранировке рассеянных полей от токамака для этих участков. Когда доступны данные по распределению магнитных полей вдоль всего инжектора с учётом экранирования, проводятся детальные расчёты всех потерь пучка и нагрузок на стенки с учётом заданных профилей магнитного поля. Если таковых данных нет, то используются различные модельные профили, например, подобные профилям для аналогичных систем.

В качестве основных инструментов для моделирования и оптимизации СНИ ДЕМО-ТИН используются оригинальные инженерно-физические коды, разработанные в Российской Федерации, прошедшие процедуру тестирования и верификации [7—9]: PDP и BTR. Благодаря их гибкости и визуальности они уже много лет активно используются командами-участниками проекта ИТЭР не только для проектирования и проверки работоспособности различных систем инъекции [4, 10, 11], но и для обучения персонала в качестве интерактивных симуляторов инъекции. В данной статье мы опишем основные характеристики этих кодов, используемые модели, а также возможности их применения при решении различных задач, связанных с проектированием и анализом систем инъекции пучков.

МОДЕЛИ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ ИНЖЕКТОРА

Модель пучка. Стартовая конфигурация и параметры пучка на выходе источника-ускорителя задаются в соответствии с описанием, приведённым ранее.

Каждая бимлета на выходе из ИОС характеризуется угловым распределением тока ионов, причём пространственный размер бимлеты на старте можно считать бесконечно малым. В работе [6] показано, что наилучшая модель углового распределения, которая согласуется с экспериментальными данными, соответствует суперпозиции двух гауссовых профилей, которые описывают соответственно основное «ядро» бимлеты (85% тока ионов) и относительно широкое «галло» (15% тока):

$$j(\theta) = \frac{1-H}{\pi\Delta_c^2} \exp(-\theta^2/\Delta_c^2) + \frac{H}{\pi\Delta_h^2} \exp(-\theta^2/\Delta_h^2), \quad (1)$$

где θ — величина полярного угла, измеряемого от оси бимлеты; H — доля фракции галло; Δ_c и Δ_h — угловая ширина (средний угол отклонения) для профилей ядра и галло, соответствующая значению полярного угла, при котором плотность тока в e раз меньше, чем на оси бимлеты.

Поскольку реальные характеристики пучка для инжектора ИТЭР пока не известны [4], эти параметры принимаются с учётом имеющихся экспериментальных данных для существующих систем на базе отрицательных ионов. Для расчётов инжектора на 500 кэВ принимаются $\Delta_c = 5\text{—}9$ мрад, $H = 15\%$, $\Delta_h = 30$ мрад.

Изменение компонентного состава пучка. В объёме нейтрализатора атомы D^0 получают путём обдирки лишнего электрона (сечение σ_{-10}) в результате столкновений ионов D^- с молекулами газовой мишени D_2 . Кроме того, в нейтрализаторе возможны реакции двойной обдирки (с образованием ионов D^+ , σ_{-11}) — реионизации (σ_{01}) и рекомбинации (σ_{10}). Согласно модели (BTR-код) изменение компонентного состава пучка в области нейтрализации вдоль оси инжекции (ось x) описывается уравнениями [6]

$$\frac{d\Gamma^-}{dx} = -\Gamma^-(\sigma_{-10} + \sigma_{-11})n; \quad (2)$$

$$\frac{d\Gamma^0}{dx} = \Gamma^-\sigma_{-10}n + \Gamma^+\sigma_{10}n - \Gamma^0\sigma_{01}n; \quad (3)$$

$$\frac{d\Gamma^+}{dx} = \Gamma^-\sigma_{-11}n + \Gamma^0\sigma_{01}n - \Gamma^+\sigma_{10}n. \quad (4)$$

Здесь Γ^- , Γ^0 , Γ^+ — потоки частиц соответствующего сорта. В рамках нашей модели не учитывается электронный компонент пучка, т.е. быстрые электроны, полученные в результате обдирки. Кроме того, мы полагаем, что мишень состоит только из одного сорта частиц — молекул D_2 . Если пренебречь «минорными» процессами, тогда оптимальная толщина мишени зависит от соотношения скоростей основных реакций — нейтрализации (σ_{-10}) и реионизации (σ_{01}):

$$NL_{\text{opt}} = \int_0^{\text{вых. нейтр.}} n_{D_2}(x) dx = \frac{1}{\sigma_{-10} - \sigma_{01}} \ln \frac{\sigma_{-10}}{\sigma_{01}}. \quad (5)$$

Тем не менее используемая в BTR модель нейтрализации учитывает все четыре реакции с учётом доступных сечений процессов [12]. В расчётах PDP-кодом обычно принимается, что на выходе нейтрализатора пучок имеет состав $D^0 \sim 60\%$, $D^-/D^+ \sim 20\%$, поскольку именно такой состав пучка является оптимальным и получается в результате расчётов нейтрализации, проведённых BTR-кодом при энергии отрицательных ионов 500 кэВ.

Газовый профиль (рис. 4), использованный для BTR-расчётов нейтрализации и реионизации, соответствует оптимальному значению толщины газовой мишени для дейтериевого пучка энергией 500 кэВ ($NL = 0,8 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-2}$) и синтезирован на базе данных СНИ ИТЭР [3].

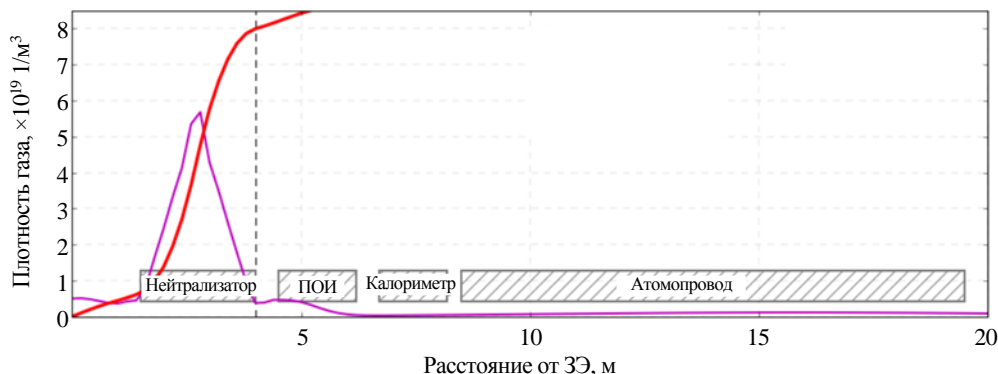


Рис. 4. Модельный профиль плотности газа (—) и изменение оптической толщины газовой мишени (—) вдоль оси СНИ ДЕМО-ТИН

Необходимо учитывать, что в расчётах нейтрализации пучка используются данные по сечениям, известные с точностью $\pm 25\%$, которые экспериментально подтверждены только до 400 кэВ D^- [12].

Реионизация атомов на остаточном газе имеет место вдоль всего пути транспортировки нейтрального пучка в токамак — от нейтрализатора до окна инжекции. Модель реионизации аналогична модели нейтрализации, но значительно проще, так как учитывает всего лишь один процесс — ионизацию (σ_{01}) $D^0 + D_2 \rightarrow D^+$. Полные потери на реионизацию пучка на толщине мишени NL можно оценить, как $f_{ri} = 1 - \exp(-NL\sigma_{01})$.

Ослабление и захват пучка в плазме токамака. Нейтральные частицы высокой энергии инжектируются в плазму токамака, где посредством столкновений с частицами плазмы передают им свою кинетическую энергию. Ослабление нейтрального водородного пучка в плазме происходит в результате обмена зарядом (σ_{cx}) и ионизации быстрых атомов — в столкновениях с электронами (σ_e), основными ионами (σ_p) и ионами примесей (σ_z). В процессе передачи энергии от пучка плазме часть нейтралов может пройти плазму насквозь без ионизации (shine-through), создавая тепловую нагрузку на противоположной стенке камеры — сквозные потери нейтрального пучка в плазме. Сечения процессов зависят от энергии инжектируемых атомов. Изменение интенсивности луча вдоль траектории вычисляется

$$\frac{dl}{dx} = -l(n_e\sigma_e + n_p\sigma_p + n_p\sigma_{cx} + n_z\sigma_z) = -n_e\sigma_s l, \quad (6)$$

где σ_s — суммарное сечение захвата (ослабления) пучка (beam stopping cross section):

$$\sigma_s = \sigma_e + \frac{n_p}{n_e}(\sigma_p + \sigma_{cx}) + \frac{n_z}{n_e}\sigma_z = \sigma_e + \sigma_p + \sigma_{cx} + \frac{n_z}{n_e}\sigma_z. \quad (7)$$

Это позволяет также оценить мощность пучка, прошедшую насквозь, и построить карту нагрузки на стенке токамака.

BTR-код позволяет рассчитать ослабление нейтрального пучка в плазме и построить его отпечаток на стенке, применяя аппроксимации Janev—Suzuki [13, 14] для сечений захвата, с учётом многоступенчатой ионизации (multistep collisions). Распределение плазменных параметров (электронная плотность и температура, эффективный заряд) и двумерное распределение полоидального потока $\Psi(r, z)$ задаются из внешних файлов, можно варьировать состав плазмы (содержание примесей).

Схема инжектора, геометрия компонентов. Значительная протяжённость пучковой линии и стремление снизить потери на транспортировку жёстко ограничивают геометрию пучкового тракта и требуют высокой точности настройки оптики пучка, а также требуют экранирования магнитных полей и ограничения потерь на реионизацию. Изначально вся схема тракта, форма и размеры отдельных компонентов, их положение, зазоры, и т.д. выстраиваются согласованно с оптическими параметрами пучка с учётом используемых материалов и предложенных схем охлаждения.

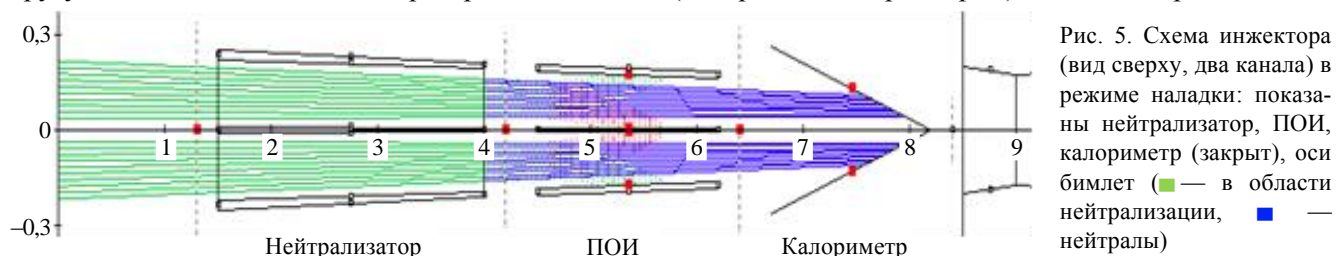
В нейтрализаторе должна быть создана газовая мишень определённой толщины, оптимальной по выходу нейтралов и при минимально возможном напуске газа. Снаружи нейтрализатора плотность газа должна быть минимальна, чтобы снизить вероятность столкновений ионов с фоновым газом на этапе ускорения в ИОС (перед нейтрализатором), а также максимально ограничить потери атомов на реионизацию после нейтрализатора. Поэтому по обеим сторонам от газового нейтрализатора должны быть предусмотрены зазоры, достаточные для интенсивной откачки газа.

Для создания газовой ячейки нейтрализации, не пристыкованной к ионному источнику, с заданной толщиной мишени и с минимальными потоками на концах используются каналы с инжекцией газа посередине, имеющие «треугольный» профиль газа в молекулярном режиме. Однородность распределения газа по вертикали в канале достигается равномерным напуском через вертикальный ряд отверстий на боковых стенках. Эффективная ширина канала задаётся поперечным размером пучка. При заданной интегральной толщине мишени можно варьировать величину напуска газа, длину канала и его проводимость. Чтобы снизить поток газа, при ограничениях на длину нейтрализатора газовую ячейку делят на несколько каналов, повышая полное газовое сопротивление ячейки. Например, в СНИ ИТЭР длина нейтрализатора ограничена до 3 м, а поперёк нейтрализатор разделён на четыре узких вертикальных канала. Недостаток этого подхода в том, что на панелях, разделяющих каналы, теряется часть пучка и, как

следствие, в этом случае приходится ставить жёсткие ограничения на оптику и фокусировку бимлет. В статье [1] нами было показано, что для СНИ ДЕМО-ТИН более привлекательным является вариант с двумя каналами удвоенной ширины и нейтрализатором длиной 2,5 м. При такой схеме суммарные потери пучка ниже, чем в 4-канальном варианте, так что инжектированная мощность выше.

Структура нейтрализатора и структура ПОИ подобны друг другу, каждый канал ПОИ служит продолжением соответствующего канала нейтрализатора (см. рис. 3, а, б). При этом если для отклонения и перехвата ионов пучка панелями длиной $\sim 1,5$ м в 4-канальном варианте требуется напряжение ~ 12 кВ, то в 2-канальной схеме необходимо напряжение $\sim 30\text{—}35$ кВ (внутренняя панель под отрицательным потенциалом, две внешние панели заземлены). Для сравнения: в случае одного канала потребовалось бы перехватывающее напряжение ~ 100 кВ, а также увеличение напуска газа в нейтрализатор и скорости откачки в несколько раз.

Форма калориметра (приёмника нейтрального пучка), т.е. количество приёмных панелей и их расположение в закрытом состоянии, выбирается исходя из величины максимума плотности мощности пучка во время его полного перехвата при наладке и диагностике инжектора. Если нормальная плотность мощности в поперечном сечении пучка меньше допустимой (<20 МВт/м²), то можно было бы поставить одну панель перпендикулярно оси пучка, обеспечив необходимый теплоотвод. Но обычно это не так, и приёмная панель ставится под углом к оси, так что наклон поверхности «снижает» нормальную нагрузку до требуемого уровня. При этом длина отпечатка и приёмной панели возрастает (в $1/\sin\alpha$ раз). Две панели, симметрично расположенные под углом к оси пучка (V-образная форма приёмника), сокращают длину калориметра вдвое, и, кроме того, они защищают криопанели от отражённых потоков частиц. В СНИ ДЕМО-ТИН используется V-образный калориметр, длина каждой панели 1,5 м, угол наклона к оси пучка 10° (суммарный угол между панелями 20°). Наихудшие условия по нагрузке для калориметра достигаются при наилучшей (наименьшей) ширине бимлет. В инжекторе ДЕМО-ТИН ожидаемая (номинальная) угловая ширина бимлет ~ 7 мрад и максимальная поперечная плотность мощности пучка в районе калориметра ~ 60 МВт/м². Угол между панелями 20° снижает нормальную нагрузку примерно в 6 раз (до ~ 11 МВт/м²), которую можно снимать с помощью STE-трубок (со скрученной лентой). В режиме инжекции пучка в токамак панели калориметра раздвигаются и располагаются параллельно друг другу вдоль оси. Схема инжектора в режиме наладки (с закрытым калориметром) показана на рис. 5.



После настройки или диагностики пучка панели калориметра раскрываются и пучок идёт в плазму. Инжектор соединяется с камерой токамака с помощью атомопровода — трубы прямоугольного сечения. На выходе из камеры инжектора располагается конический прямоугольный «скрепер», он срезает периферийные части пучка, которые «не вписываются» в окно инжекции токамака и могут создать только дополнительные тепловые нагрузки на стенках атомопровода, а также вызвать десорбцию газа. Внутри атомопровода установлена быстродействующая пневматическая заслонка, которая до начала инжекции находится в закрытом положении, обеспечивая низкую вакуумную проводимость и снижая потоки газа из токамака в инжектор во время начального напуска газа в токамак и обратные потоки из инжектора в токамак при регенерации криопанелей. Она открывается примерно за 1 с перед началом инжекции пучка. За заслонкой находится шибер, позволяющий при необходимости ремонта или замены компонентов в камере инжектора отсоединять за несколько минут по вакууму инжектор от токамака. В месте присоединения шиберов к атомопроводу расположен гибкий двухслойный сильфонный узел, допускающий взаимное смещение атомопровода и корпуса инжектора при захолаживании криостата токамака до рабочей температуры. Сильфон и стенки атомопровода защищены от бомбардировки реионизованными частицами охлаждаемым лайнером.

МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ

Все компоненты пучковой линии рассчитаны на многолетний срок эксплуатации (30 лет), поэтому необходимо максимально точно оценивать все тепловые нагрузки и пиковые мощности на всех поверхностях, чтобы иметь возможность предсказать возникающие в материалах термические напряжения, влияющие на выносливость. Для «финальной» версии требуются детальные расчёты транспортировки пучка и карты тепловых нагрузок для всех поверхностей инжектора, построенные в рабочем диапазоне параметров.

Эта задача требует 3-мерного моделирования и больших объёмов вычислений, поскольку число параметров только для описания геометрии инжектора велико ($\sim 10^2$), а результаты вычисления прямых потерь чувствительны даже к малым изменениям этих параметров. Это значит, что требуется высокая точность моделирования всей системы и трассировки частиц пучка, что возможно лишь при использовании специальных кодов. Совместное применение кодов PDP и BTR позволило получить оптимизированную конфигурацию инжектора (или «финальную» версию геометрии), а также рассчитать подробные распределения тепловых нагрузок на всех элементах для различных сценариев работы. Эти результаты могут служить основой для инженерного проектирования инжектора.

Как правило, для каждого из сценариев задаются параметры фокусировки пучка, магнитные поля от токамака, а также газовые распределения. Когда данные по магнитному полю или газовому распределению недоступны, код BTR использует модельные профили, которые строятся на основе имеющихся данных для аналогичных систем, — с помощью их обработки и модификации для новых условий (например, профиль давления нормируется на толщину мишени, длину нейтрализации и длину всего тракта). В частности, графический интерфейс кода BTR позволяет задавать и «настраивать» профили магнитного поля и газа, поскольку оптимизация геометрии нередко проводится в условиях недостатка исходных данных.

Код PDP (Power Deposition Profiles). Код предназначен для инженерных расчётов систем инжекции на основе нейтральных пучков и активно использовался для оптимизации геометрии инжекторов ИТЭР. Код PDP детально воспроизводит структуру пучка на выходе из ЗЭ ускорителя ионов, индивидуальные характеристики бимлет и использует упрощённую модель геометрии каналов инжектора в виде серии прямоугольных окон (диафрагм), которые перпендикулярны оси инжекции. Общее количество диафрагм в коде PDP варьируется (до 15) и зависит от степени детализации формы каналов вдоль оси пучка, имеется возможность смещения центров диафрагм по горизонтали и вертикали.

Код PDP позволяет рассчитать с высокой точностью распределение интенсивности (плотности мощности) от точечного источника светового пучка в любой точке пространства. Каждая бимлета в модели PDP представляет собой поток света в полусфере с нормальным распределением интенсивности по полярному углу θ , которое описывается функцией Гаусса (выражение (1)). Для изотропного распределения бимлет по углу вводится угол расходимости (угловая ширина), при котором интенсивность спадает в e раз. В случае анизотропного двумерного распределения по горизонтали и вертикали ширины бимлет различаются.

Система координат при моделировании инжектора отличается от системы координат токамака: её начало совпадает с центром сечения ЗЭ. Бимлеты пучка берут своё начало в центрах отверстий ЗЭ и последовательно проходят через все диафрагмы, которые образованы каналами нейтрализатора ПОИ, скрепера и атомопровода.

При прохождении любой бимлеты через какую-либо из диафрагм происходит «обрезание» её крыльев, которое определяется положением оси бимлеты относительно центра диафрагмы и соответственно расстояниями до каждого из её четырёх краёв. Потери интенсивности на каждой из четырёх сторон диафрагмы рассчитываются с помощью гауссова интеграла ошибок с использованием разложения функции ошибок $\text{ERF}(u)$. Построение профилей и карт мощности на некоторой поверхности («мишени») сводится к расчёту суммарной интенсивности от всех бимлет в каждой точке расчётной сетки на заданной поверхности. При этом учитываются потери мощности каждой бимлеты на всех предыдущих диафрагмах («затенение») и непрозрачных стенках каналов. В результате определяются распределения плотности мощности и полная мощность энерговыделений на диафрагмах и стенках каналов, а также в проходящем пучке на любом расстоянии от источника.

Входные данные: конфигурация массива источников лучей-бимлет, их мощность, угловая ширина и фокусировка, количество, положение и размеры «диафрагм», положение приёмной мишени для расчёта интенсивности.

Выходные данные: потери мощности пучка на диафрагмах и стенках каналов, а также профили или матрицы нагрузок на них и на произвольных мишенях, изменение полной мощности и профилей пучка по тракту.

Код PDP реализует простой и наглядный подход к описанию пучка бимлет (модель лучевой геометрии), что позволяет быстро оценивать распределение мощности на отдельных поверхностях (аналог освещённости), и поэтому код PDP достаточно быстрый и удобен для проведения большого числа итерационных расчётов на этапах выбора конфигурации и настройки всех геометрических параметров. Но поскольку в нём не учитывается наличие электрических и магнитных полей, влияющих на движение первичных и остаточных ионов по тракту, то для получения окончательных данных о потерях пучка и профилях нагрузок на всех компонентах тракта с учётом распределений давления газа и указанных полей необходимо использовать код BTR. Этот код традиционно используется в задачах, требующих трассировки отдельных траекторий частиц и учёта их превращений. Такими задачами являются нейтрализация ионного пучка, отклонения ионов в электромагнитных полях, потери нейтрального пучка на реионизацию, ослабление в плазме и т.д. Кроме того, код BTR регулярно используется как графический и текстовый редактор.

Код BTR (Beam Transport). Код BTR позволяет моделировать геометрическую структуру инжектора, максимально подробно задавать форму отдельных компонентов, а также рассчитывать формирование и транспортировку пучка путём трассировки отдельных частиц с учётом влияния полей, газовых условий и т.д. Код имеет гибкий «интуитивно понятный» графический интерфейс пользователя (GUI) для интерактивного ввода данных, наглядного отображения процесса трассировки пучка и широкий набор средств обработки результатов. Другая особенность кода — возможность трассировки большого числа модельных частиц ($\sim 10^8$ и выше) при высокой скорости вычислений, которая наиболее заметна на многопроцессорных системах. Простота и наглядность вместе с высокой скоростью вычислений делают код BTR пригодным для использования в качестве «симулятора» системы нейтральной инжекции. Экран кода во время трассировки пучка в режиме инжекции (с открытым калориметром) показан на рис. 6.

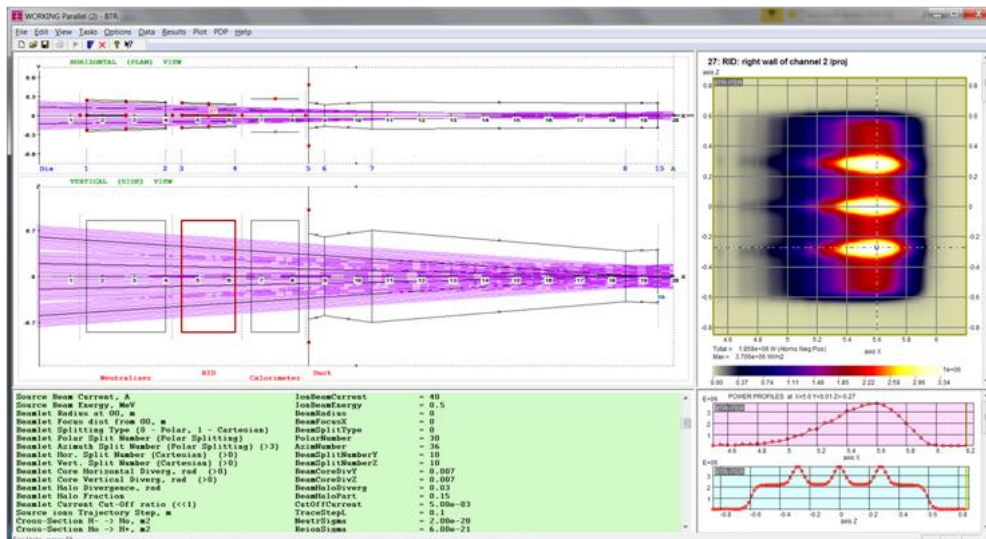


Рис. 6. Основной экран BTR-кода в процессе расчёта: показаны схема инжектора в режиме инжекции (калориметр открыт), геометрия пучка (оси бимлет), внизу слева — окно интерактивного ввода данных (Green panel), справа — цветная карта нагрузки и её профили на отмеченной пользователем поверхности (в данном случае это внутренняя панель ПОИ)

Как и код PDP, код BTR применяется для инженерных расчётов систем инжекции на основе нейтральных пучков. Он много лет используется для моделирования различных инжекторных систем, включая нагревный и диагностический инжекторы ИТЭР. Код детально воспроизводит структуру пучков в виде набора бимлет и геометрию каналов инжектора. Траектории пучковых частиц их преобразования рассчитываются с учётом распределения газа и электромагнитных полей, причём некоторые из этих полей могут быть рассчитаны самим кодом BTR (например, 2-мерное распределение электрического поля в ПОИ), а другие синтезированы с помощью встроенного интерфейса (газ, магнитное поле). Код BTR позволяет строить карты тепловой мощности — как суммарной, так и отдельно для каждого компонента пучка — в поперечных сечениях и на всех поверхностях инжектора, а также на задней стенке токамака.

Код изначально был разработан для проектирования инжекторов ИТЭР, самая первая версия (на языке Turbo Pascal) появилась в 1995 г. Активно используется в настоящее время командой ИТЭР и другими командами-участниками проекта. Имеются также версии кода для других конфигураций инжекторов (на положительных ионах, с магнитным ПОИ) [10]. Поздние версии кода BTR написаны на MS Visual C++ (для Win32/64). Ёмкость модели (в частицах) пропорциональна объёму оперативной памяти, на современных системах она измеряется десятками и сотнями миллионов частиц. Начиная с версии 3.0, в результате работы по распараллеливанию и оптимизации кода его быстродействие выросло примерно в 10 раз (в некоторых задачах до 20), что значительно повысило его популярность [4, 8, 11].

Интерактивный интерфейс BTR (Windows-like GUI, рис. 6) включает в себя текстовый редактор для ввода и редактирования входных данных Green panel, инструменты управления в виде контекстных меню, диалогов и разнообразные авторские графические утилиты (собственная библиотека визуализации входных данных и результатов расчёта). Все эти инструменты позволяют пользователю интерактивно вводить исходные данные — задавать геометрию, физические параметры, опции трассировки частиц пучка, а также выбирать способы анимации в процессе расчёта и форму представления результатов — в виде цветных карт, линий уровня, 3D-распределений, профилей, таблиц и т.д. Все данные можно в любой момент сохранять в виде текстовых файлов и/или изображений.

Код BTR применяется для отслеживания отдельных траекторий частиц и учёта их превращений, что требуется при расчётах нейтрализации ионного пучка, отклонения ионов в электромагнитных полях, потерь нейтралов на реионизацию, ослабления в плазме и т.д. Кроме того, код BTR может быть использован как графический и текстовый редактор. В принципе коды BTR и PDP имеют общий объект исследования, во многом сходные задачи. Преимущество кода PDP — геометрическая простота модели и её наглядность (аналог лучевой оптики). Сравнение кодов PDP и BTR приведено в табл. 1.

Таблица 1. Сравнительные характеристики кодов PDP и BTR

Задача/свойство	PDP	BTR
Моделирование углового распределения бимлет	Непрерывное двумерное распределение	Дискретное: модель «больших» частиц
Моделирование структуры и оптики исходного пучка (регулярный или нерегулярный массив бимлет)	Да	Да
Модель геометрии инжектора	Диафрагмы (прямоугольные окна)	Точное описание всех поверхностей
Моделирование нейтрализации пучка	Тонкая (без газа) — изменение мощности на выходе нейтрализатора	Тонкая (без газа) или толстая (профиль газа и сечения реакций заданы)
Расчёт электростатического поля в приёмнике остаточных ионов	Нет	Да — с объёмным зарядом от ионов или без
Потери нейтрального пучка за счёт прямого перехвата	Да	Да
Трассировка отдельных частиц пучка до входа в плазму или до первой стенки токамака	Нет	Да
Потери на реионизацию на остаточном газе	Нет	Да
Учёт отражения частиц	Нет	Есть
Учёт электромагнитных полей	Нет	Да
Построение траекторий заряженных частиц в электромагнитных полях	Нет	Да
Карты тепловой нагрузки на поверхностях и профили максимальной нагрузки	Да	Да
Карты и профили распределения мощности в поперечных сечениях пучка	Да	Да
Ослабление нейтрального пучка в плазме	Нет	Да
Карта просветной мощности на первой стенке (shine-through)	Да (при заданной величине ослабления)	Да
Язык/среда разработки	Фортран	C++ (Visual C++ 2015)
Ввод/вывод данных	Последовательный ручной ввод или текст. файлы	Интерактивный ручной, текст. файлы, изображения
Графическое представление данных	Нет	Да
Встраиваемость в другие коды	Да	Нет
Верификация	Да	Да
Импорт/экспорт геометрии в CAD-модели	Нет	Да

ХОД И РЕЗУЛЬТАТЫ ОПТИМИЗАЦИИ

На рис. 7 показана условная схема алгоритма оптимизации геометрии инжектора, на которой представлены основные этапы и применяемые инструменты (компьютерные коды). На рис. 8 показаны так называемые «сопутствующие задачи», которые решаются отдельно от основного потока вычислений.

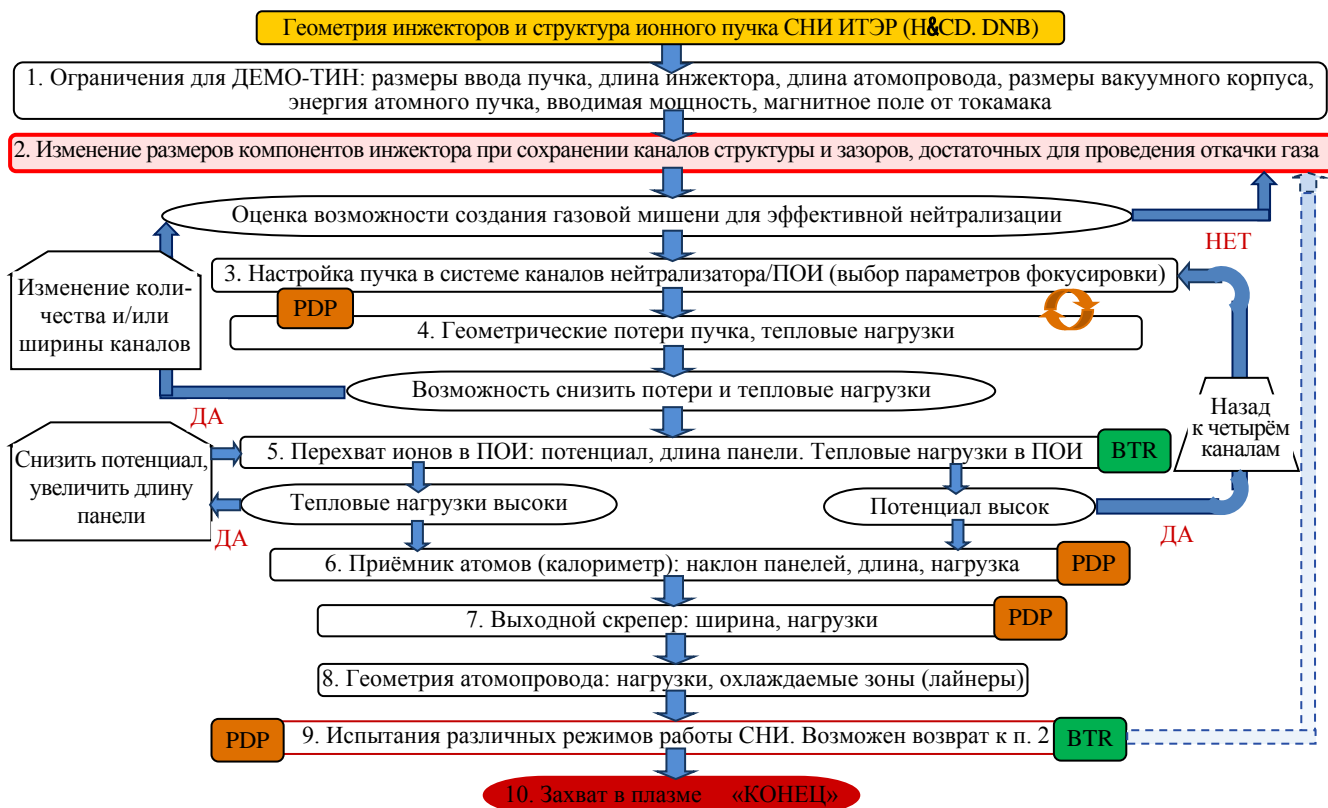


Рис. 7. Обобщённый алгоритм оптимизации пучкового тракта инжектора ДЕМО-ТИН кодами BTR и PDP

Первичная оптимизация геометрии инжектора проводится кодом PDP. Сначала выбирается некоторый базовый вариант схемы, который включает в себя структуру пучка в виде массива бимлет, их оптические характеристики (параметры фокусировки), а также общую конфигурацию инжектора (каналы, компоненты). Далее с учётом заданных ограничений на длину тракта и размеры окна инжекции корректируются положение и форма отдельных компонентов и для новой версии схемы выбирается оптимальная фокусировка пучка, исследуется влияние различных факторов на транспортировку, например, угловой ширины бимлет, их отклонений от оси инжекции вследствие неточности настройки и действия магнитного поля. Сравниваются схемы с различным числом каналов, и среди них выбирается оптимальная. Для выбранной схемы рассчитывается максимальная мощность инжекции в плазму при заданных размерах окна инжекции (при идеальном сценарии работы). Оценивается влияние магнитного поля. Выбирается «номинальный» режим в виде совокупности параметров настройки пучка и влияния магнитного поля.

Далее осуществляется «тонкая настройка» отдельных компонентов инжектора, как правило, кодом PDP. Задаются зазоры между отдельными компонентами, выбираются толщины панелей, размеры диафрагм (окон для прохода пучка), по ним выстраиваются каналы. Параллельно с настройкой геометрии компонентов корректируются параметры массива бимлет (расстояния между осями, фокусировки). На этом этапе кодом PDP выполняются серии детальных расчётов тепловых нагрузок на торцевых и боковых поверхностях при варьировании формы, размеров и углов наклона отдельных элементов. В результате выбирается «финальный» вариант геометрии всех компонентов, строятся профили нагрузок на соответствующих поверхностях.

С помощью кода BTR проводится анализ влияния магнитного поля на формирование и транспортные потери пучка, а также оцениваются потери пучка на реионизацию. Для финального варианта геометрии и

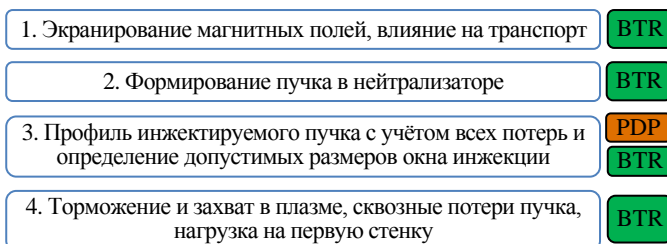


Рис. 8. Сопутствующие задачи, решаемые в процессе оптимизации

для различных режимов с помощью кодов PDP и BTR строятся карты полной нагрузки на всех поверхностях, определяются потери пучка и инжектируемая мощность. Строится «эволюция поперечного профиля» пучка, включая профили в сечении окна инжекции и плазме токамака. Подобные серии расчётов проводятся для различных режимов настройки пучка (в пределах номинальных), иногда исследуются также «неблагоприятные» и «критические» режимы (здесь не приводятся). Полученные результаты расчётов далее могут быть непосредственно использованы для инженерного проектирования инжекторов и их последующей интеграции в комплекс ДЕМО-ТИН. Далее приводятся основные результаты оптимизации геометрии на каждом шаге.

Выбор схемы инжектора. В общем случае на данном этапе учитываются:

- базовая структура пучка в виде массива бимлет, их фокусировка по горизонтали и вертикали;
- ограничения на длину тракта и размеры окна инжекции;
- исходное угловое распределение бимлет, наличие двух фракций;
- отклонение оси пучка от оси инжекции вследствие неточности настройки и действия магнитного поля.

В процессе выбора оптимальной геометрии сравниваются схемы с различным числом каналов. Для каждой из них рассчитывается максимальная мощность инжекции в плазму, оценивается влияние магнитного поля, назначается «номинальный» режим, т.е. совокупность ограничений на параметры пучка и величину магнитного поля.

На первом шаге определяется оптимальное расстояние горизонтальной фокусировки бимлет в группах для двухканальной геометрии инжектора. Расчёты показывают, что для этой схемы оптимально фокусировать бимлеты на расстоянии 12—13 м. Распределение проходящей мощности, эффективность преобразования и транспортировки пучка при различной горизонтальной фокусировке бимлет показаны на рис. 9.

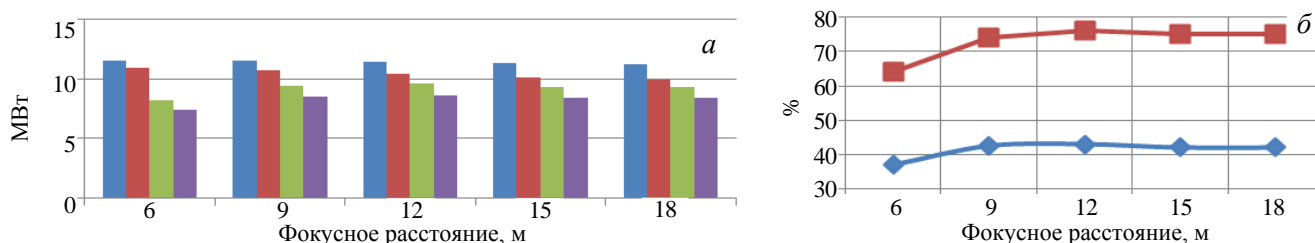


Рис. 9. Проходящая мощность, значения мощности пучка для выхода из нейтрализатора (■), из ПОИ (■), из атомопровода (■) с учётом потерь на реионизацию (■) (a) и эффективность преобразования P_{inj}/P_0 (◆) и транспортировки P_{inj}/P_N (■) пучка (б) при различной длине горизонтальной фокусировки бимлет внутри группы (два канала, идеальная фокусировка). На рис. 9 и далее P_{inj} — мощность нейтрального пучка, инжектированного в плазму, P_0 — мощность пучка, выходящего из ионного источника, P_N — мощность нейтрального пучка на выходе из нейтрализатора

Далее оценивается влияние на транспортировку угловой ширины пучка, размеров окна инжекции, отклонения пучка от оси инжекции, а также влияние магнитного поля на предельную эффективность транспортировки для обеих схем (два и четыре канала).

Угол расходимости и размеры окна инжекции. Определяем предельно допустимую угловую расходимость (угловую ширину) бимлет пучка для обеих схем. Мощность исходного пучка на выходе из

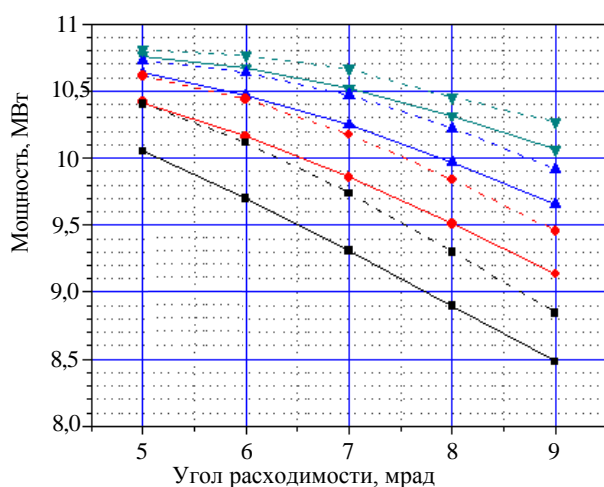


Рис. 10. Зависимость мощности нейтрального пучка, проходящего через выходное окно атомопровода ($X = 19,5$ м), от угла расходимости при различной ширине окна (0,35 (■), 0,4 (◆), 0,45 (▲), 0,5 (▼)); —, —, —, —, — 4-канальный вариант; ---, ---, ---, ---, --- 2-канальный

ИОС 20 МВт, угол расходимости варьируется при сохранении фракции гало (угол 30 мрад, доля 15%), идеальная настройка (ось пучка совпадает с осью инжекции), доля нейтралов в пучке 60%. Считаем, что нейтрализация ионов происходит сразу на выходе из источника, а далее атомарный пучок мощностью 12 МВт без потерь на промежуточных диафрагмах попадает на выходное сечение атомопровода (19,5 м от выхода ИОС). Фокусировка бимлет в группах по горизонтали: 6 м для четырёх каналов и 12 м для двух. Зависимость мощности пучка, прошедшего через выходное окно атомопровода, от угла расходимости пучка при различных значениях ширины окна (более чувствительно при фокусировке всех групп на центр окна) построена на рис. 10 (высота окна везде принята равной 1 м).

На рис. 10 видно, что 2-канальная схема выигрывает по проходящей через окно мощности, и это тем

заметнее, чем меньше ширина окна. При энергии пучка 10,5 МВт средний угол расходимости 5 мрад будет, скорее всего, недоступен, но угол 7 мрад уже выглядит приемлемым, необходимо добиваться его реализации, так как дальнейший его рост заметно снижает эффективность транспортировки пучка.

При выбранном угле расходимости пучка ± 7 мрад + гало и приведённых ранее остальных параметрах рассмотрено комбинированное влияние ширины и высоты окна (рис. 11). Видно, что 2-канальный вариант во всех случаях даёт выигрыш по мощности проходящего через окно пучка по сравнению с 4-канальным. Для определённого конструкторами размера окна в камере токамака 0,4×0,8 м максимальная мощность при идеальной настройке достигает 10,1 МВт, т.е. потери составляют около 16%, причём в основном за счёт гало (расчёт без гало даёт 5,5%).

Отклонение оси пучка от оси инжекции вследствие неточности настройки. Для принятого размера выходного окна 0,4×0,8 м рассчитано влияние угла отклонения от оси инжекции оси пучка по горизонтали и вертикали на величину проходящей через него мощности. Зависимость мощности нейтрального пучка, проходящего через выходное окно атомопровода, от угла горизонтального отклонения оси пучка при различных углах вертикального отклонения (мрад) представлена на рис. 12 (для пучка 7 мрад + гало). Видно, что 2-канальный вариант предпочтительнее и можно допускать углы отклонения оси пучка до 2 мрад по горизонтали и 4 мрад по вертикали: суммарно они дают снижение проходящей мощности на 0,25 МВт.

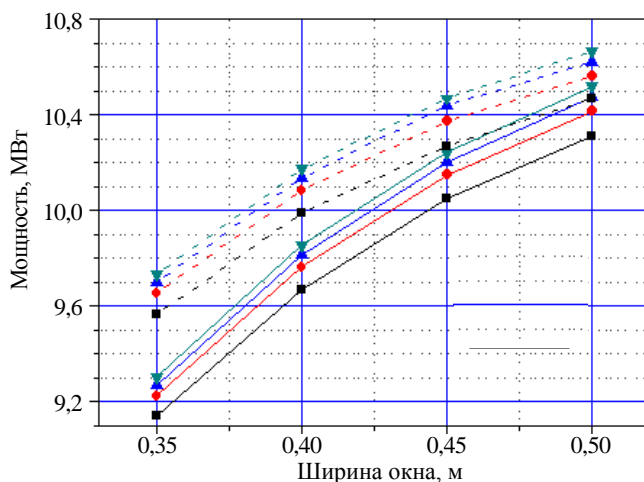
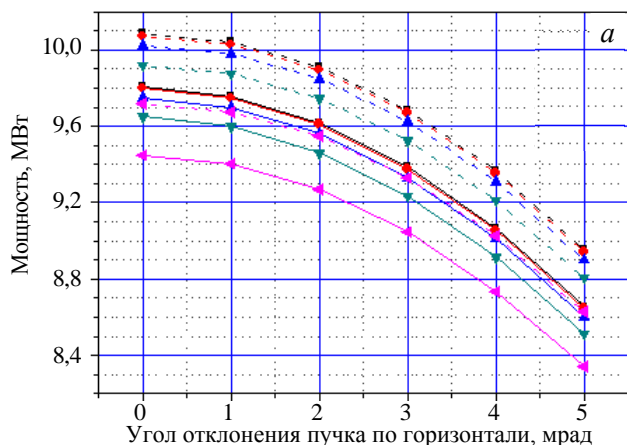


Рис. 11. Зависимость мощности нейтрального пучка, проходящего через выходное окно атомопровода, от ширины окна различной высоты: (0,7 (■), 0,8 (◆), 0,9 (▲), 1 м (▼): —, —, —, — — — — 4-канальный вариант; — — —, — — —, — — —, — — — — 2-канальный ($X = 19,5$ м)

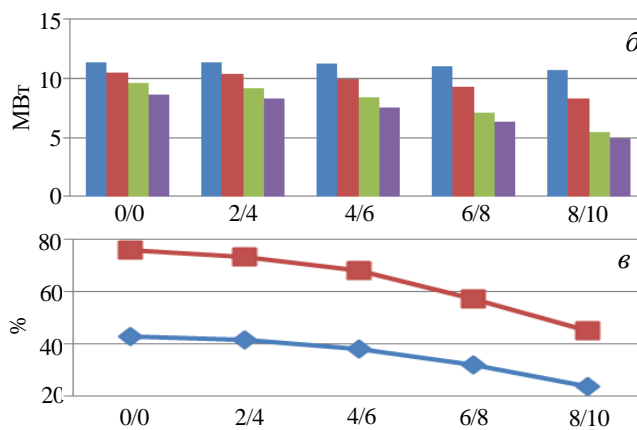


Рис. 12. Зависимость мощности нейтрального пучка, проходящего через выходное окно (0,4×0,8 м, $X = 19,5$ м) атомопровода, от угла горизонтального отклонения оси пучка при различных углах вертикального отклонения (пучок 7 мрад + гало): —, —, —, — — — — 4-канальный вариант, — — —, — — —, — — —, — — — — 2-канальный (0 (■), 2 (◆), 4 (▲), 6 (▼), 8 (◆)) (а); значения мощности пучка для выхода из нейтронизатора (■), из ПОИ (◆), из атомопровода (▲), с учётом потерь на реионизацию (▼) при различных угловых отклонениях пучка (по горизонтали/по вертикали, мрад) (б); эффективность преобразования P_{inj}/P_0 (◆) и транспортировки P_{inj}/P_N (■) пучка в различных режимах (с учётом реионизационных потерь) (в)

Магнитное поле в области нейтрализации. Как показано, основными источниками потерь мощности пучка при транспортировке являются угловая расходимость, или «ширина» бимлет, при заметном вкладе гало-составляющей (угловая ширина гало ~ 30 мрад), и невозможность точной настройки оптики бимлет относительно оси инжекции, вследствие чего отклонения пучка от идеальной фокусировки (от оси инжекции) по горизонтали и вертикали не равны нулю. Все эти факторы приводят к прямому пере-хвату части пучка компонентами пучкового тракта. Помимо этого, даже слабое магнитное поле, т.е. рассеянное поле токамака после экранировки, на участке от источника до входа в ПОИ (на длине $\sim 4,5$ м)

увеличивает угловой разброс пучка вследствие различного отклонения индивидуальных траекторий ионов до момента их нейтрализации.

Для прохождения пучка в узких вертикальных каналах наиболее критичным является отклонение траекторий частиц в горизонтальной плоскости, поэтому рассматривается влияние вертикального компонента магнитного поля (B_z), действующего на участке нейтрализации, на общую эффективность транспортировки. На рис. 13, а показана диаграмма мощности нейтрального пучка в различных сечениях (на выходе отдельных компонентов). На рис. 13, б показаны зависимости геометрической эффективности (КПД транспортировки P_{inj}/P_N , %) и общего КПД инжектора по мощности (КПД преобразования пучка P_{inj}/P_0 , %) от величины вертикальной составляющей «остаточного» (после экранирования) магнитного поля B_z . Исходный пучок настроен идеально точно, т.е. его ось совпадает с осью инжекции. При настройке пучка в пределах номинальных отклонений максимально допустимое значение для вертикального компонента магнитного поля B_z составило 1 Гс. Эквивалентное среднее отклонение пучка ионов (500 кэВ) для этого значения ~ 2 мрад (при этом КПД геометрии 73%, КПД по мощности 42%).

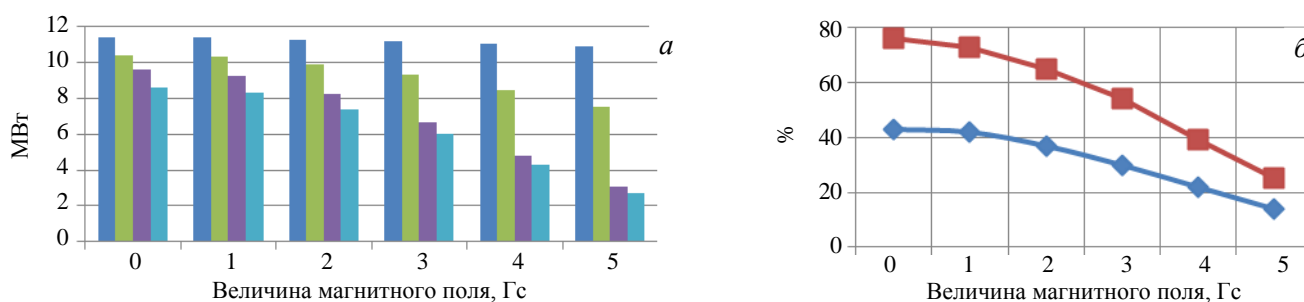


Рис. 13. Изменение нейтральной мощности вдоль тракта инжектора: выход из нейтрализатора (■), из ПОИ (■), из атомопровода (■), с учётом 10% потерь на реионизацию (■) (а) и эффективность преобразования P_{inj}/P_0 (◆) и транспортировки P_{inj}/P_N (■) пучка в различных режимах (с учётом реионизационных потерь) (б) в зависимости от величины вертикального магнитного поля (на участке от ионного источника до ПОИ). Идеальная фокусировка, два канала

Настройка компонентов инжектора. После выбора оптимальной схемы каналов и назначения номинального режима (ширина бимлет 7 мрад, отклонения 2/4 мрад, магнитное поле $B_z = 1$ Гс) необходима «тонкая настройка» отдельных компонентов инжектора. При этом задаются начальные размеры зазоров между отдельными компонентами и точная геометрия компонентов, для них корректируются параметры массива бимлет (расстояния между осями, наклоны), ширины каналов, толщина панелей. После этого выполняются серии детальных расчётов тепловых нагрузок на торцевых и боковых поверхностях при варьировании формы, размеров и углов наклона отдельных элементов, в результате выбираются оптимальная геометрия и положение каждого из компонентов, строятся максимальные прямые нагрузки для них.

Рассмотрим далее процедуру «тонкой настройки» отдельных компонентов для выбранной на первом шаге оптимизации 2-канальной схемы инжектора.

Настройка панелей нейтрализатора и ПОИ. На выходе из источника (заземлённом электродесетке) расстояние по горизонтали между осями групп 280 мм (± 140 мм), как на рис. 2. Высота каналов нейтрализатора выбрана 1,7 м, при этом нагрузки от пучка на верхние и нижние стенки каналов невелики. Основные потери пучка происходят на торцах и на боковых стенках панелей, образующих каналы нейтрализатора. Выбор толщины панелей и, следовательно, ширины входного и выходного окон обоих каналов осуществляется при анализе плотности мощности (Power Density, PD) перехвата на передних торцах и на стенках панелей и полных потерь пучка в каналах. При этом панели нейтрализатора должны максимально экранировать передние торцы панелей ПОИ, расположенного за нейтрализатором. Толщина панелей ПОИ выбирается минимальной с точки зрения размещения каналов водяного охлаждения (20 мм).

Торцевые нагрузки на панели нейтрализатора и ПОИ. Полагаем, что пучок имеет ширину 7 мрад и гало, на входе в нейтрализатор мощность пучка 20° . Максимально нагружены торцевые элементы центральной панели, принимающие на себя нагрузку от двух соседних каналов. Профили

PD пучка на фронте торца центральной панели нейтрализатора показаны на рис. 14 для различных углов горизонтального отклонения оси пучка. Как видно на рисунке, в центре торцевого сечения нагрузка составляет $\sim 1,2$ МВт/м² и практически не зависит от угла отклонения оси пучка, но быстро нарастает с удалением от центра. При таких уровнях нагрузки перед торцами панелей должны быть установлены торцевые элементы (ТЭ), имеющие интенсивное охлаждение и способные воспринимать нагрузки несколько МВт/м². Для снижения PD на краях ТЭ его сечение может быть сделано в виде трапеции или полуцилиндра.

Исходя из профилей мощности (см. рис. 14), ширина ТЭ нейтрализатора может быть выбрана равной 43 мм, при этом ширина входных окон каналов нейтрализатора будет по 215 мм (расстояние между осями каналов на входе в нейтрализатор при $X = 1,5$ м равно 258 мм). При идеальной фокусировке мощность на ТЭ, защищающем центральную панель нейтрализатора, составит 82,75 кВт, а при отклонении оси пучка на 2 мрад (влево) она возрастает до 83,6 кВт.

На торцы панелей ПОИ ($X = 4,5$ м) попадают «крылья» пучков ионов и атомов, прошедших через каналы нейтрализатора. При этом панели нейтрализатора на выходе ($X = 4$ м) должны иметь такую толщину, чтобы экранировать торцы панелей ПОИ для снижения величины максимальной PD. Наиболее нагруженным является торец центральной панели ПОИ. Профили PD на торце центральной панели ПОИ показаны на рис. 15. Вполне приемлемым выглядит вариант с толщиной панелей нейтрализатора на выходе 35 мм, при этом ширина окон каналов на выходе нейтрализатора составит 185 мм. Полная мощность на центральный торец ПОИ составит 80 кВт при горизонтальном отклонении оси пучка на 2 мрад. Для снижения PD на краях ТЭ ПОИ в несколько раз его сечение также может быть сделано в виде трапеции или полуцилиндра. Ширина каждого канала на входе в ПОИ составит 194 мм, а на выходе ($X = 6,2$ м) 169 мм.

Боковые стенки каналов нейтрализатора.

При выбранной ширине входных окон нейтрализатора 215 мм тепловая нагрузка на боковые стенки зависит от ширины выходных окон. На рис. 16 показаны продольные профили плотности мощности на левой стенке канала нейтрализатора при различной ширине w_2 выходного окна и углах горизонтального отклонения оси пучка от оси ин-

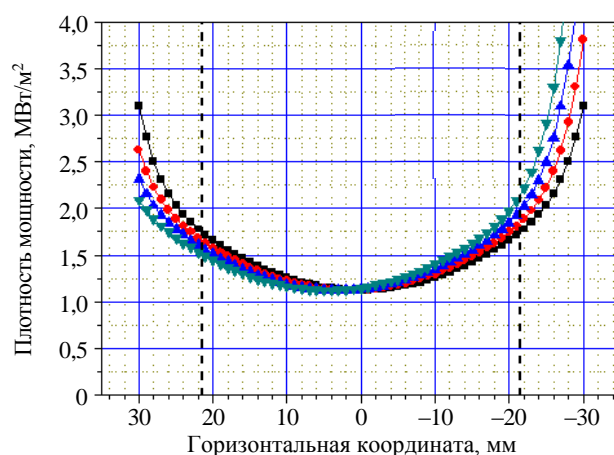


Рис. 14. Горизонтальные профили мощности пучка на торцевом элементе центральной панели нейтрализатора при различных углах отклонения оси пучка влево (ось Y направлена справа налево, вид со стороны источника): - - - края ТЭ при ширине 43 мм; угол, мрад: 0 (■), 1 (●), 2 (▲), 3 (▼)

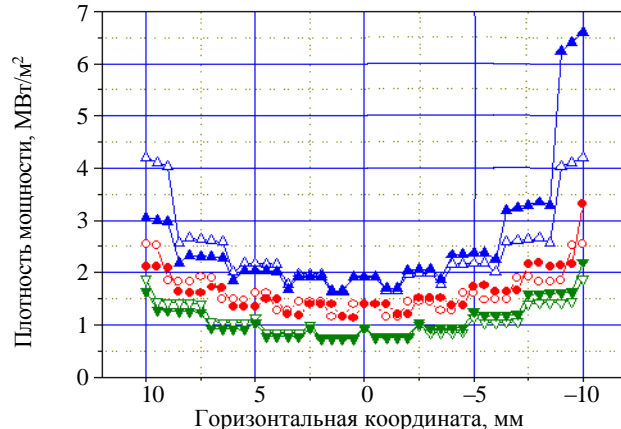


Рис. 15. Горизонтальные профили мощности пучка на торцевом элементе центральной панели ПОИ толщиной 20 мм для разных толщин (t_2), панелей нейтрализатора на его выходе и при различных углах отклонения оси пучка влево (ось Y направлена справа налево, вид со стороны источника): t_2 , мм/угол, мрад: 30/0 (▲), 30/2 (■), 40/0 (▼), 40/2 (■), 35/0 (○), 35/2 (●)

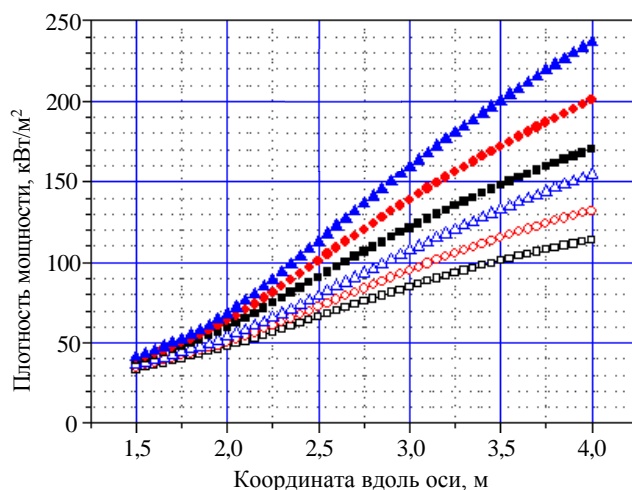


Рис. 16. Профили плотности мощности вдоль оси нейтрализатора на левой стенке канала для различной ширины выходного окна w_2 в случае идеальной настройки оси пучка (w_2 , мм — 190 (□), 185 (◇), 180 (△)) и при угле горизонтального отклонения (влево, вид со стороны источника) от оси инжектора 2 мрад (■, ◆, ▲), пучок 7 мрад + гало

жектора 0 и 2 мрад (влево) для пучка с расходимостью 7 мрад + гало. Н рис. 16 видно, что в варианте с $w_2 = 185$ мм (толщина пластины нейтрализатора на выходе 35 мм) при отклонении оси пучка на 2 мрад максимальная PD составляет 200 кВт/м^2 , что вполне приемлемо.

В варианте с шириной выходного окна в каналах нейтрализатора 185 мм с учётом потерь пучка в нейтрализаторе (1,25 МВт) и ПОИ (0,69 МВт) при углах отклонения оси пучка 2/4 мрад (а далее без потерь при транспортировке до выходного окна атомопровода $0,4 \times 0,8$ м) максимальная инжектируемая мощность составит 9,44 МВт.

Ионные нагрузки в ПОИ. Длина панелей ПОИ и отклоняющее напряжение подбираются так, чтобы обеспечить максимально полный перехват ионных компонентов пучка на выходе из нейтрализатора с учётом ограничений на максимальную плотность мощности и полную нагрузку на панели при минимальной толщине панелей 20 мм, позволяющей разместить каналы водяного охлаждения. Расчёты показали, что в 2-канальной схеме ПОИ с длиной приёмной панели 1,7 м для эффективного перехвата ионов энергией 500 кэВ требуется напряжение 30—35 кВ. При этом внутренняя панель ПОИ находится под потенциалом -30 кВ , две внешние панели заземлены. Расчёты проводятся при варьировании отклонений пучка и величины вертикального магнитного поля в области нейтрализации (от 0 до 4 Гс). На рис. 17 показаны распределение потенциала вдоль оси канала ПОИ, рассчитанное без учёта влияния объёмного заряда пучка, и траектории ионов в электростатическом поле канала (№ 2) ПОИ при идеальной фокусировке пучка относительно оси инжекции и без его магнитного отклонения в нейтрализаторе: D^+ отклоняются направо, D^- — налево (в нижнем канале № 1 D^+ отклоняются налево, D^- — направо).

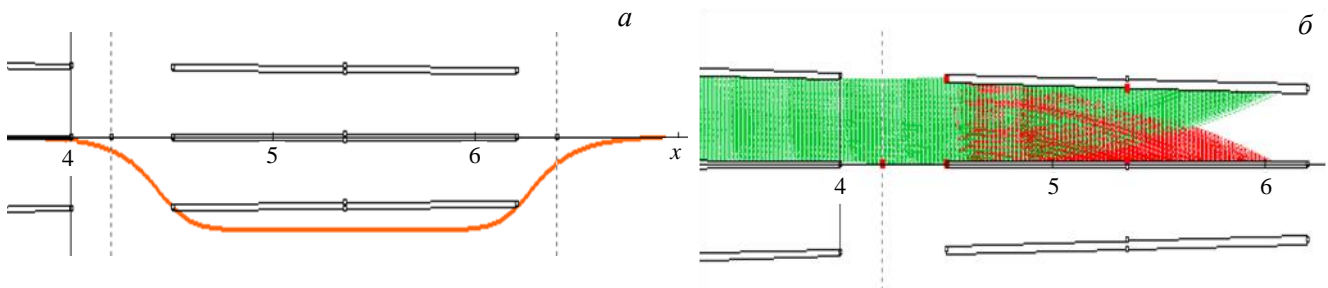


Рис. 17. Профиль потенциала вдоль оси канала (а) и траектории ионов (б) в канале № 2 ПОИ при отклоняющем напряжении 30 кВ: D^+ (■), D^- (■)

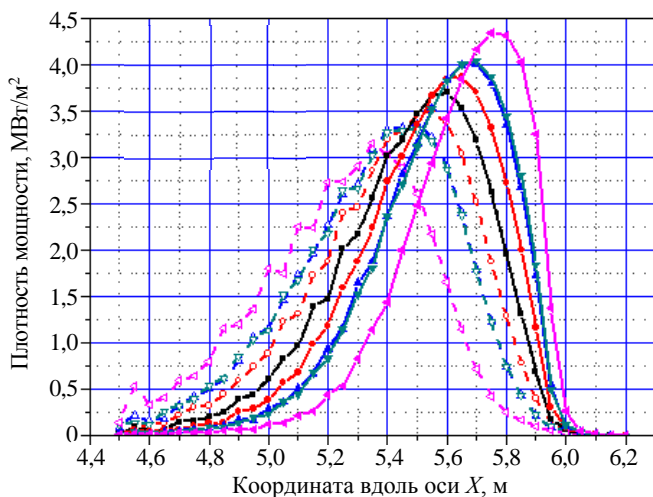


Рис. 18. Горизонтальные профили ионной нагрузки на левой и правой панелях ПОИ (канал № 2). Влияние суммарного горизонтального отклонения пучка (вследствие неточности фокусировки и магнитного отклонения): — — —, — — —, — — —, — — — — нагрузка на левой панели; —, —, —, — — — на правой; 0 мрад/0 Гс (□); 2/0 (○); 2/1 (▽); 4/0 (△); 4/2 (▷)

При идеальной фокусировке и без магнитного отклонения пучка в нейтрализаторе профили ионной нагрузки на панелях симметричны, а при равных фракциях ионов в пучке (по 20%) полностью совпадают. Карта и профили нагрузки на внутренней панели ПОИ для этого режима показаны на рис. 6 (справа). Для выбранного напряжения (30 кВ) максимальная плотность мощности составляет $3,7 \text{ МВт/м}^2$ и максимум расположен на расстоянии 1,1 м от начала панели (т.е. 5,6 м от ЗЭ).

При отклонении оси пучка по горизонтали положение пика нагрузки на разных сторонах канала смещается в противоположные стороны (рис. 18), причём отклонение пучка отрицательных ионов в нейтрализаторе в результате действия вертикального компонента магнитного поля может складываться или вычитаться с исходным отклонением пучка по горизонтали. На рис. 18 направление вертикального магнитного поля выбрано таким, чтобы результирующее отклонение пучка в канале было максимальным, т.е. действие

магнитного поля складывалось с исходной неточностью настройки оси. В случае ненулевого исходного отклонения пучка нагрузка на внутренней панели ПОИ несимметрична, расстояние между пиками по обеим сторонам в номинальном режиме порядка 20 см, что может привести к S-образной деформации (напряжению) панели. А в двух крайних панелях ассиметрия нагрузки вызывает деформацию изгиба, которая, в свою очередь, может повысить потери нейтрального пучка ПОИ за счёт прямого перехвата.

В табл. 2 приведены ионные нагрузки на панелях в ПОИ (30 кВ, канал № 2) для различных режимов отклонения пучка от оси инжекции. Вертикальное отклонение пучка $\sim \pm 4$ мрад сдвигает профиль на 2 см вверх или вниз, что не сказывается на работе ПОИ. Полная нагрузка (тепловая мощность) на внутреннюю панель вдвое выше, чем на внешние, поскольку она принимает ионы D^+ из двух соседних каналов.

Таблица 2. Ионные нагрузки на панелях ПОИ при напряжении 30 кВ

Режим	Полная нагрузка D^+ , МВт	Пиковая плотность D^+ , МВт/м ²	Полная нагрузка D^- , МВт	Пиковая плотность D^- , МВт/м ²
Без отклонения	3,7	4,0	1,86	3,7
Отклонение 2/4 мрад, магнитное поле $B_z = 1$ Гс	3,6	4,3	1,825	3,33

Нагрузки в калориметре. Форма приёмника пучка в закрытом состоянии выбирается исходя из величины максимума плотности мощности пучка во время его полного перехвата при наладке и диагностике инжектора. Приёмные панели ставятся под углом к оси, так что наклон поверхности снижает нормальную нагрузку до требуемого уровня.

Две панели, симметрично расположенные под углом к оси пучка, сокращают длину калориметра вдвое. Калориметр для ДЕМО-ТИН имеет также V-образную форму, угол наклона каждой панели относительно оси инжектора 10° , при этом длина панели для приёма пучка 1,5 м. Вход расположен на $X = 6,6$ м и $Y = \pm 0,25$ м, выход — на $X = 8,1$ м, высота панелей 1,6 м. Максимальная нагрузка PD в калориметре 11,2 МВт/м².

Нагрузки на скрепер и выбор размеров его входного и выходного окна. На выходе из камеры инжектора располагается диафрагма «скрепер», имеющий форму четырёхугольной усечённой пирамиды. Он служит для перехвата «хвостов» на периферии пучка, которые не проходят в выходное окно инжекции и нагружают атомопровод. От реионизованных частиц скрепер не защищает, для этого в атомопроводе предусмотрен охлаждаемый лайнер. Далее мы рассчитываем размеры входного и выходного окон скрепера, обеспечивающих наилучшие показатели транспортировки и перехвата нежелательной мощности.

Для определения мощности, перехватываемой скрепером, сначала строится карта распределения мощности пучка на расстоянии от источника 8,5 м, что соответствует положению скрепера, для различных режимов. Далее подробно анализируются профили плотности мощности на краях нейтрального пучка при различных углах его горизонтального (влево) и вертикального (вверх) отклонения от оси инжектора, выбирается размер входного окна.

На рис. 19 видно, что по горизонтали за координатой 227 мм происходит полная экранировка пучка выходным окном ПОИ. Выберем размер окна в торцевой панели скрепера $0,44 \times 1,4$ м. При этом максимальная плотность мощности на краях окна не превысит 250 кВт/м², полная нагрузка на панель разме-

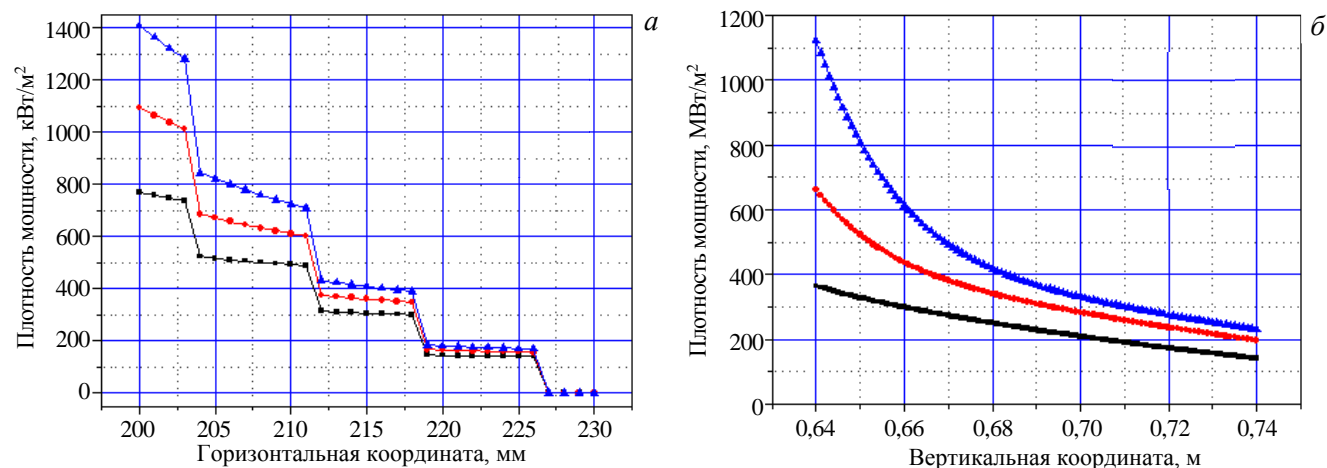


Рис. 19. Детализация профилей плотности мощности на краях нейтрального пучка во входном сечении скрепера ($X = 8,5$ м) при различных углах его горизонтального (влево) и вертикального (вверх) отклонения от оси инжектора: а — горизонтальный профиль, горизонтальный угол, мрад — 0 (■), 2 (●), 3 (▲); б — вертикальный профиль, вертикальный угол, мрад — 0 (■), 4 (●), 6 (▲)

ром $0,6 \times 1,7$ м составит 17 кВт. Далее при выбранном размере входного окна построим профили нагрузки на внутренние стенки скрепера (рис. 20). С учётом ограничения на предельную плотность мощности $0,5 \text{ МВт/м}^2$ выбираем размер выходного окна $0,36 \times 1$ м при $X = 9,0$ м, при этом максимальная PD на стенках не превысит $0,5 \text{ МВт/м}^2$.

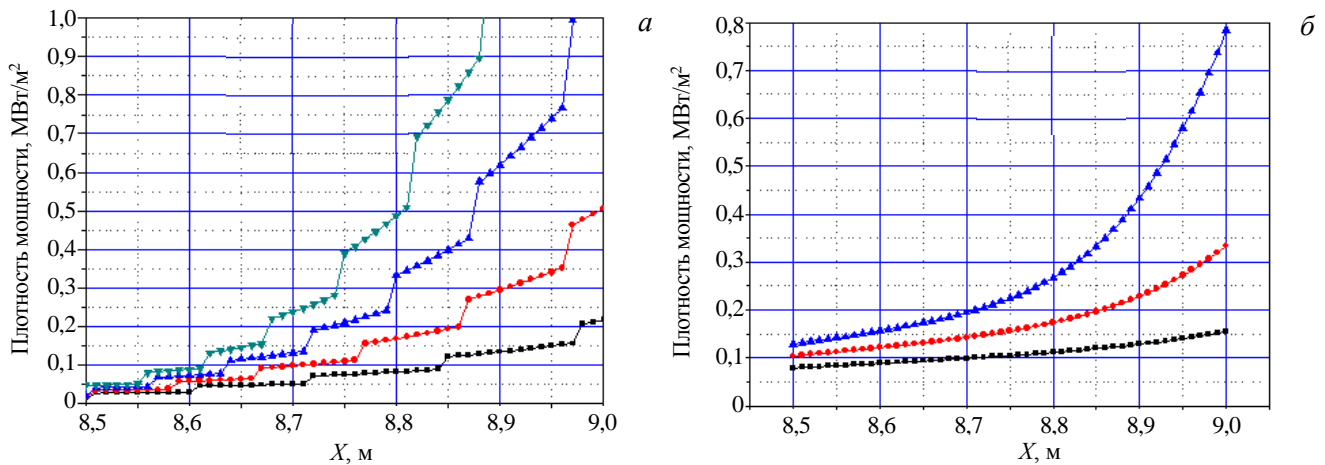


Рис. 20. Распределение нагрузки на левой стенке скрепера (угол горизонтального отклонения 2 мрад) при ширине выходного окна 380 (■), 360 (●), 340 (▲), 320 мм (▼) и его неограниченной высоте (а), на верхней стенке скрепера (угол вертикального отклонения 4 мрад) при высоте выходного окна 1,1 (■), 1 (●), 0,9 м (▲) (б)

Для выбранных размеров скрепера в табл. 3 приведены полная мощность энерговыделения в скрепере, атомопроводе (с выходным окном $0,4 \times 0,8$ м) и инжектируемая мощность (для идеальной настройки пучка и при отклонении его оси на $2/4$ мрад). Расположенные за скрепером вакуумный затвор и быстродействующая заслонка пока не рассматриваются, их окна должны быть заведомо больше выходного окна скрепера.

Т а б л и ц а 3. Полная мощность энерговыделения в скрепере ($W_{\text{скр}}$), в атомопроводе ($W_{\text{ат}}$) и инжектируемая мощность ($W_{\text{инж}}$) для идеальной настройки пучка и при отклонении его оси на $2/4$ мрад

Угол отклонения оси пучка, мрад	$W_{\text{скр}}$, МВт	$W_{\text{ат}}$, МВт	$W_{\text{инж}}$, МВт
0/0	0,325	0,76	9,56
2/4	0,41	0,915	9,21

Лайнер атомопровода. Водоохлаждаемый лайнер, расположенный после быстрой заслонки, служит для защиты стенок атомопровода от потоков реионизованных частиц. Входное окно лайнера расположено на расстоянии 10,45 м от источника ионов. Оно также должно быть в тени скрепера, как отмечалось ранее. Расчёты показывают, что при размере входного окна лайнера $0,4 \times 1,2$ м оно оказывается полностью экранированным в пределах отклонений оси пучка $2/4$ мрад. Рассчитанная предельная нагрузка PD на панелях лайнера не превышает $0,4 \text{ МВт/м}^2$, что вполне приемлемо.

Расчёты потерь и нагрузок в инжекторе в результате реионизации пучка. Для расчётов потерь нейтральных частиц и распределения потоков реионизованных частиц используется профиль распределения плотности газа в пучковом тракте. Модельный профиль газа для инжектора ДЕМО-ТИН получен на базе доступной статистики профилей для нагревного инжектора ИТЭР [3, 15] с помощью аппроксимации и масштабирования и с учётом оптимальной толщины мишени в нейтрализаторе $NL = 0,8 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-2}$. Для расчётов реионизации нас интересует только область пучкового тракта от выхода из нейтрализатора до порта инжекции в токамак. Профиль плотности газа для этого промежутка показан на рис. 21. При

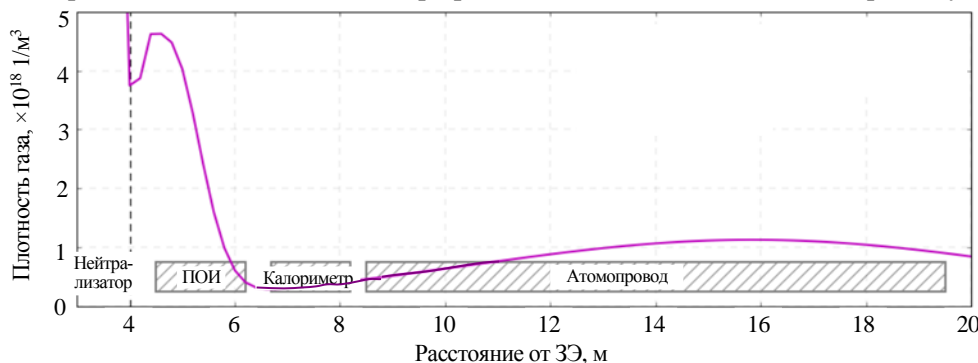


Рис. 21. Профиль плотности газа для инжектора ТИН (синтезирован на базе данных по СНИ ИТЭР)

энергии 500 кэВ (сечение ионизации $6 \cdot 10^{-21} \text{ м}^2$) доля ионизованных атомов пучка на модельном распределении газа составит $\sim 10\%$. Из них довольно заметная часть (почти 30%) перехватывается в ПОИ, примерно 10% — в калориметре и на скрепере и наибольшая часть — в атомопроводе ($\sim 60\%$)

Траектории ионов и распределение соответствующих тепловых нагрузок определяются конфигурацией магнитного поля в области реионизации пучка. Модельные профили компонентов магнитного поля, построенные на базе профилей ИТЭР [3], вдоль оси инжектора показаны на рис. 22. Первые предварительные результаты моделирования магнитных полей от установки ДЕМО-ТИН подтверждают обоснованность применения ИТЭР-подобных масштабированных полей для расчётов реионизационных нагрузок в ДЕМО-ТИН. На рис. 22 также показаны траектории реионизованных частиц, рассчитанные в модельном магнитном поле ДЕМО-ТИН.

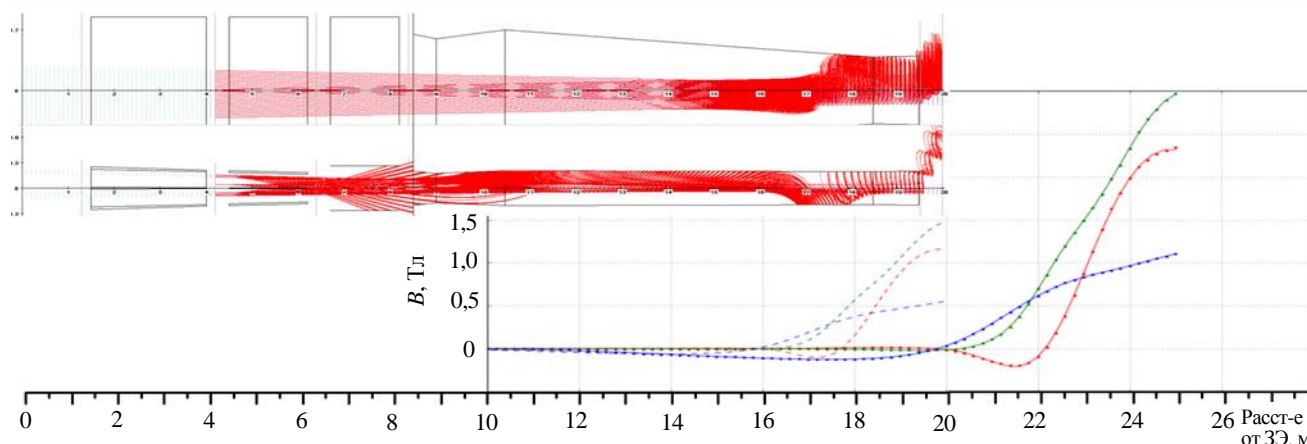


Рис. 22. Профили магнитного поля для ТИН, построенные по модели HNB ITER—СИМАТ масштабированием по длине ($k_l = 0,8$) и по высоте ($k_a = 0,5$): —, —, — компоненты исходного поля (ИТЭР); —, —, — модель поля для ДЕМО-ТИН; B_x — B_y — B_z — Сверху показаны траектории реионизованных частиц в магнитном поле

Расчёты реионизованных нагрузок показали, что для заданного (типичного) распределения магнитного поля нагрузки на лайнер существенно неравномерны, пиковая нагрузка $1,2 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2$ приходится на правую стенку, однако суммарная нагрузка на левую стенку вдвое выше, чем на правую. Неравномерность и фокусировка потоков реионизованных частиц в магнитных полях представляют собой наибольшую опасность с точки зрения теплоотвода.

Эволюция пучка и распределение потерь и нагрузок. Рис. 23 иллюстрирует изменение двумерного профиля пучка в инжекторе для 2-канальной схемы — от источника до окна инжекции. На рисунке отчёт-

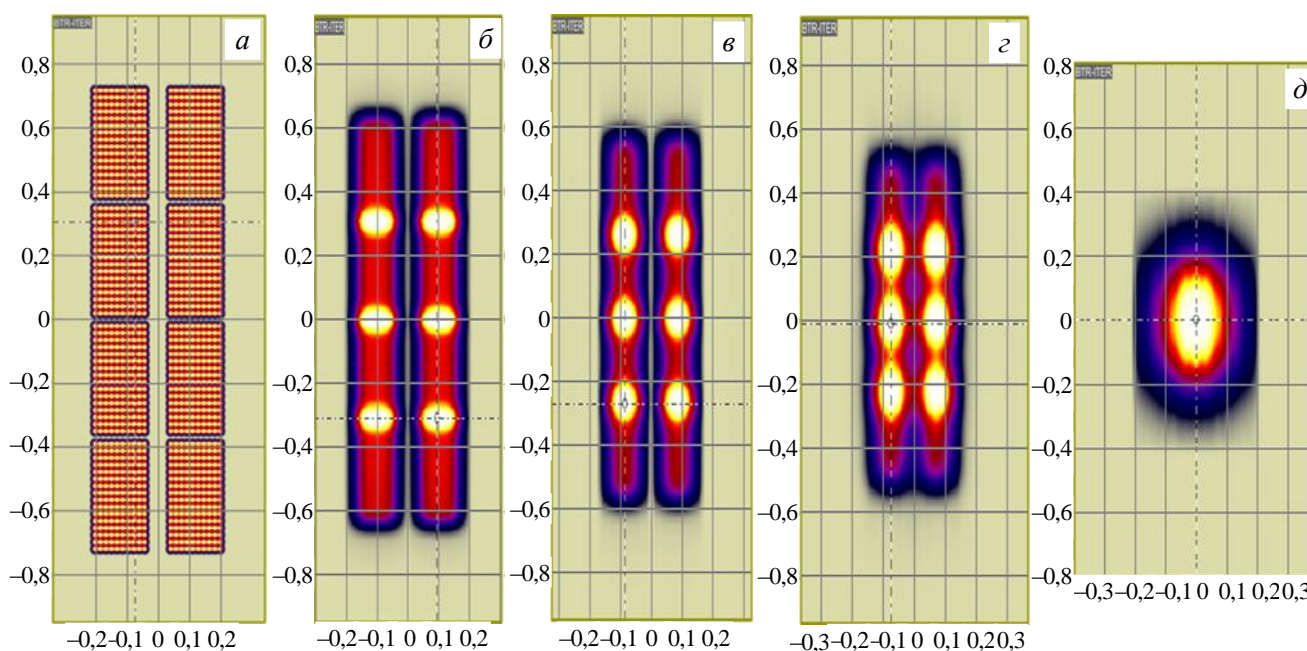


Рис. 23. Поперечные профили пучка в сечениях: а — выход из источника ионов, $P = 20 \text{ МВт}$ (вход в нейтрализатор); б — выход из нейтрализатора, $P = 11,4 \text{ МВт}$; в — выход из ПОИ, $P = 10,44 \text{ МВт}$; г — вход в атомопровод, $P = 10,44 \text{ МВт}$; д — окно инжекции, $P = 9,6 \text{ МВт}$ (выход из атомопровода). Без магнитного поля ($B = 0$), идеальная фокусировка пучка вдоль оси инжекции

ливо видна исходная структура пучка в виде двух вертикальных колонн, а также прослеживается наложение четырёх горизонтальных групп вследствие фокусировки осей в центре выходного окна: наиболее светлые области соответствуют максимуму плотности мощности.

В табл. 4 приводятся данные по распределению нагрузок и потерь мощности на компонентах в 2-канальном варианте инжектора и динамика поперечной мощности пучка. Рис. 24 иллюстрирует распределение нагрузок вдоль компонентов инжектора. Данный рисунок наглядно показывает распределение выделяющейся мощности на поверхностях (цветовая шкала нагрузки не является общей для различных карт, так как каждая карта построена относительно локального максимума).

Таблица 4. Изменение мощности пучка вдоль тракта инжекции и распределение нагрузок и пиковых плотностей мощности на его компонентах в двухканальном варианте инжектора. Мощность пучка на выходе из ионного источника 20 МВт, эффективность нейтрализации 0,6. Пучок 7 мрад + гало

Параметр	Без отклонения (0/0)	Отклонение оси пучка: 2 мрад — по горизонтали, 4 мрад — по вертикали
Мощность нагрузки от пучка в нейтрализаторе, МВт	1,18	1,25
Пиковая плотность мощности на торцевых элементах нейтрализатора, МВт/м ²	1,4	1,9
Пиковая плотность мощности на стенке канала нейтрализатора, МВт/м ²	0,16	0,21
Мощность нейтрального пучка на выходе из нейтрализатора, МВт	11,29	11,25
Мощность потерь нейтрального пучка в ПОИ, МВт	0,63	0,69
Полная мощность, выделяющаяся в ПОИ (атомы + ионы), МВт	8,16	8,19
Пиковая плотность мощности на торце панели ПОИ, МВт/м ²	2,6	3,30
Пиковая плотность мощности на панели ПОИ, МВт/м ² (BTR-код)	3,7	4,0
Мощность нейтрального пучка на выходе из ПОИ, МВт	10,67	10,56
Пиковая плотность мощности на панели калориметра, МВт/м ²	11,25	11,25
Мощность пучка, перехватываемого скрепером, МВт	0,34	0,43
Пиковая плотность мощности на стенке скрепера, МВт/м ²	0,27	0,50
Мощность нагрузки от пучка на стенках лайнера атомопровода, МВт	0,77	0,92
Пиковая плотность мощности на боковой стенке лайнера, МВт/м ²	0,21	0,37
Пиковая плотность мощности на верхней стенке лайнера, МВт/м ²	0,09	0,33
Мощность нейтрального пучка, вводимая в плазму:		
без учёта потерь на реионизацию, МВт	9,56	9,2
с учётом потерь 10% на реионизацию, МВт	8,6	8,28

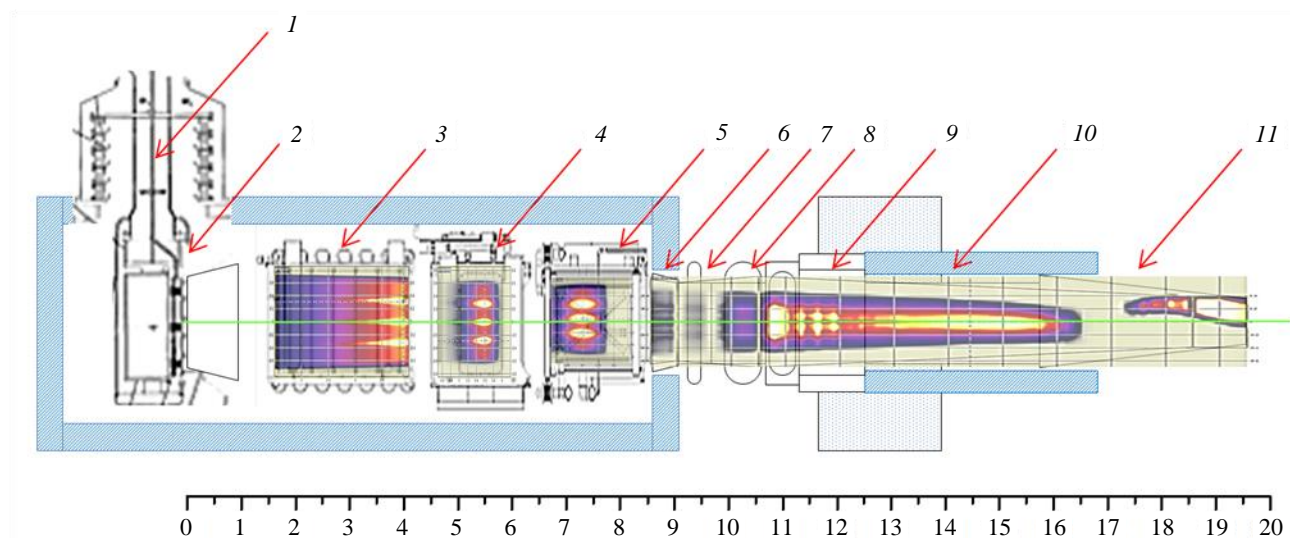


Рис. 24. Иллюстрация распределения нагрузок вдоль инжектора (в разных масштабах величин): 1 — высоковольтный ввод источника ионов; 2 — ускоритель отрицательных ионов; 3 — нейтрализатор; 4 — приёмник ионов; 5 — приёмник атомов; 6 — скрепер; 7 — быстрая заслонка; 8 — шиббер; 9 — сильфонный узел; 10 — атомопровод; 11 — лайнер атомопровода

На рис. 25 показаны диаграммы распределения нагрузок и потерь пучка на компонентах инжектора для различных сценариев работы и геометрии (два и четыре канала). Видно, что мощность пучка, вводимого в плазму, для 2-канального варианта выше, чем для 4-канального, кроме случаев с большими

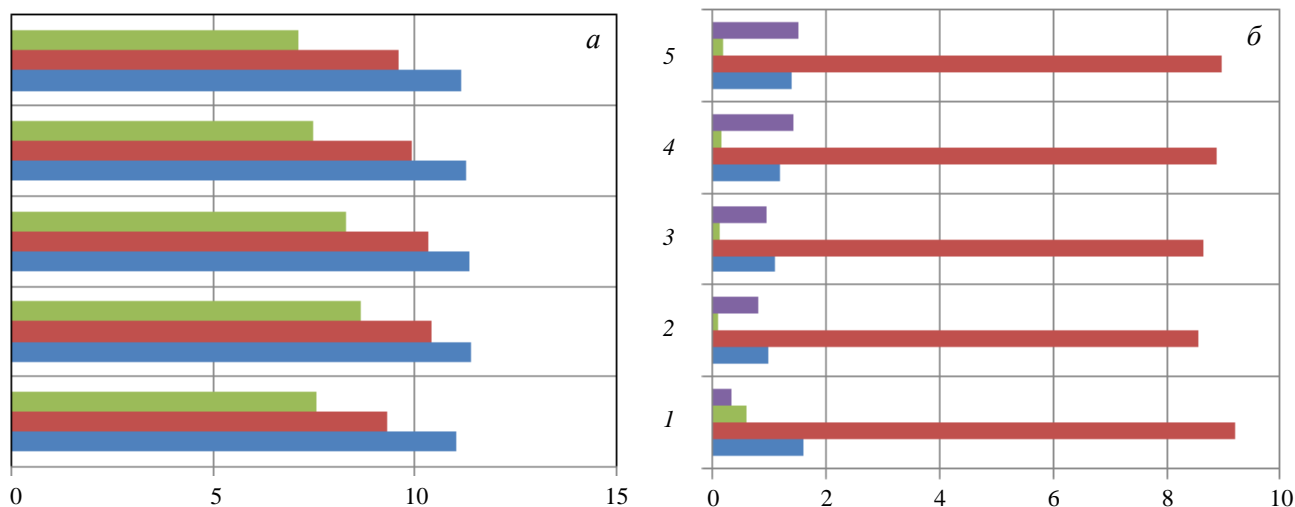


Рис. 25. Изменение мощности (МВт) нейтрального пучка: ■ — на выходе из нейтрализатора; ■ — на выходе из ПОИ; ■ — вводимая в плазму (с учётом потерь 10% на реионизацию) (а); распределение нагрузок (МВт/м²) на компоненты инжектора: ■ — в нейтрализаторе; ■ — в ПОИ (атомы + ионы); ■ — перехватываемая скрепером; ■ — на стенках лайнера атомопровода (б); 5 — два канала, 5/4 мрад; 4 — два канала, 2/4 мрад + магнитное поле $B_z = 1$ Гс; 3 — два канала, 2/4 мрад; 2 — два канала, нет отклонения; 1 — четыре канала, нет отклонения

отклонениями оси пучка и при наличии магнитного поля (1 Гс). Максимальные нагрузки от пучка приходятся на ПОИ, что обосновывает повышенное внимание к расчёту и оптимизации этого элемента. За счёт отличия в фокусировке групп бимлет для 2- и 4-канального вариантов нагрузка в нейтрализаторе, ПОИ и скрепере ниже для 2-канальной геометрии, однако нагрузки в лайнере выше даже для идеального режима. Такие меры оправданы, поскольку плотности мощности в лайнере ниже, чем на компонентах инжектора, и, следовательно, теплоотвод осуществить будет проще.

Торможение и захват в плазме, сквозные потери, нагрузка на первую стенку камеры токамака.

Код BTR позволяет рассчитать ослабление («захват») пучка в плазме токамака, расчётная схема инжектора с токамаком показана на рис. 26. Так как при моделировании пучка код BTR детально воспроизводит геометрию составляющих бимлет и их угловое распределение, это позволяет вычислять с высокой точностью распределение точек ионизации атомов в плазме и строить соответствующие профили захвата атомов.

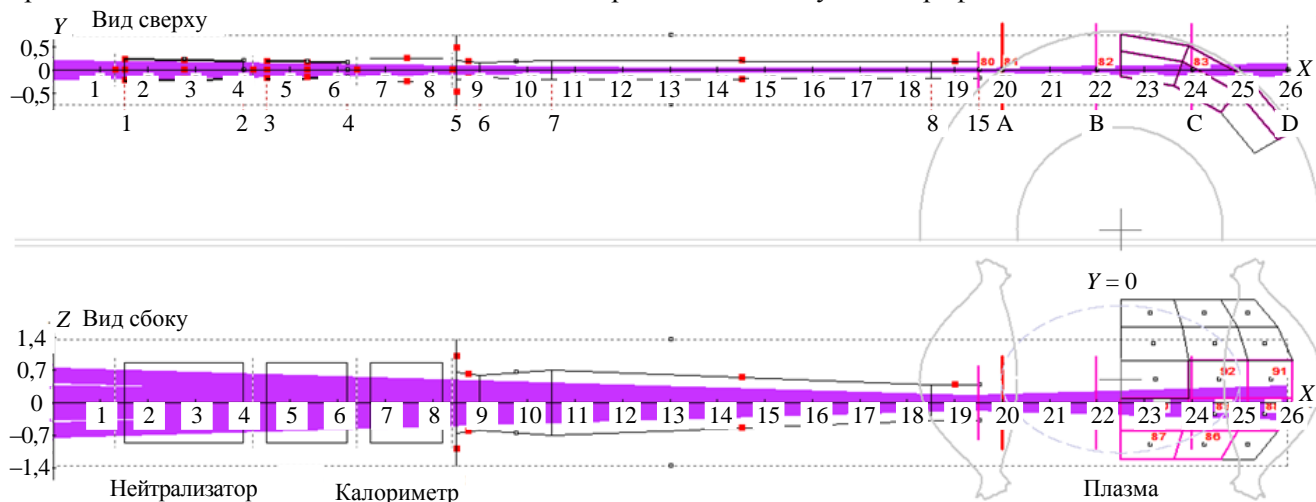


Рис. 26. Геометрия пучка и тангенциальная инжекция в плазму ДЕМО-ТИН

При расчёте точки ионизации вдоль траектории нейтральной частицы, попавшей в плазму, вероятность ионизоваться на заданном отрезке определяется с учётом локальной плотности плазмы и суммарного сечения захвата (ионизации) частиц пучка σ_s . При высокой энергии инжекции

>100 кэВ/нуклон для суммарного сечения ионизации за счёт взаимодействия с электронами, ионами и примесями плазмы используются аппроксимационные формулы (23)—(26) работы [13], в которых учтён вклад многоступенчатой ионизации. Аналитические формулы для сечений захвата σ_s представляют в виде зависимостей от энергии пучка, электронной плотности, электронной температуры и эффективного заряда ионов плазмы. Для расчёта сечения захвата в плазме с примесями применяется аддитивный метод взвешенных сумм по однопримесным плазмам. При этом для чисто водородной плазмы используется улучшенная формула для сечения σ_H , позднее предложенная Suzuki [14].

Для расчёта сечения захвата σ_s в каждой точке ионизации вычисляются локальные значения n_e и T_e .

Для учёта примесей нужно знать вес каждого компонента $\frac{n_i Z_i}{n_e}$ или профиль $Z_{эф}$ (для плазмы с одной примесью). Профили концентрации, температуры и эффективного заряда плазмы задаются в координатах полоидального магнитного потока $\psi(R, Z)$. Для преобразования одномерных профилей плазмы в 3-мерные пространственные распределения и расчёта сечений торможения пучка в плазме код BTR дополнен специальным модулем. Он осуществляет проекцию исходных плазменных профилей, заданных как функции параметра ψ , в объёмные координаты (X, Y, Z) , вычисляет сечения по модели Janev—Suzuki, рассчитывает интегральный профиль торможения пучка от всех составляющих бимлет. Кроме того, для сравнения результатов с другими инжекционными кодами (NUBEAM, ASTRA) профиль захвата пучка может быть построен в исходных координатах полоидального потока.

Оставшаяся после ослабления (т.е. неионизованная) часть пучка достигает стенки камеры токамака и образует сквозные потери (Shine-through). В настоящее время модель BTR не рассчитывает траектории ионов, родившихся в плазме в результате ионизации атомов, т.е. эти ионы сразу «выбывают из игры».

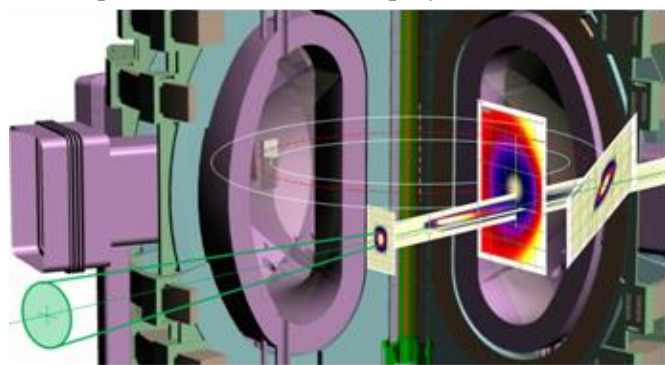


Рис. 27. Нейтральный пучок в плазме ДЕМО-ТИН. Условно показаны поперечный срез пучка на входе, радиальное сечение плазмы, распределение мощности вдоль оси пучка, отпечаток на первой стенке (сквозные потери)

На рис. 27 представлен пример расчёта захвата пучка в плазме ДЕМО-ТИН: вертикальный «срез» пучка вдоль оси инжекции и карта нагрузки на стенку камеры (точнее, проекция карты нагрузки на вертикальную плоскость вдоль оси инжекции). Расчёты проводились с использованием распределения полоидального потока и плазменных профилей, рассчитанных для стационарного режима работы ДЕМО-ТИН.

Сквозные потери пучка в данном расчёте составили $\sim 1\%$ от инжектированной мощности (0,1 МВт), а максимальная нагрузка $0,24$ МВт/м², что приемлемо.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведена общая методика оптимизации геометрии инжекционного тракта для системы нейтральной инжекции термоядерного источника нейтронов ДЕМО-ТИН. Выбрана схема инжектора и рассчитана геометрия компонентов, которая взаимно согласована со структурой и фокусировкой исходного пучка. Рассмотрено влияние различных факторов на эффективность преобразования и транспортировки пучка, определены рабочие интервалы для каждого из них. Рассчитаны потери нейтрального пучка — геометрические и вследствие реионизации, построены детальные распределения тепловых нагрузок в инжекторе, поперечные профили пучка в различных сечениях, включая профили на входе в плазму. Проведены предварительные оценки ослабления пучка в плазме токамака и построены профили нагрузки на стенку камеры. При моделировании использовались авторские коды PDP и BTR, разработанные в НИЦ «Курчатовский институт» специально для нужд проектирования инжекторов ИТЭР и прошедшие многократную верификацию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ананьев С.С., Длугач Е.Д., Крылов А.И., Кутеев Б.В., Панасенков А.А. Концепция системы пучкового нагрева плазмы и генерации тока для проекта термоядерного источника нейтронов ДЕМО-ТИН. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2018, т. 40, вып. 1, с. 5—17.

2. **Azizov E.A., Ananyev S.S., Belyakov V.A. et al.** Tokamak Demo-FNS: concept of magnet system and vacuum chamber. — *Physics of Atomic Nuclei*, 2016, vol. 79, № 7, p. 1125—1136.
3. **ITER** — Final Design Report, DDD 5.3, 2001.
4. **Hemsworth R.S., Boilson D., Blatchford P., Palma M.D., Chitarin G., De Esch H.P.L., Geli F., Dremel M., Graceffa J., Marcuzzi D., Serianni G., Shah D., Singh M., Urbani M., Zaccaria P.** Overview of the design of the ITER heating neutral beam injectors. — *New J. Phys.* 2017, vol. 19, p. 025005.
5. **Длугач Е.** — BTR-website: <https://sites.google.com/site/btrcode/>.
6. **Serianni G., Agostinetti P., Agostini M., Antoni V., Aprile D., Baltador C., Barbisan M., Brombin M., Cavenago M., Chitarin G., Dalla Palma M., Delogu R., Fellin F., Fonnesu N., Marconato N., Pasqualotto R., Pimazzoni A., Sartori E., Spagnolo S., Spolaore M., Veltri P., Zaniol B., Zaupa M.** Neutralization and transport of negative ion beams: physics and diagnostics. — *New J. Phys.*, 2017, vol. 19, p. 045003.
7. **Sartori E., Veltri P., Dlugach E., Hemsworth R., Serianni G., Singh M.** Benchmark of numerical tools simulating beam propagation and secondary particles in ITER NBI. — NIBS- 2014.
8. **Bandyopadhyay M., Singh M.J., Chandramouli R., Chakraborty A., Hemsworth R.S., Beatrix Schunke B.** Beamline optimization for 100-keV diagnostic neutral beam injector for ITER // *IEEE transactions on plasma science*, march 2010, vol. 38, № 3.
9. **Алейников П.Б., Длугач Е.Д.** Моделирование Монте-Карло нейтральной инжекции в ИТЭР. — *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез*, 2012, вып. 1, с. 31—44.
10. **Oh B.H., Dlugach E.D.** Beam transport code for the Kstar NB heating system. — In: 20th IEEE/NPSS Symposium on Fusion Engineering, SOFE 03. San Diego, CA, 2003, с. 474—477.
11. **Singh M.J., Boilson D., Hemsworth R.S., Geli F., Graceffa J., Urbani M., Dlugach E., Krylov A., Schunke B., Chareyre J.** Powerloads on the front end components and the duct of the heating and diagnostic neutral beam lines at ITER. — In: *AIP Conf. Proc.* 1655, 2015, 050011.
12. **CS-data:** <https://amdis.iaea.org/ALADDIN/-> cross sections.
13. **Janev R.K., Boley C.D., Post D.E.** — *Nuclear Fusion*, 1989, vol. 29, p. 212.
14. **Suzuki S., Shirai T., Nemoto M. et al.** — *Plasma Phys. Control. Fusion.*, 1998, vol. 40, p. 2097—2111.
15. **Dremel M., Day C., Hemsworth R. et al.** — *Nuclear Fusion*, 2009, vol. 49, № 7.



Сергей Станиславович Ананьев, в.н.с., к.ф.-м.н., лауреат премий Правительства РФ, им. И.В. Курчатова и А.П. Александрова; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия
Ananyev_SS@nrcki.ru



Борис Васильевич Кутеев, заместитель руководителя Отделения по гибридным системам, д.ф.-м.н., профессор; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия
Kuteev_BV@nrcki.ru



Евгения Дмитриевна Длугач, с.н.с., дважды лауреат премии им. И.В. Курчатова, ветеран атомной энергетики и промышленности; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия
edlugach@gmail.com



Александр Александрович Панасенков, в.н.с., к.ф.-м.н., ветеран атомной энергетики и промышленности; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия
Panasenkov_AA@nrcki.ru

Статья поступила в редакцию 21 июня 2018 г.
Вопросы атомной науки и техники.
Сер. Термоядерный синтез, 2018, т. 41, вып. 3, с. 57—79.