

УДК 533.9

ОПТИМИЗАЦИЯ ДИВЕРТОРА TPT НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ КОДОМ SOLPS-ITER

© 2024 г. П. А. Молчанов^{a, b}, П. С. Кудреватых^{a, b}, Н. В. Штырхунов^{a, b},
Е. Г. Кавеева^{a, b, *}, В. А. Рожанский^{a, b}, И. Ю. Сениченков^{a, b}

^aСанкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

^bЧастное учреждение “ИТЭР-Центр”, Москва, Россия

*e-mail: E.Kaveeva@spbstu.ru

Поступила в редакцию 12.09.2024 г.

После доработки 16.10.2024 г.

Принята к публикации 25.10.2024 г.

На основе моделирования анализируются возможные режимы работы дивертора и параметры пристеночной плазмы проектируемого токамака TPT. Показано, что при мощности на сепаратрисе 18 МВт, соответствующей приблизительно вдвое большей вложенной мощности, можно обеспечить низкую плотность потока тепла на пластины дивертора 5 МВт/м² при концентрации электронов на сепаратрисе менее $7 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ и эффективном заряде менее 2, что является реалистичным сценарием для этой установки. В случае повышения мощности на сепаратрисе возможен режим работы с более высокой тепловой нагрузкой на пластины дивертора, все еще остающейся в технологических пределах. Моделирование также показывает желательность увеличения расстояния между сепаратрисой и элементами камеры и преимущество работы с угловой конфигурацией внешнего дивертора по сравнению с “итероподобной”.

Ключевые слова: TPT, SOLPS-ITER, моделирование, токамак

DOI: 10.31857/S0367292124120028 **EDN:** EFNHTE

1. ВВЕДЕНИЕ

В статье рассматриваются вопросы выбора магнитной конфигурации, конфигурации и формы дивертора и соотношения между напуском основного газа (дейтерия) и примеси в современном токамаке для проекта токамака TPT. Все эти вопросы взаимосвязаны и являются важными при проектировании любого нового токамака и выбора его режима работы [1–4]. Общая концепция TPT — классический токамак с D-образным сечением, близкий по характеристикам к JET, но с существенно большим магнитным полем, до 9 Тл, и со сверхпроводящими катушками внешнего магнитного поля, предназначенный для отработки реакторных технологий с вкладываемой в разряд мощностью более 30 МВт. В деталях целевые параметры плазмы, методы ее нагрева и диагностики, и направление исследований для токамака TPT рассмотрены

в работе [5], а конструкционные особенности камеры в работах [6, 7].

Для нормального функционирования токамака должно быть соблюдено несколько условий. Важнейшим из них является ограничение потока энергии из плазмы на поверхности в камере. Например, в проекте ИТЭР нагрузка на пластины дивертора, рассчитанная без учета отклонений от тороидальной симметрии за счет наклона плиток, составляющих поверхность дивертора, и других возможных факторов в стационарном режиме не должна превышать 10 МВт/м² [4]. Учет наклона плиток дает в расчетах для ИТЭР увеличение пиковой нагрузки на пластину приблизительно в полтора раза. В проекте TPT пиковая стационарная нагрузка не должна превышать 15 МВт/м², поэтому в расчетах в приближении тороидальной симметрии было решено поставить требование аналогичное проекту ИТЭР, т. е. 10 МВт/м². Стенки

вакуумной камеры не должны подвергаться большим потокам плазмы, поскольку они имеют менее интенсивное активное охлаждение и могут перегреваться при существенно меньших тепловых нагрузках. Что еще более важно, распыление материала стенок камеры происходит близко к границе удерживаемой плазмы и приводит к неконтролируемому поступлению в нее примеси.

На нагрузку на стенки камеры, общий режим работы дивертора и токамака в целом сильно влияет ширина обдирочного слоя (scrape off layer, SOL), т. е. области снаружи сепаратрисы (последней замкнутой магнитной поверхности), в которой существует плазма, и расстояние от сепаратрисы до стенки вакуумной камеры. Для нормальной работы дивертора ширина SOL, определяемая процессами переноса в плазме [9], должна быть меньше расстояния до стенки камеры. Тогда дивертор, как и задумано в его конструкции, несет основные нагрузки, а стенка вакуумной камеры остается защищенной. Положение сепаратрисы относительно стенок камеры и баффов (конструкций на входе в дивертор, используемых для удержания в нем нейтрального газа) определяется магнитной конфигурацией. Можно сжать сепаратрису внутрь, увеличив расстояние между ней и стенкой камеры, но при этом уменьшится общий полезный объем удерживаемой плазмы, а вместе с ним и ток по плазме. При удалении плазмы от стенок камеры снижается положительный эффект от пассивных витков стабилизации, расположенных за этими стенками. Таким образом, существует некоторая оптимальная величина расстояния между сепаратрисой и стенками.

На нагрузку на диверторную пластину непосредственно влияет конфигурация самого дивертора, как с точки зрения угла, под которым потоки плазмы идут на пластину, так и с точки зрения направления вылета нейтральных атомов, появляющихся при нейтрализации ионов на пластине, и положения результирующей зоны ионизации. Дополнительная защита дивертора обеспечивается напуском излучающей примеси. Соотношение между напуском основного газа и примеси определяет давление плазмы на сепаратрисе, уровень излучения примесей, эффективный заряд плазмы во всем разряде.

Все эти вопросы рассматриваются ниже с помощью моделирования различных конфигураций ТРТ кодом SOLPS-ITER (версия 3.0.8) [8]. Эта версия кода (и близкие к ней) используется на

большинстве современных токамаков для моделирования пристеночной плазмы и интерпретации экспериментальных результатов, см., например, работы [2, 10–12]. Она была многократно верифицирована сравнением с экспериментом и является стандартным инструментом для оптимизации дивертора в больших проектируемых токамаках [4, 13]. В моделировании учтены дрейфы в неоднородных магнитных и электрических полях. Моделирование нейтральных атомов и молекул проводится методом Монте-Карло с помощью кода Eirene, включенного в пакет SOLPS-ITER, с учетом всех основных элементарных процессов, в том числе столкновений между нейтральными частицами.

2. ВЫБОР БАЗОВОЙ МАГНИТНОЙ КОНФИГУРАЦИИ И КОНФИГУРАЦИИ КАМЕРЫ

Базовая магнитная конфигурация ТРТ 2021–2022 гг., предложенная в работе [1], приводит к малому расстоянию $R_{\text{SOL}} = 1.8$ см от сепаратрисы до магнитных поверхностей снаружи сепаратрисы, уже пересекающих элементы камеры токамака (R_{SOL} измеряется в экваториальной плоскости на внешнем обводе). В случае ТРТ этими элементами конструкции оказываются баффы. За счет изменения размера баффов без изменения магнитной конфигурации, этот размер может быть увеличен до $R_{\text{SOL}} = 2.5$ см, однако дальнейшее увеличение невозможно из-за того, что магнитные поверхности пересекают верхнюю часть первой стенки камеры. Современные токамаки, близкие по параметрам к ТРТ, например JET, работают с расстоянием $R_{\text{SOL}} \sim 10$ см [14]. Экспериментально продемонстрировано, что при уменьшении этого расстояния наблюдается перегрев стенок камеры и их повышенная эрозия. Поэтому первоначальный выбор магнитной конфигурации ТРТ является не оптимальным с точки зрения минимизации потоков тепла и частиц на первую стенку.

В настоящей работе в процессе оптимизации одновременно с изменением геометрии была изменена магнитная конфигурация путем (искусственного) сжатия линии сепаратрисы внутрь, что привело к увеличению ширины SOL, но при этом несколько уменьшились малый радиус центрального шнура и величина тока. Были рассмотрены конфигурации с $R_{\text{SOL}} = 3.6, 4.6, 5.0$ см соответствующие току по плазме в 4.51, 4.48, 4.0 МА. Та-

кое уменьшение тока по сравнению с изначально планируемым значением 5 МА в проекте ТРТ представляется приемлемым. Процесс оптимизации конфигурации ТРТ, в том числе оптимизация формы сепаратрисы, представлен на рис. 1.

Расчеты показывают, что при увеличении R_{SOL} уменьшается не только нагрузка на первую стенку. Пиковая мощность, приходящая на пластину, температуры электронов и ионов в случае с большим R_{SOL} оказываются существенно меньшими, чем с малыми R_{SOL} , что для работы диверторных пластин крайне благоприятно. Это происходит благодаря увеличению объема диверторной области, в котором происходит переизлучение энергии.

Более широкий SOL приводит к значительному снижению полных потоков тепла на внешний дивертор и уменьшению температуры плазмы вблизи него, а также к увеличению излучения. В качестве иллюстрации этого эффекта на рис. 2 приведены результаты моделирования при изменении ширины SOL на 1 см. Увеличение SOL всего на 1 см позволяет снизить поток тепла, уменьшить максимум его плотности на 25%, ионную и электронную температуры. Таким образом, вариант с более широким SOL является более предпочтительным. Поэтому вариант равновесия с шириной SOL в 5.0 см был выбран в качестве

базового для дальнейшей оптимизации, описанной ниже в разделах 3 и 4.

3. ВЫБОР СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ НАПУСКОМ ОСНОВНОГО ГАЗА И ПРИМЕСИ

На рис. 3а представлены элементы камеры и пластины дивертора, расчетная сетка кода B2, описывающего плазму в пакете SOLPS-ITER, и кода Eirene. Ширина расчетной области на внешнем обводе для сетки B2 составляет $R_{\text{SOL}} = 5$ см. На внутреннем обводе сетка несколько уже — 4.4 см. Форма пластин, положения напуска газа и зоны откачки выбраны в соответствии с проектом ТРТ [1]. По сравнению с [1] расстояние от элементов камеры до границы плазмы увеличено как за счет изменения формы сепаратрисы, так и за счет изменения формы баффлов и купола под Х-точкой, что описано в разделе 1 выше. Напуск рабочего газа (дейтерия) и излучающей примеси (неона) осуществляется со стороны внешнего обвода. Выбор неона в качестве примеси-излучателя обусловлен тем, что этот газ показал хорошие результаты в экспериментах на JET [15] с большой мощностью нагрева, он же является основным излучателем в проекте ИТЭР [4].

Система ввода газа закрыта от плазмы экраном. Газ поступает в основной объем камеры, просачиваясь через щели между экранами. Распределение потоков газа по результатам моделирования:

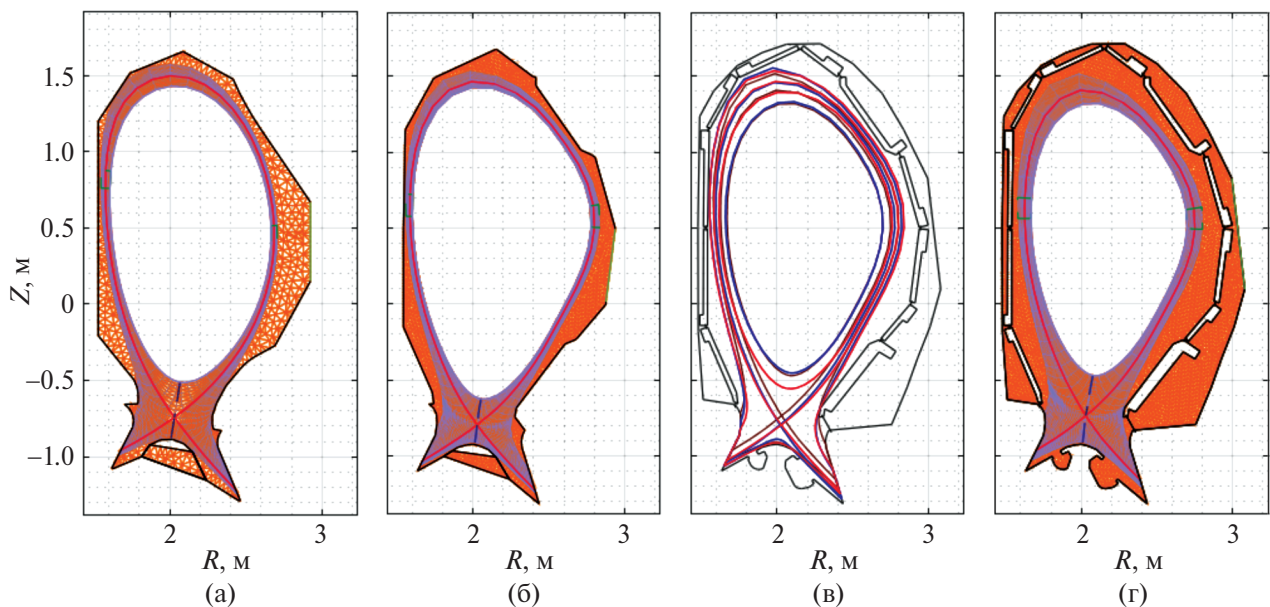


Рис. 1. Иллюстрация оптимизации камеры и магнитного равновесия для проекта токамака ТРТ: первая конфигурация для расчета 2022 г., ширина SOL $R_{\text{SOL}} = 1.8$ см (а); промежуточная конфигурация с измененными баффлами, верхней частью камеры и равновесием, $R_{\text{SOL}} = 3.6$ см (б); выбор оптимальной магнитной конфигурации, $R_{\text{SOL}} = 3.6, 4.6, 5.0$ см (в); финальная конфигурация для расчета, $R_{\text{SOL}} = 5.0$ см (г).

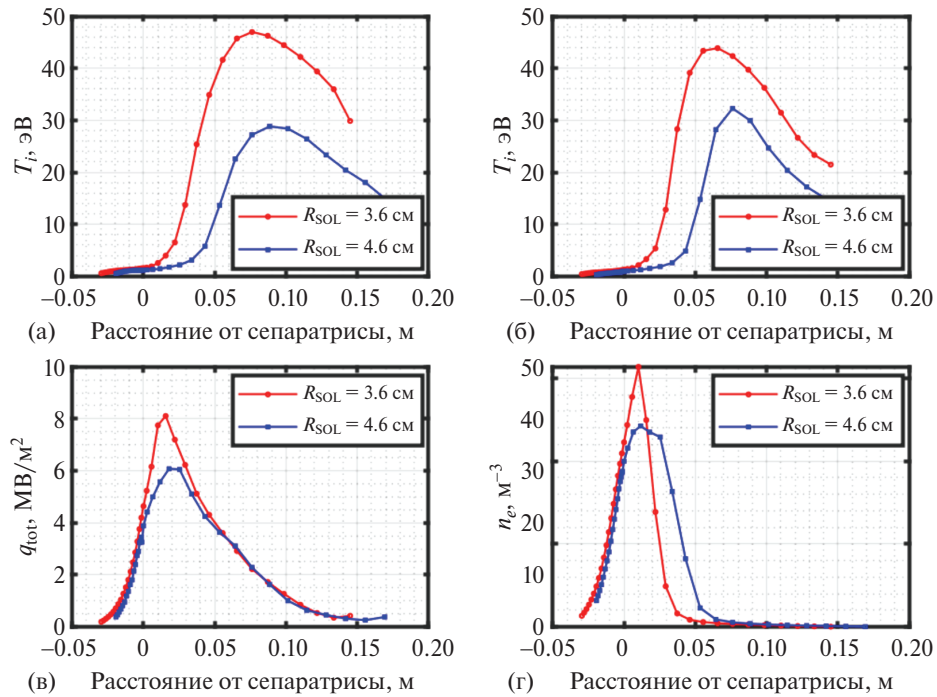


Рис. 2. Профили параметров плазмы у внешней нижней пластины дивертора для разных R_{SOL} : температура ионов, T_i (а); температура электронов, T_e (б), плотность потока энергии, q_{tot} (в); плотность электронов, n_e (г).

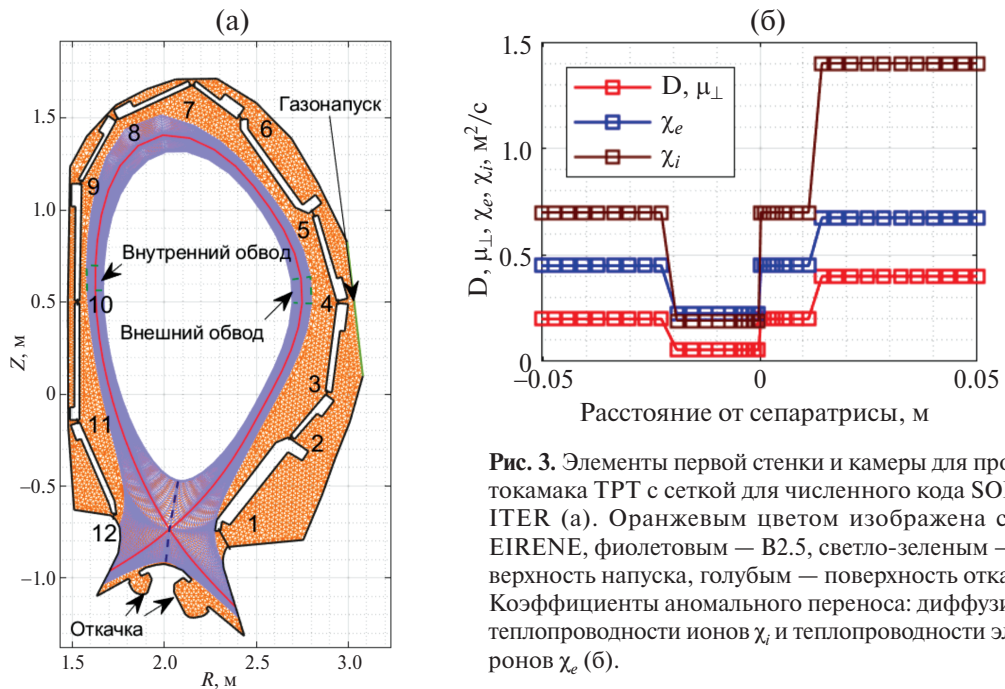


Рис. 3. Элементы первой стенки и камеры для проекта токамака TPT с сеткой для численного кода SOLPS-ITER (а). Оранжевым цветом изображена сетка EIRENE, фиолетовым — B2.5, светло-зеленым — поверхность напуска, голубым — поверхность откачки. Коэффициенты аномального переноса: диффузии D , теплопроводности ионов χ_i и теплопроводности электронов χ_e (б).

в варианте 3 описанном далее: 36% через щель 1, 5% через щель 2, 14% через щель 3, 11% через щель 4, 23% через щель 5, 8% через щель 6, 3% через щель 7, и менее одного процента через щели 8–12. Тороидальные зазоры между экранами на данной стадии моделирования не учитывались. Для более точного расчета распределения потоков газа их надо учесть, сделав экраны частично про-

ницаемыми. Входные отверстия системы откачки газа расположены в нижней части камеры под куполом. Поэтому в моделировании на двух поверхностях под куполом установлен коэффициент отражения молекул меньше единицы. Следует заметить, что давление в двух камерах под куполом распределено неравномерно. В камере, прилегающей к внутреннему дивертору, давление

газа оказывается в 3 раза больше, что может быть учтено в дальнейшем проектировании системы откачки газа.

На рис. 3б в показаны аномальные поперечные коэффициенты диффузии D и теплопроводности χ , определяемые турбулентностью в плазме, которые не могут быть рассчитаны самосогласованно в пакете SOLPS-ITER и являются входными параметрами для моделирования. Их значения и радиальная зависимость были взяты из моделирования токамака JET с большой мощностью нагрева и с напуском неона [15], где они были подобраны на основании экспериментальных профилей параметров пристеночной плазмы и ширины SOL.

В процессе оптимизации были проведены три расчета с разными комбинациями напуска неона и дейтерия. В расчете с помощью системы обратной связи подбиралось значение напуска дейтерия, обеспечивающее заданную пиковую плотность потока энергии 5 МВт/м^2 на внешнюю пластину, существенно меньшую, чем предельная мощность 10 МВт/м^2 . Такой выбор пиковой мощности соответствует высокой степени защиты дивертора нейтральным облаком и примесью от потоков тепла из плазмы. В дальнейшем возможно расширение базы данных расчетов для более высоких входных мощностей, соответствующих большему нагреву центральной плазмы до планируемой предельной величины 40 МВт , и более высоких потоков тепла на пластины дивертора. Напуск излучающей примеси в каждом из расчетов был фиксирован. В табл. 1 приведены основные параметры расчетов. Видно, что при уменьшении напуска примеси ту же пиковую нагрузку на пластину можно обеспечить увеличением напуска рабочего газа. При этом концентрация

плазмы на сепаратрисе возрастает, а температура электронов уменьшается. Полная мощность, приходящая на пластины дивертора, растет. Эксперименты на современных токамаках указывают, что для стабильной работы токамака плотность плазмы на сепаратрисе n_G не должна превышать половины значения по Гринвальду [9]. Для TPT $n_G = I_p / (2\pi a^2) \approx 2 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$. Здесь $I_p = 4 \text{ МА}$ — ток по плазме, $a = 0.57 \text{ м}$ — малый радиус [5]. Полученные в моделировании значения укладываются в этот предел. Однако по абсолютным величинам такие концентрации на сепаратрисе не типичны для современных токамаков, поэтому их достижимость должна быть подтверждена в эксперименте. В то же время для проектируемых установок, таких как DTT [16] и SPARC [17] с увеличением магнитного поля, как и для TPT, возрастает предел по Гринвальду и ожидаемая концентрация плазмы, в том числе и на сепаратрисе.

Входная мощность из центра разряда взята с учетом излучения из центра плазмы. В работающих токамаках, таких как ASDEX-Upgrade и JET, в разрядах с напуском примеси мощность излучения из центра, за пределами расчетной области составляет от трети до половины полной мощности нагрева. Поэтому входной мощности 18 МВт в представленных расчетах с большим напуском примеси и большой концентрацией электронов в центре может соответствовать полная мощность нагрева $30\text{--}35 \text{ МВт}$.

На рис. 4 приведены профили параметров плазмы на внешнем обводе. В варианте с наибольшим напуском неона эффективный заряд достигает уровня 3.7, а в двух других вариантах не превышает 2.2. Уровень эффективного заряда в 3.7 является, исходя из современных экспериментов,

Таблица 1. Основные параметры серии расчетов с различными напусками рабочего газа и примеси

Параметр	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
Ток по плазме, МА	4.05	4.05	4.05
Тороидальное магнитное поле на $R = 1.6 \text{ м}$, Тл	9.4	9.4	9.4
Поток энергии в расчетную область, МВт	18.0	18.0	18.0
Величина напуска дейтерия, ат $\times \text{с}^{-1}$	3.0×10^{22}	5.2×10^{22}	4.72×10^{22}
Величина напуска неона, ат $\times \text{с}^{-1}$	1.75×10^{19}	0.75×10^{19}	1.2×10^{19}
Концентрация электронов на сепаратрисе на внешнем обводе, м^{-3}	5.6×10^{19}	7.2×10^{19}	6.8×10^{19}
Мощность на внешней пластине, МВт	5.8	6.6	5.8
Мощность на внутренней пластине, МВт	3.2	3.6	3.5

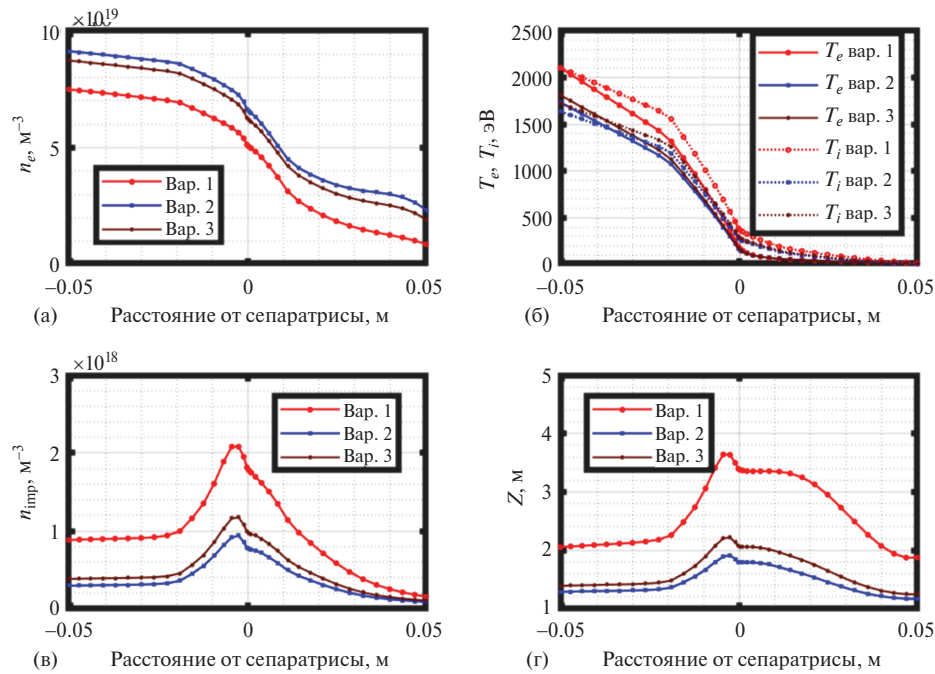


Рис. 4. Параметры плазмы на внешнем обводе с различными напусками рабочего газа и примеси: плотность электронов n_e (а), температура ионов и электронов (б), плотность неона, n_{Ne} (в), эффективный заряд, Z_{eff} (г).

неприемлемым с точки зрения рабочего режима токамака.

На рис. 5 представлены профили параметров вдоль внешнего дивертора. Максимальная плотность потока энергии на пластину одинакова для всех вариантов, и не превышает 5 МВт/м^2 , что

обусловлено схемой обратной связи. Для вариантов со средним и большим напуском рабочего газа (варианты 2 и 3) температура ионов не превышает 12 эВ , а температура электронов — 6 эВ . В варианте 1 с большим напуском примеси и малым напуском рабочего газа температура ионов дости-

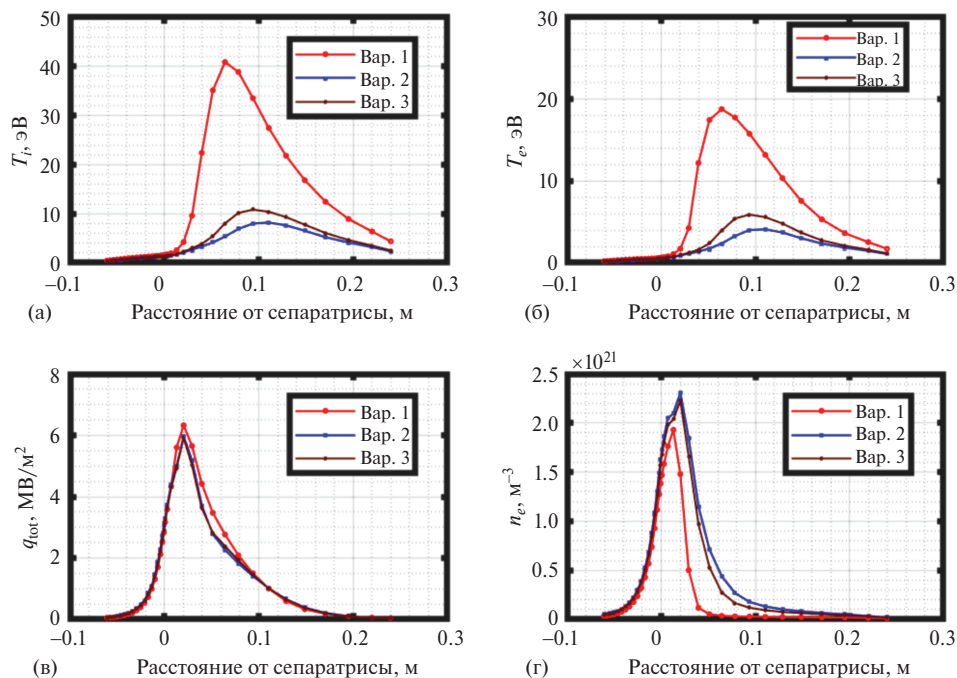


Рис. 5. Параметры плазмы у внешнего дивертора с различными напусками рабочего газа и примеси: температура ионов, T_i (а); температура электронов, T_e (б), плотность потока энергии, q_{tot} (в); плотность электронов, n_e (г).

гает 42 эВ, а электронов — 19 эВ. Разница по температуре в SOL между вариантами достигается за счет различий в профилях концентраций основной плазмы и примеси неона. В то же время в расчетах с большим напуском рабочего газа профили концентрации существенно шире. В результате в области максимума температуры в 5–10 см от сепаратрисы концентрация в этих расчетах оказывается выше. При большей концентрации та же мощность на пластине соответствует меньшей температуре.

Высокая температура на пластине даже в области с малым потоком частиц на нее нежелательна с точки зрения распыления ионами плазмы материала пластины. Распыление является пороговым эффектом, т. е. приводят к распылению ионы с энергией выше порога, которых при низких температурах экспоненциально мало. Высокий процент примеси и высокое значение эффективного заряда на сепаратрисе в совокупности с высокими значениями температуры ионов и электронов на пластине (см. рис. 4, 5) делают вариант 1 неприемлемым в качестве рабочего сценария.

В результате моделирования показано, что один и тот же максимум плотности потока тепла на пластины можно получить различными комбинациями напуска основного газа и примеси. По результатам моделирования, более приемлемым является достижение заданного уровня максимума плотности потока тепла на пластину с помощью большого напуска основного газа более 5×10^{22} атомов/с, соответствующего высоким плотностям на сепаратрисе около $7 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$, и умеренного напуска примеси-излучателя неона.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТРТ С УГЛОВЫМ ДИВЕРТОРОМ

Как моделирование, так и эксперименты на токамаке EAST [3, 10] показали, что угловой дивертор может быть эффективнее классического “итероподобного” дивертора с пластинами, пересекающимися магнитные поверхности под скользящим углом. Кроме того, угловой дивертор проще в изготовлении. Конструкция углового дивертора токамака EAST приведена на рис. 6 [3].

На основе последней выбранной магнитной конфигурации и формы баффов была проведена оптимизация формы диверторных пластин путем рассмотрения углового дивертора с тремя положениями точки пересечения пластин с линией сепаратрисы (strike point, SP): на вертикальной пластине, на горизонтальной пластине, в окрестности угла соединения пластин. Отдельно была рассмотрена конфигурация с угловой внешней пластиной (SP в окрестности угла соединения пластин) и с внутренней пластиной исходного проекта (“итероподобной”). Результаты сравниваются со стандартной конфигурацией, на основе чего делается вывод об эффективности технического решения в виде углового дивертора и оптимальном положении точки пересечения с сепаратрисой (SP). Конфигурация диверторных пластин и положение сепаратрисы для смоделированных вариантов представлены на рис. 7, 8.

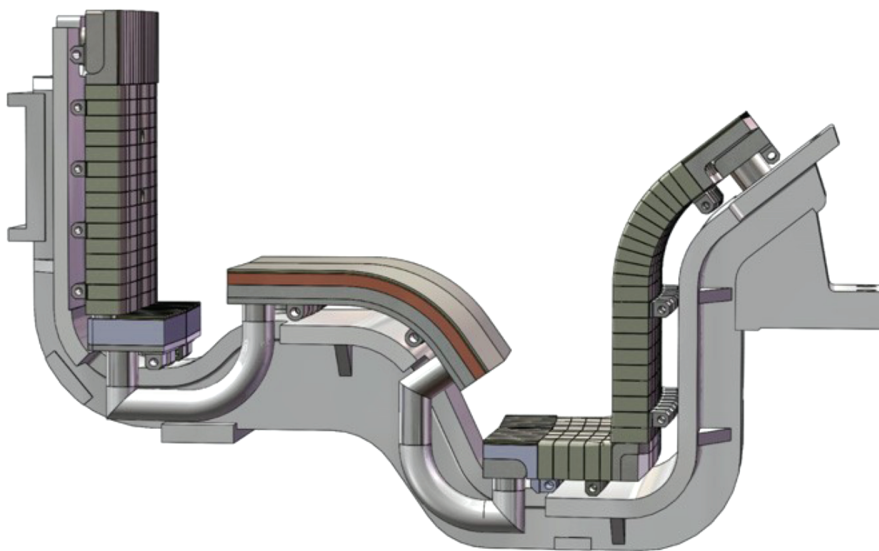


Рис. 6. Конструкция углового дивертора токамака EAST [3].

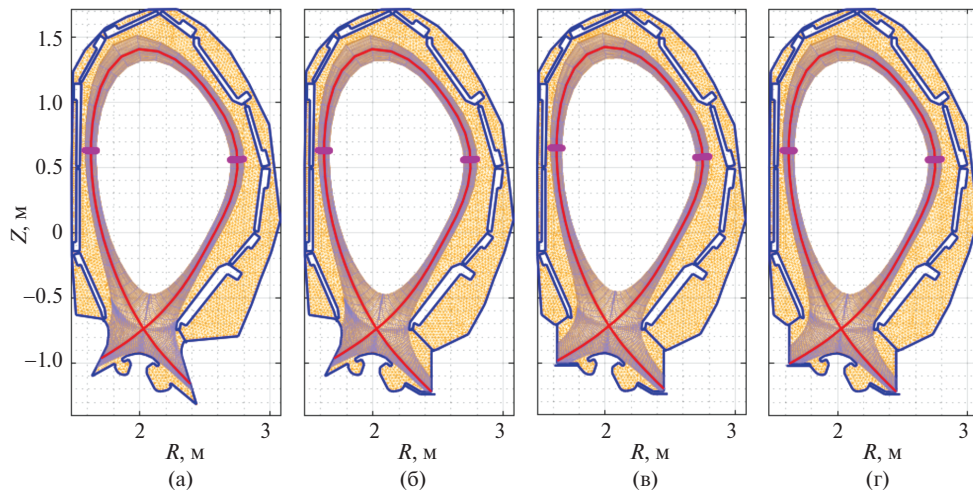


Рис. 7. Расчетная сетка для кода SOLPS-ITER в вариантах моделирования углового дивертора: исходная геометрия пластин проекта TPT 2023 (вариант 1, default) (а), внешний угловой дивертор (вариант 2, corner outer) (б); внутренний и внешний угловой (с положением сепаратрисы на вертикальных пластинах) (вариант 3, corner vertical) (в); внутренний и внешний угловой (с положением сепаратрисы в углах) (вариант 4, corner) (г). Оранжевым цветом изображена сетка EIRENE, фиолетовым — B2.5.

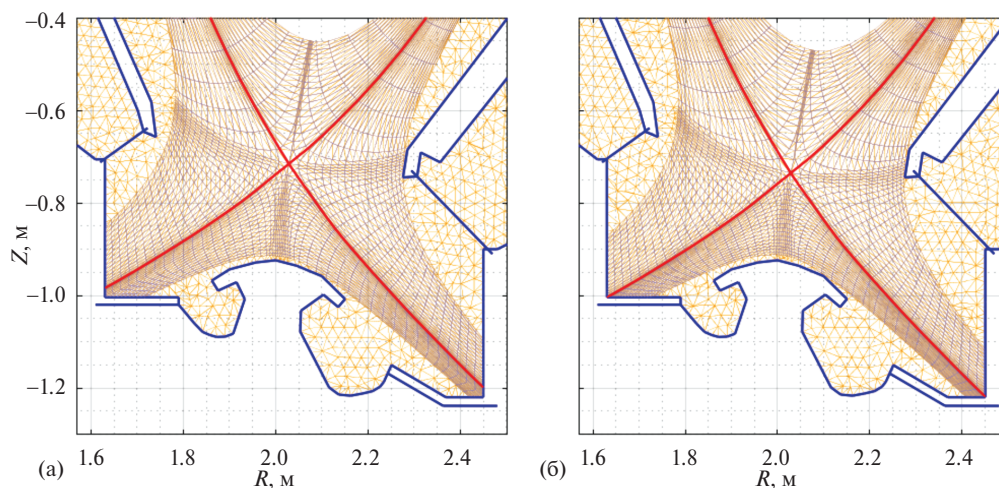


Рис. 8. Увеличенная расчетная сетка для кода SOLPS-ITER в вариантах моделирования углового дивертора с разным положением точки пересечения сепаратрисы с пластинами дивертора: верхняя пластина (вариант 3, corner vertical) (а); угол между пластинами (вариант 4, corner) (б).

Моделирование всех конфигураций дивертора производилось при фиксированном максимуме плотности потока тепла на внешнюю пластину в 5 МВт/м^2 и содержания примеси 1% на сепаратрисе, для чего напуск основного газа и напуск примеси неона подбирались в схеме с обратной связью так, чтобы обеспечить эти условия. Расчеты выполнены с коэффициентами переноса токамака JET, приведенными на рис. 3. Равновесие и форма сепаратрисы были выбраны в соответствии с результатами оптимизации в разделе 1 (ширина SOL составляла 5 см, ток по плазме

в этих расчетах составлял 4.05 МА). Вакуумное тороидальное магнитное поле на $R = 1.6 \text{ м}$ равно 9.36 Тл, мощность разряда 18 МВт.

Из табл. 2 видно, что варианты 3 и 4 более холодные, чем варианты 1 и 2. Поток тепла на внешнюю пластину в варианте 1 равен 5.8 МВт, в варианте 2 — 3.6 МВт, и наименьший, примерно одинаковый, в вариантах 3 и 4 — 1.9–2.0 МВт соответствует случаю полностью угловых диверторов. При этом полный поток тепла в диверторную область не меняется. Уменьшение потока тепла на дивертор связано с возрастающим излу-

Таблица 2. Основные параметры серии расчетов

Параметр	Вариант 1 “default”	Вариант 2 “corner outer”	Вариант 3 “corner vertical”	Вариант 4 “corner”
Величина напуска дейтерия (в атомах), $\text{ат} \times \text{с}^{-1}$	4.72×10^{22}	4.77×10^{22}	3.8×10^{22}	3.24×10^{22}
Величина напуска неона, $\text{ат} \times \text{с}^{-1}$	1.2×10^{19}	1.4×10^{19}	0.96×10^{19}	1.0×10^{19}
Концентрация электронов на сепаратрисе на внешнем обводе, м^{-3}	6.8×10^{19}	7.2×10^{19}	6.9×10^{19}	6.4×10^{19}
Мощность на внешней пластине, МВт	5.8	3.6	1.9	2.0
Мощность на внутренней пластине, МВт	3.5	4.2	3.8	4.0

чением, которое перераспределяет тепло изотропно. Поток тепла на внутреннюю пластину минимален для варианта 1 с “итероподобными” диверторами — 3.5 МВт, и примерно одинаковый для вариантов 2–4, с угловым внешним дивертором. Общий уровень излучения наибольший для вариантов 3 и 4 с полностью угловыми диверторами, и меньше в вариантах 1, 2 с двумя или только одним “итероподобным” дивертором.

На рис. 9 приведены профили концентрации компонент плазмы на внешнем обводе. Концентрация основных ионов в SOL в вариантах с модифицированными диверторами одинаковая и она несколько больше, чем в исходном варианте с “итероподобными” диверторами. Эффективный заряд и концентрация неона во всех вариантах

одинаковы. Эффективный заряд не превышает уровень 2.4. На рис. 10 приведены профили на внутреннем обводе. Концентрация основных ионов и электронов в SOL в вариантах 3 и 4 с угловыми диверторами, существенно больше, чем в вариантах 1 и 2, с внутренним “итероподобным” дивертором. Концентрация неона в вариантах 1 и 2 наоборот больше, чем в вариантах 3 и 4.

На рис. 11 представлены профили температуры ионов и электронов, концентрация электронов и плотность потока энергии на внешней пластине дивертора, а на рис. 12 представлены аналогичные профили на внутренней пластине. Максимум плотности потока энергии на внешнюю пластину практически одинаков для всех вариантов и не превышает 5 МВт/м^2 , что соответствует поста-

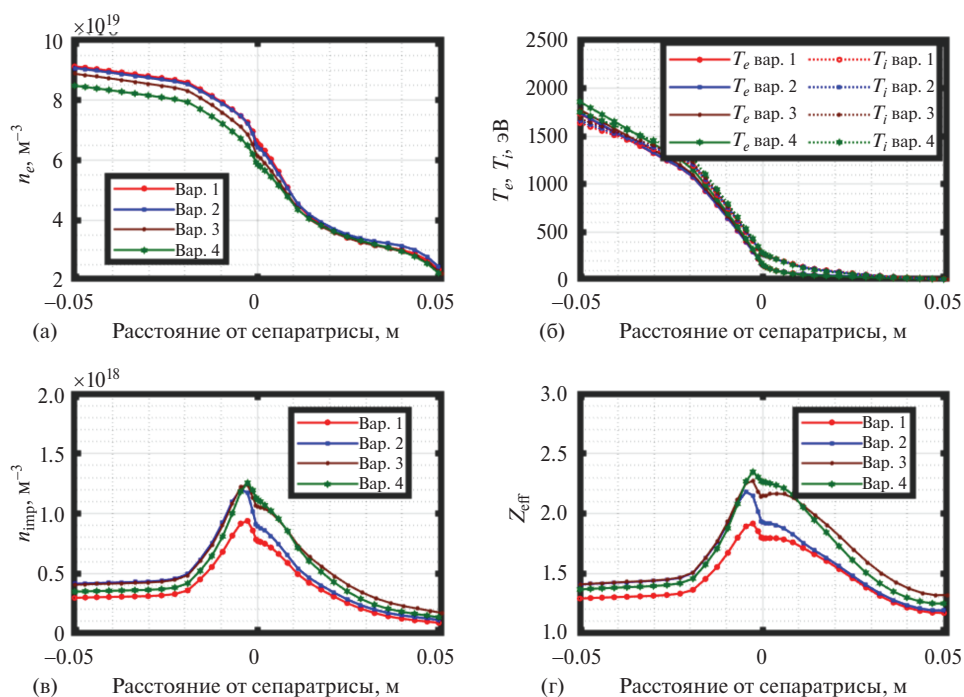


Рис. 9. Параметры плазмы на внешнем обводе с различными напусками рабочего газа и примеси: плотность электронов (а), температура ионов и электронов (б), плотность неона (в), эффективный заряд (г).

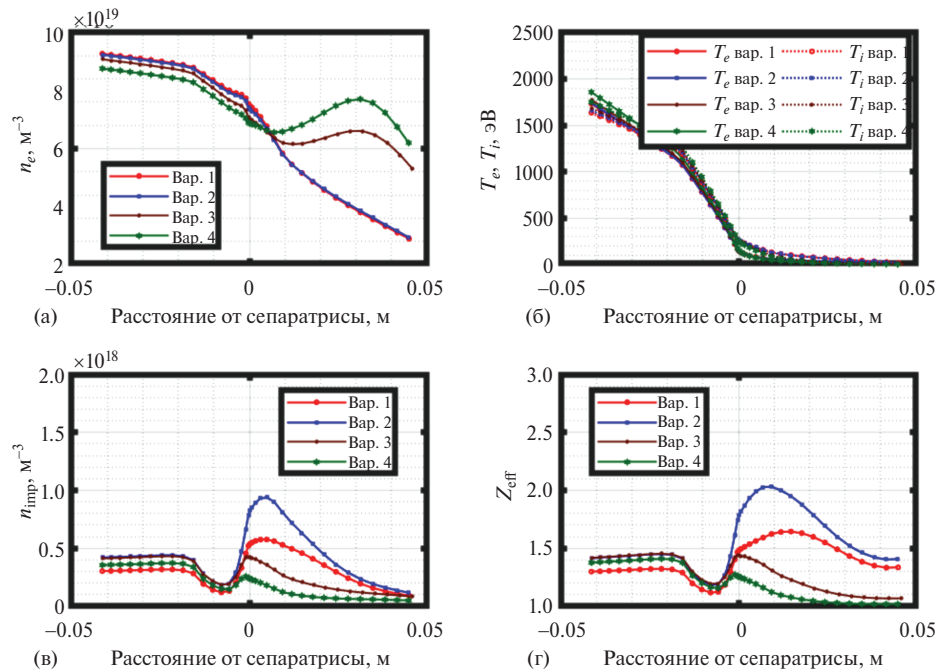


Рис. 10. Параметры плазмы на внутреннем обводе с различными напусками рабочего газа и примеси: плотность электронов (а), температура ионов и электронов (б), плотность неона (в), эффективный заряд (г).

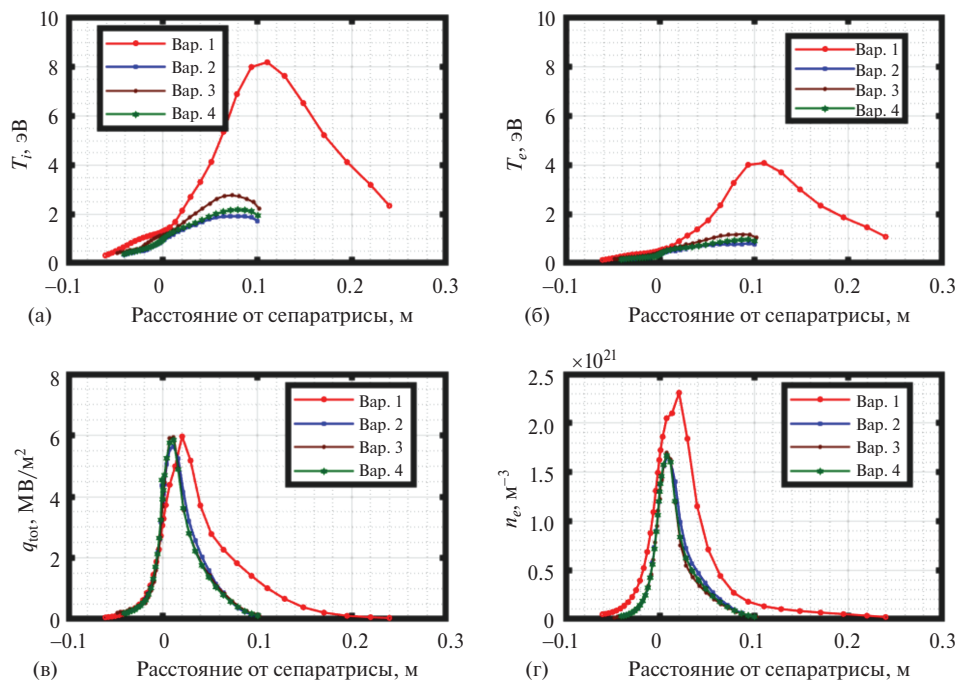


Рис. 11. Профили параметров плазмы у внешней пластины для различных конфигураций дивертора: температура ионов, T_i (а); температура электронов, T_e (б), плотность потока энергии, q_{tot} (в); плотность электронов, n_e (г).

новке задачи. Видно, что варианты 2–4 с угловым внешним дивертором находятся в режиме отрыва. Температура ионов и электронов в этих вариантах не превышает 1–2 эВ, а в варианте 1 с “итероподобным” дивертором достигает 8 эВ для ионов

и 4 эВ для электронов в дальнем SOL. Концентрация электронов в варианте 1 больше, чем для вариантов 2–4. Как следует из табл. 2, полная мощность, приходящая на внешнюю пластину, также остается существенно больше в варианте 1,

чем в вариантах 2–4. Можно заключить, что угловая конфигурация более благоприятна для защиты внешнего дивертора, чем “итероподобная”.

Максимум плотности потока энергии на внутреннюю пластину практически одинаков для всех вариантов и не превышает 2.5 МВт/м^2 . Видно, что варианты 3 и 4 с угловым дивертором находятся в режиме отрыва. Температура ионов и электронов в этих вариантах не превышает 1 эВ, а в ва-

риантах 1 и 2 с “итероподобным” дивертором достигает 20 эВ для ионов и 10 эВ для электронов в дальнем SOL. Концентрации электронов в вариантах 2, 3 у внутренней пластины больше, чем для вариантов 3, 4. Таким образом, для обеих пластин дивертора угловая конфигурация способствует их переходу в режим отрыва.

На рис. 13 приведены двумерные профили концентрации электронов по всему сечению тока-

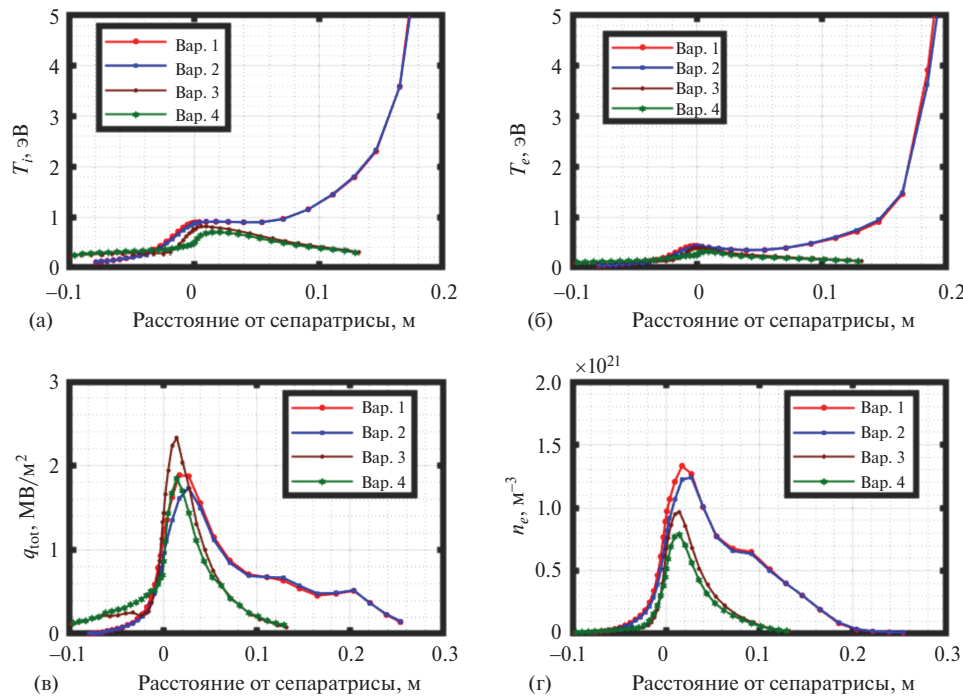


Рис. 12. Профили параметров плазмы у внутренней пластины для различных конфигураций дивертора: температура ионов, T_i (а); температура электронов, T_e (б); плотность потока энергии, q_{tot} (в); плотность электронов, n_e (г).

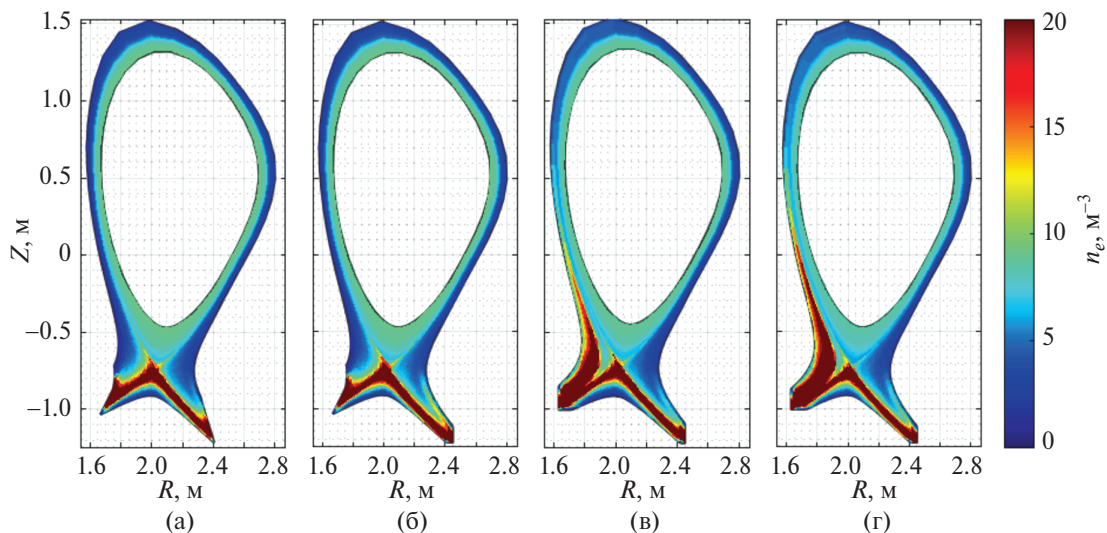


Рис. 13. Двумерные профили концентрации электронов по сечению токамака для различных конфигураций дивертора: вариант 1 (а), вариант 2 (б), вариант 3 (в), вариант 4 (г).

мака, на которых иллюстрируется эффект формирования зоны очень плотной плазмы у внутреннего углового дивертора в SOL, простирающейся вплоть до внутреннего обвода (High Field Side High Density, HFSHD), типичной для экспериментов на AUG, JET [18] и других токамаках. Этот эффект связан с дрейфами в диверторе, и также зависит от угла вылета атомов и молекул, появляющихся за счет нейтрализации ионов плазмы на пластине. Нейтральные частицы вылетают преимущественно перпендикулярно пластине. После ионизации они движутся вдоль силовых линий магнитного поля до следующей нейтрализации на поверхности пластины. При многократных ионизациях в объеме дивертора и рекомбинациях на пластине в случае, если магнитные поверхности пересекают дивертор под углом отличным от 90° , появляется средняя направленная скорость вдоль пластины у этих частиц, частично проводящих время в ионизованном, а частично — в нейтральном состоянии [13, 19]. При уменьшении угла между пластиной и магнитными поверхностями такая конвекция возрастает. При “итероподобном” внутреннем диверторе эта конвекция приводит к скоплению газа в области под X-точкой, отделенной сепаратрисой от области SOL, так называемом PFR (private flux region). В то же время область в SOL вдали от SP, в так называемом дальнем SOL, оказывается обеднена нейтральными атомами. Ионизация и давление плазмы в этой области остаются низкими. Температура плазмы, соответствующая заданной мощности на пластине, увеличивается

при уменьшении давления, и поэтому “итероподобный” дивертор соответствует высокой температуре в дальнем SOL. В случае углового дивертора конвекция как вдоль горизонтальной, так и вдоль вертикальной сторон пластины идет в направлении SP, что обеспечивает высокое давление нейтрального газа в этой области, и эффективную защиту дивертора от основного потока тепла вдоль сепаратрисы. Конвекция вдоль вертикальной части пластины углового дивертора слабее, чем при скользящем угле между пластиной и магнитными поверхностями в “итероподобном” диверторе, поэтому давление ионов и нейтрального газа в SOL вдали от SP больше, а температура плазмы меньше. В результате угловой дивертор приводит к более раннему режиму отрыва, и более плотной плазме в диверторе.

На рис. 14 приведены двумерные профили температуры ионов дейтерия. Видно, как рядом с угловыми пластинами дивертора формируется зона очень холодной плазмы с температурой ~ 1 эВ, типичной для режима отрыва. Эта же область соответствует зоне повышенной концентрации плазмы. Асимметрия между внутренней и внешней пластинами обусловлена электрическим дрейфом [20]. Холодная зона с плотной плазмой особенно велика у внутреннего дивертора, где она имеет большую протяженность в SOL. Наличие аналогичной зоны впервые было обнаружено в токамаке ASDEX-Upgrade [21]. Есть экспериментальные указания, что эта область может влиять на концентрацию плазмы внутри сепаратрисы за счет диффузии, а также увеличи-

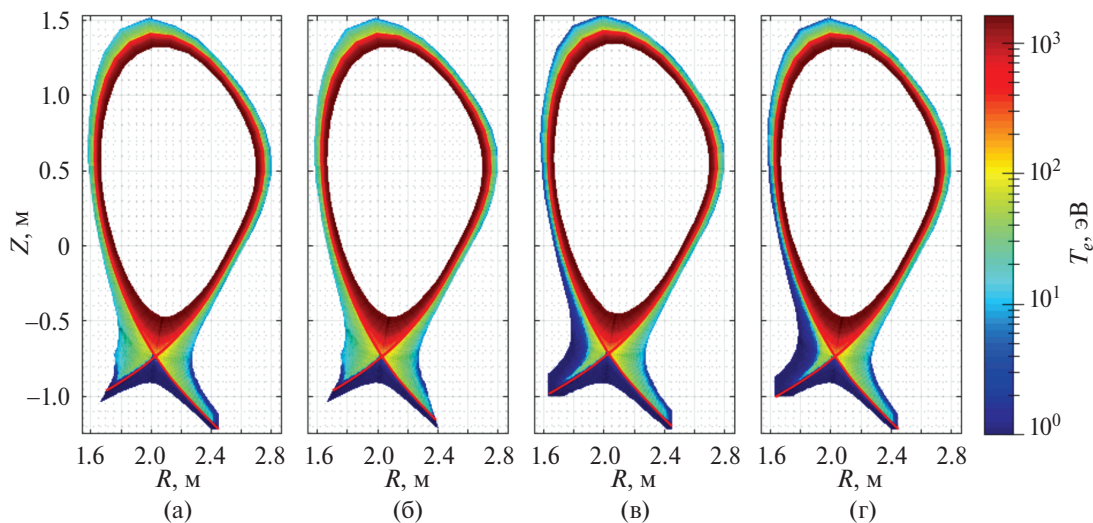


Рис. 14. Двумерные профили температуры ионов у пластин дивертора для различных конфигураций дивертора: вариант 1 (а), вариант 2 (б), вариант 3 (в), вариант 4 (г).

вает вероятность формирования излучающего пятна внутри сепаратрисы [22]. Такое пятно может быть нестабильным. Как правило, рабочие режимы с ним требуют системы обратной связи по напуску излучающей примеси, если же ее нет, то область излучения внутри сепаратрисы приводит к срыву разряда. Поэтому для токамака, в котором режимы с излучающим пятном не рассматриваются как основные, внутренний дивертор лучше оставить “итероподобным”.

Потери тепла со стороны плазмы связаны в первую очередь с ионизацией основной компоненты (дейтерия) и с излучением примеси неона. На рис. 15 приведены двумерные профили потерь тепла, связанных с излучением неона, а на рис. 16 – профили источника ионизации для дей-

терия в диверторной области. Видно, что как зона ионизации, так и зона излучения неона с угловым дивертором расположена дальше от пластин, чем для “итероподобного” дивертора. Во всех вариантах область излучения не выходит за пределы дивертора.

Известно, что изменение формы дивертора влияет на давление нейтрального газа под куполом, в области, откуда идет откачка газа [19], а значит и на эффективность откачки. На рис. 17 приведены двумерные профили давления в диверторной области. Во всех вариантах давление слева под куполом составляет более 10 Па и оказывается больше, чем справа. Это обстоятельство можно учесть при проектировании системы откачки. Такое давление близко к планируемому

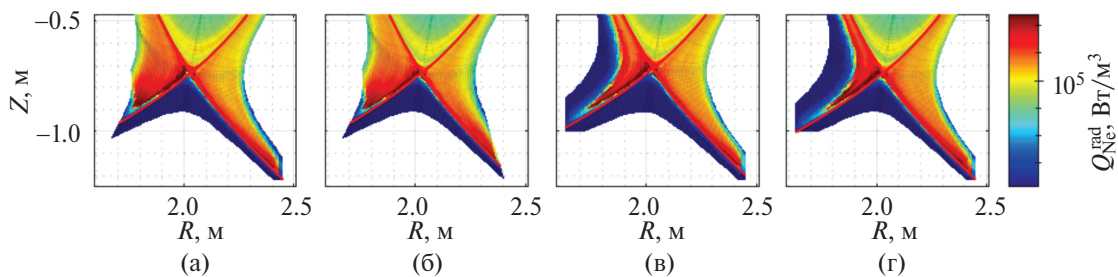


Рис. 15. Двумерные профили излучения примеси неона в диверторной области для различных конфигураций дивертора: вариант 1 (а), вариант 2 (б), вариант 3 (в), вариант 4 (г).

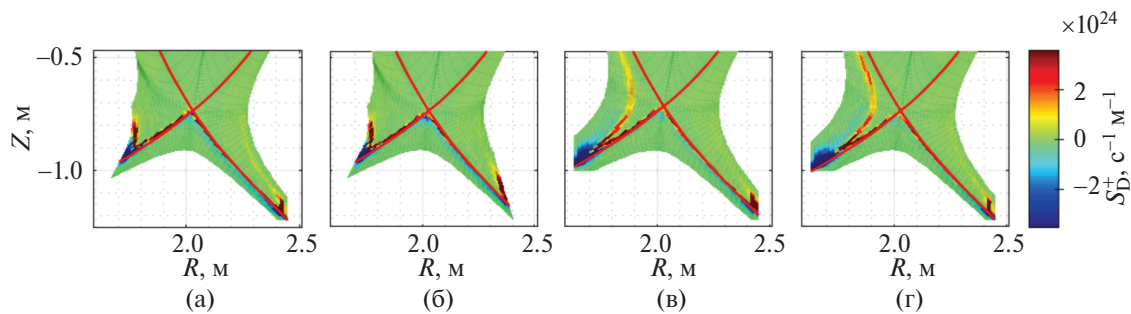


Рис. 16. Двумерные профили источника ионизации для ионов дейтерия в диверторной области для различных конфигураций дивертора: вариант 1 (а), вариант 2 (б), вариант 3 (в), вариант 4 (г).

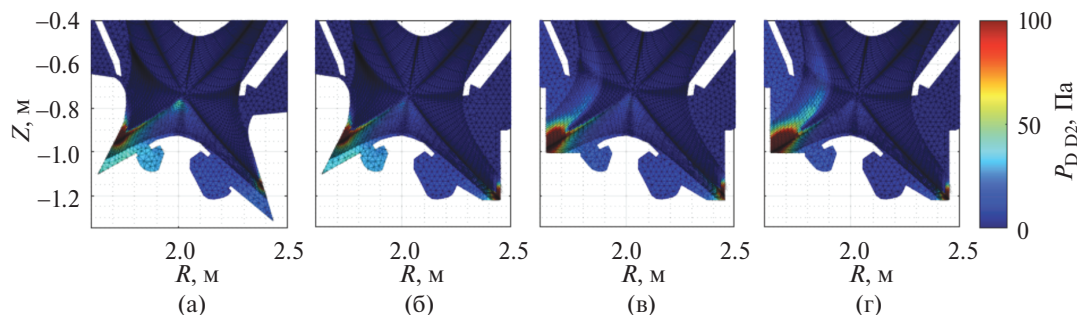


Рис. 17. Давление нейтрального дейтерия (атомы+молекулы) в диверторной области: вариант 1 (а), вариант 2 (б), вариант 3 (в), вариант 4 (г).

давлению нейтрального газа под куполом в проекте ИТЭР [4]. Оно должно быть достаточным для работы системы откачки.

Из представленных результатов видно, что формируемая пространственно протяженная холодная зона на внутреннем обводе при угловом диверторе кажется нежелательной. Поэтому внутренний дивертор был заменен на V-образный (итероподобный), а внешний оставлен угловым, и дальнейшая оптимизация проводилась с этой выбранной формой диверторов. Был сосчитан вариант, как более экстремальный и приближенный к рабочему сценарию, в котором с помощью обратной связи была установлена плотность потока тепла на внешней пластине в 8.5 МВт/м^2 и уровень примеси в 1% на сепаратрисе. В таком экстремальном сценарии также исследовалось влияние положения точки пересечения сепаратрисы с внешним дивертором — на верхней вертикальной пластине, в углу их пересечения и на нижней горизонтальной пластине (рис. 18).

В табл. 3 приведены основные параметры этих расчетов.

Несмотря на то что в этих режимах одинаковый максимум плотности потока тепла на пластины, а также суммарная мощность на пластинах и профили температуры и концентрации в центральной области не сильно различаются, состояние плазмы в пристеночной области (SOL) получается существенно различным. На рис. 19 показаны профили концентрации компонент плазмы на внешнем обводе. Концентрация основных ионов в центральной области практически одинакова, а в SOL в варианте с положением точки пересечения сепаратрисой внешнего дивертора на нижней пластине происходит формирование области более плотной плазмы, и концентрация оказывается выше, чем в случае положения точки пересечения сепаратрисой внешнего дивертора на верхней пластине или в углу между пластин. Концентрация неона во всех вариантах примерно одинаковая. Эффективный заряд не превышает уровень 2.4.

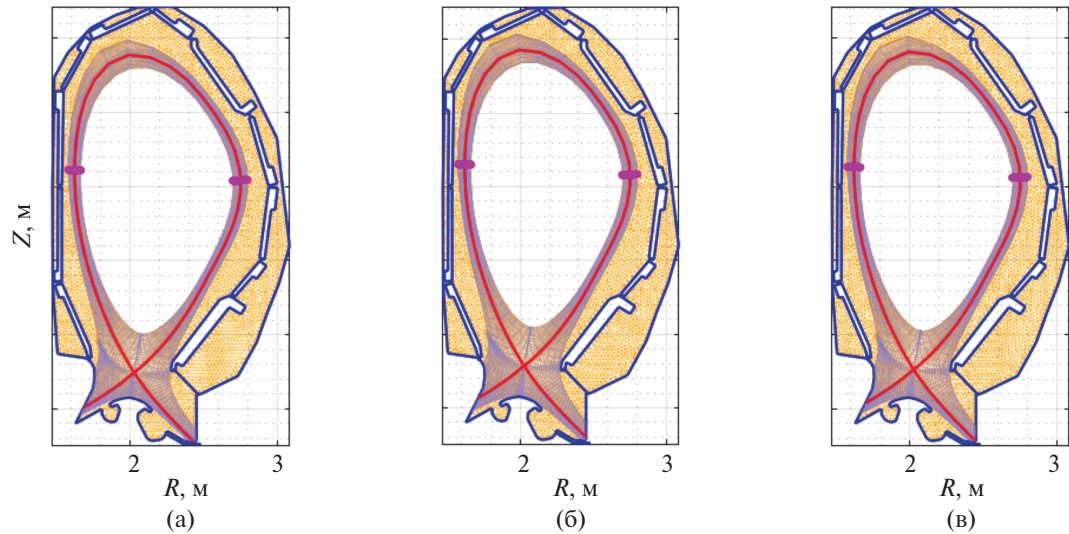


Рис. 18. Положение сепаратрисы на внешнем диверторе: точка пересечения сепаратрисы находится на нижней пластине (а); точка пересечения сепаратрисы находится на верхней пластине (б); точка пересечения сепаратрисы находится в углу пересечения пластин (в).

Таблица 3. Основные параметры серии расчетов с плотностью потока тепла на внешней пластине 8.5 МВт/м^2

Параметр	Вариант 1 “down”	Вариант 2 “up”	Вариант 3 “corner”
Величина напуска дейтерия (в атомах), $\text{ат}\times\text{с}^{-1}$	3.7×10^{22}	4.2×10^{22}	4.3×10^{22}
Величина напуска неона, $\text{ат}\times\text{с}^{-1}$	1.5×10^{19}	0.58×10^{19}	0.67×10^{19}
Концентрация электронов на сепаратрисе на внешнем обводе, м^{-3}	5.1×10^{19}	5.1×10^{19}	5.0×10^{19}
Мощность на внешней пластине, МВт	4.7	5.7	5.8
Мощность на внутренней пластине, МВт	3.6	3.6	3.6

На рис. 20 приведены профили на внутреннем обводе. Концентрация основных ионов и неона практически одинакова на внутреннем обводе.

На рис. 21 представлены профили температуры ионов и электронов, концентрация электронов и плотность потока энергии на внешней пластине

дивертора, а на рис. 22 представлены аналогичные профили на внутренней пластине. Максимум плотности потока энергии на внешнюю пластину практически одинаков для всех вариантов и не превышает 8.5 МВт/м^2 , что обусловлено схемой обратной связи. Видно, что вариант 1 с положе-

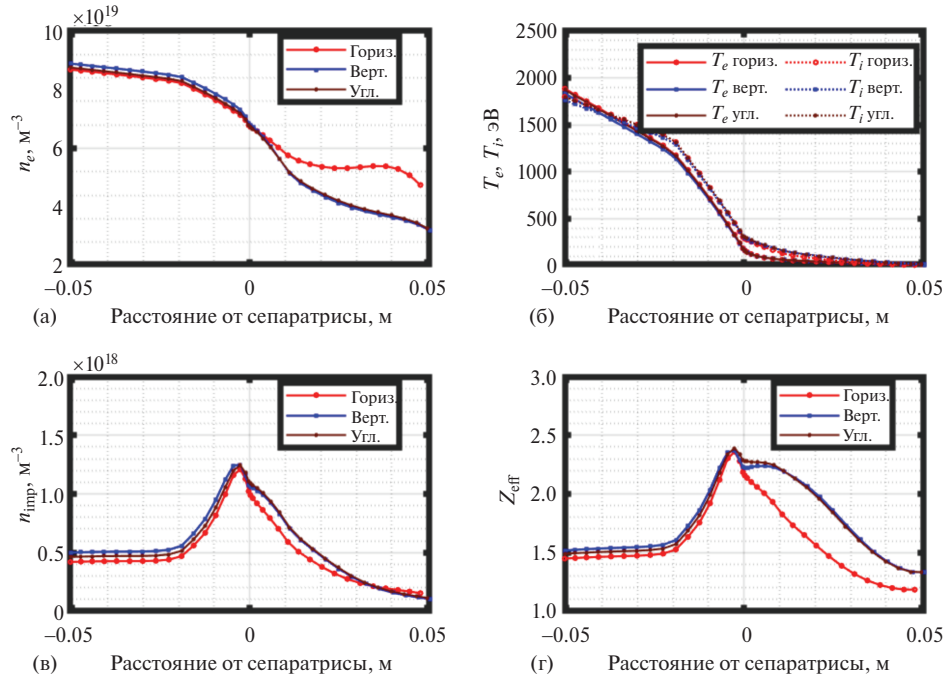


Рис. 19. Параметры плазмы на внешнем обводе с различными напусками рабочего газа и примеси: плотность электронов(а), температура ионов и электронов (б), плотность неона (в), эффективный заряд (г).

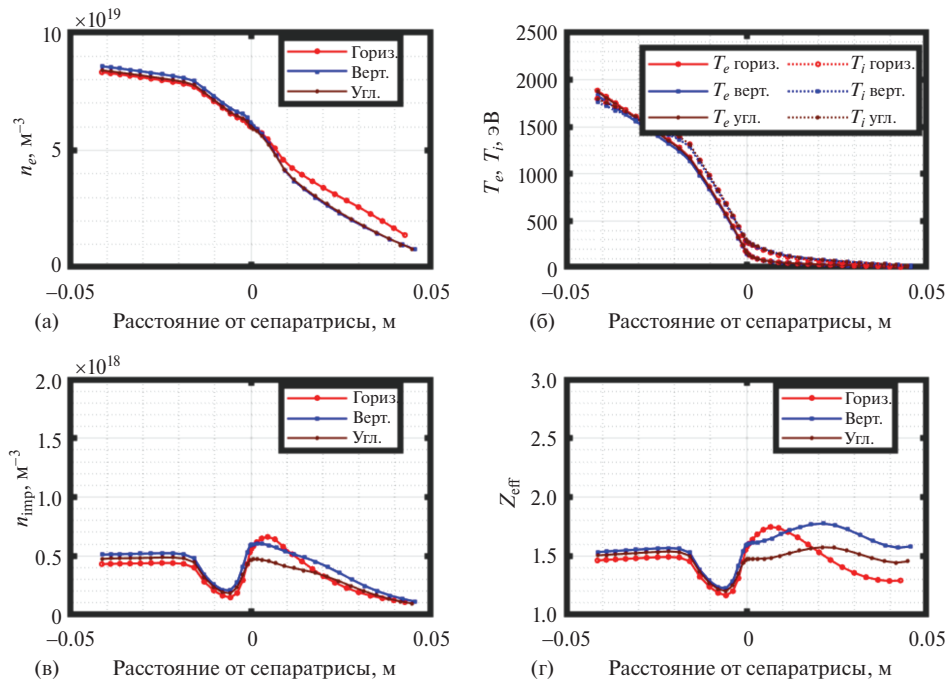


Рис. 20. Параметры плазмы на внутреннем обводе с различными напусками рабочего газа и примеси: плотность электронов(а), температура ионов и электронов (б), плотность неона (в), эффективный заряд (г).

нием точки пересечения сепаратрисой внешнего дивертора на нижней пластине находится в режиме отрыва, а варианты 2 с положением точки пересечения сепаратрисой внешнего дивертора на верхней пластине и 3 с положением точки пересечения сепаратрисой точно в углу между пла-

стинами находятся в режиме, в котором плазма не отрывается от пластины. Температура ионов и электронов в этих вариантах на внешней пластине существенно различается. Она не превышает 1–2 эВ для варианта 1 с положением точки пересечения сепаратрисой внешнего дивертора

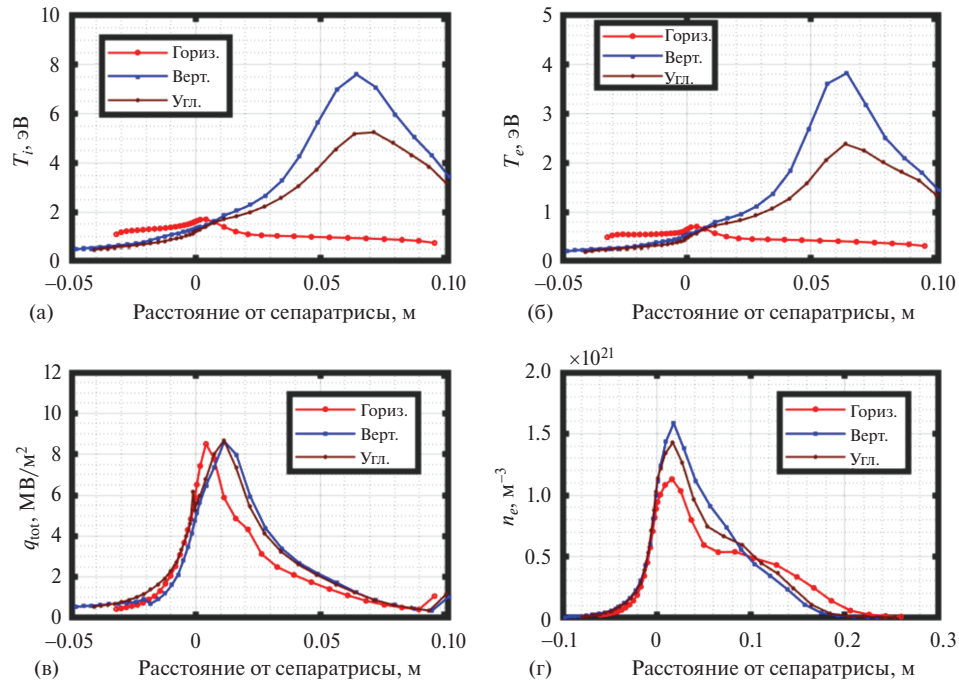


Рис. 21. Профили параметров плазмы у внешней пластины для различных положений сепаратрисы во внешнем диверторе.

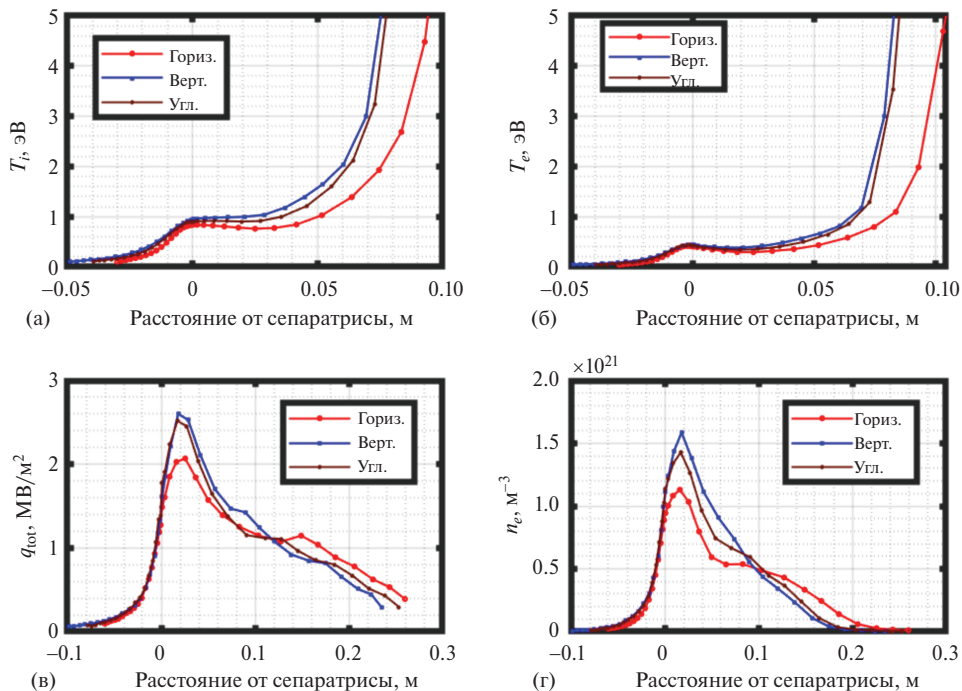


Рис. 22. Профили параметров плазмы у внутренней пластины для различных положений сепаратрисы во внешнем диверторе.

на нижней пластине, в варианте 2 с положением точки пересечения сепаратрисой внешнего дивертора на верхней пластине достигает 7.8 эВ для ионов и 3.8 эВ для электронов в дальнем SOL, а в варианте 3 с положением точки пересечения сепаратрисой внешнего дивертора между пластин достигает 5.3 эВ для ионов и 2.4 эВ для электронов в дальнем SOL. Концентрация электронов в варианте 1 с положением точки пересечения сепаратрисой внешнего дивертора на нижней пластине больше в дальнем SOL чем для вариантов 2 и 3. Можно заключить, что положение точки пересечения сепаратрисой внешнего дивертора на нижней пластине является более благоприятным сценарием для рабочего режима, так как облегчает переход плазмы дивертора в режим отрыва. Также положение точки пересечения сепаратрисой внешнего дивертора является параметром, задаваемым внешними токами, с помощью которого возможно управление переходом между режимами отрыва и взаимодействием плазмы с внешней пластиной.

Максимум плотности потока энергии на внутреннюю пластину практически одинаков для всех вариантов и не превышает 2.6 МВт/м^2 (см. рис. 22). Температура электронов и ионов в этих

вариантах не превышает 1 эВ в основной части пластины, но возрастает до 12–27 эВ в дальнем SOL. Температура ионов достигает 25–27 эВ для вариантов 2, 3 и 15 эВ для варианта 1, а температура электронов достигает 11–12 эВ для вариантов 2, 3 и 8 эВ для варианта 1. Концентрация электронов также оказывается несколько большей в вариантах 2, 3. Таким образом, и для внутренней пластины вариант 1 с положением точки пересечения сепаратрисы внешнего дивертора на нижней пластине оказывается несколько лучше.

На рис. 23 приведены двумерные профили концентрации электронов по всему сечению токамака, на которых иллюстрируется эффект формирования зоны более плотной плазмы у внешнего углового дивертора в SOL при положении точки пересечения сепаратрисой внешнего дивертора на нижней пластине. Рис. 24–26 также показывают, что при положении SP на горизонтальной пластине плазма более холодная, чем в двух других случаях, а область излучения и ионизации находится дальше от внешней пластины. Давление нейтрального газа в области купола также оказывается больше в случае варианта 1 при положении точки пересечения сепаратрисы внешнего дивертора на нижней пластине (рис. 27).

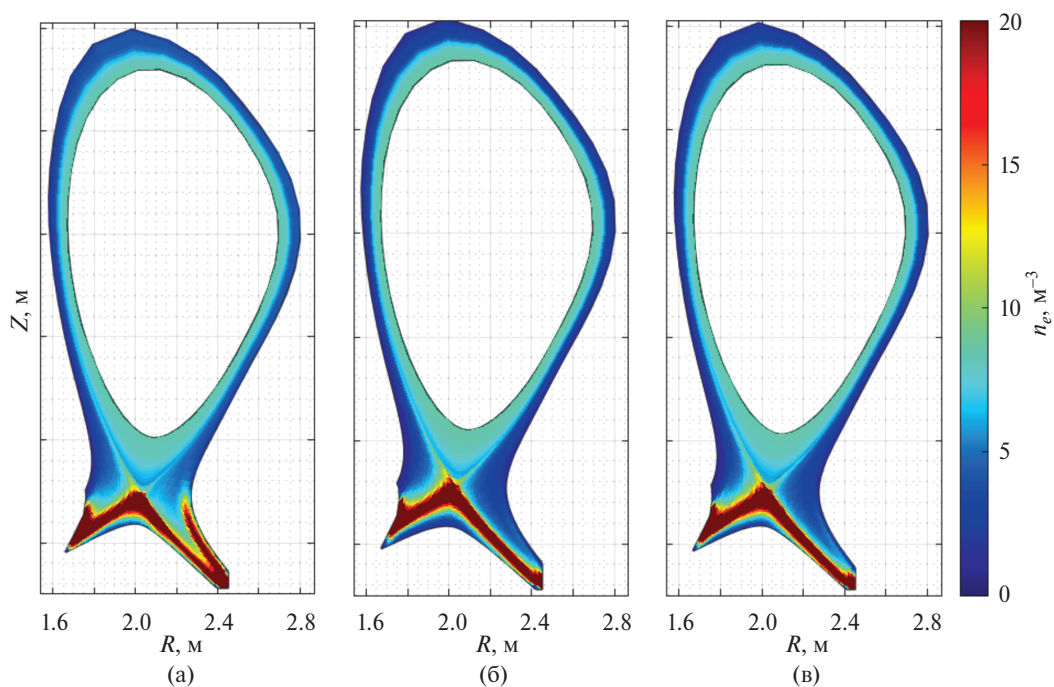


Рис. 23. Двумерные профили концентрации электронов по сечению токамака для различных положений сепаратрисы: точка пересечения сепаратрисы на нижней внешней пластине (горизонт.) (а), точка пересечения сепаратрисы на верхней внешней пластине (верт.) (б), точка пересечения сепаратрисы точно в углу между внешними пластинами (угл.) (в).

В целом, как и в случае сравнения V-образного и углового диверторов, рассмотренного выше, основными эффектами здесь оказываются угол вылета нейтральных частиц с пластины и формирование скорости переноса вдоль пластины, приводящее к формированию плотного нейтрального облака, и дрейфы. В случае 2 положения точки

пересечения сепаратрисой внешнего дивертора на верхней пластине средняя скорость вылета нейтральных частиц направлена в область пристеночной плазмы у купола между пластин (private flux region), в то время как в случае 1 положения точки пересечения сепаратрисой внешнего дивертора на нижней пластине средняя скорость

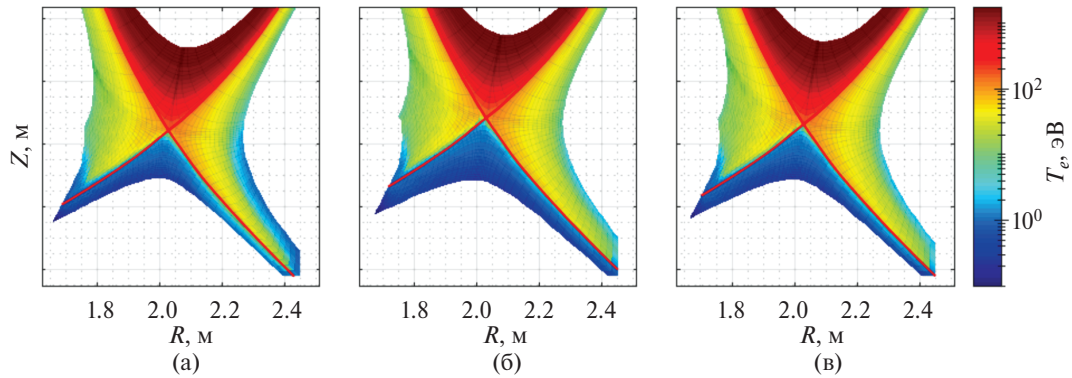


Рис. 24. Двумерные профили температуры электронов у пластин дивертора для конфигураций дивертора, соответствующих рис. 23.

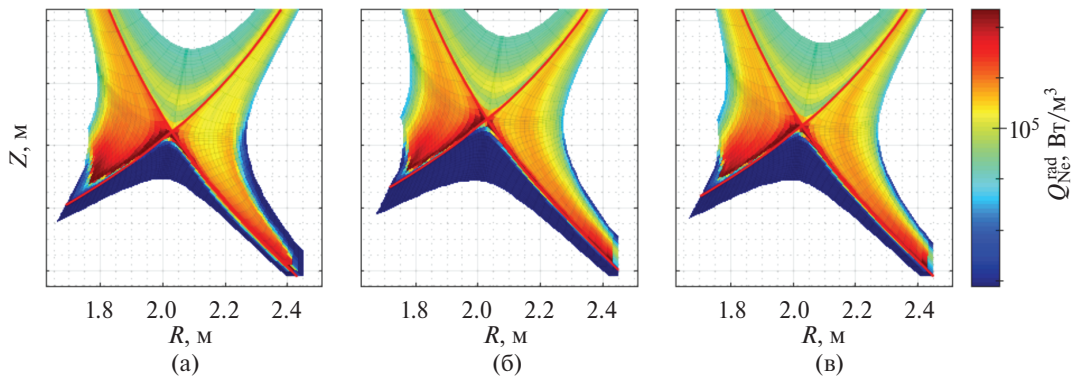


Рис. 25. Двумерные профили излучения примеси неона в диверторной области для конфигураций дивертора, соответствующих рис. 23.

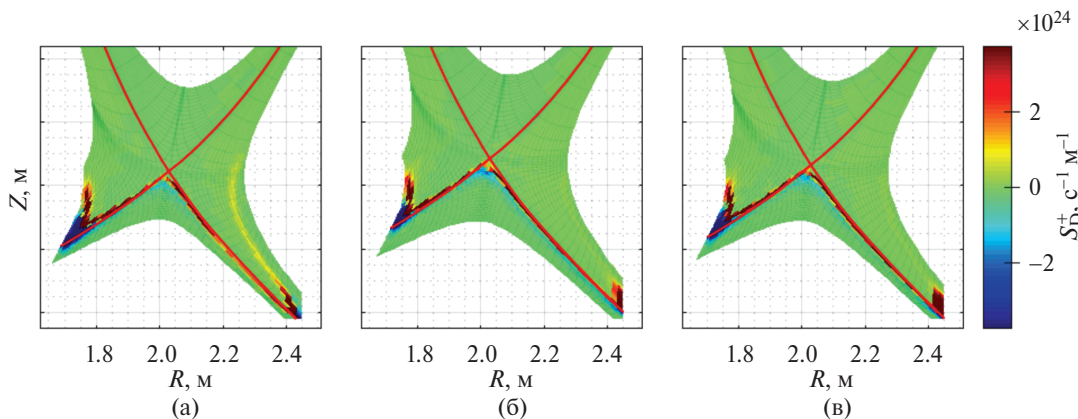


Рис. 26. Двумерные профили источника ионизации для ионов дейтерия в диверторной области для конфигураций дивертора, соответствующих рис. 23.

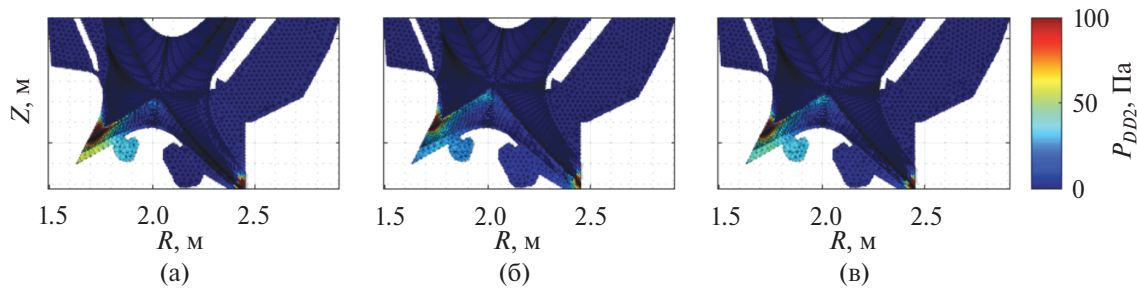


Рис. 27. Давление нейтрального дейтерия (атомы+молекулы) в диверторной области для конфигураций рис. 23.

вылета нейтральных частиц направлена во внешнюю пристеночную область (внешний SOL), где формируется плотное ионизационное облако. Нейтральные частицы ионизируются в этой зоне внешней диверторной пристеночной области, и, двигаясь вдоль силовых линий, формируют повышенную концентрацию плазмы во всем внешнем SOL.

В результате моделирования перспективных вариантов углового дивертора для ТРТ, было показано, что угловой дивертор приводит к сильному падению температуры электронов и ионов у пластин до уровня 1 эВ и облегчает переход плазмы у пластин в режим отрыва. Это является преимуществом углового дивертора перед “V-образным”. В расчетах во всех вариантах получается эффективный заряд ~ 2.4 вблизи сепаратрисы на внешнем обводе, обусловленный напуском неона не менее 1×10^{19} атомов/с. По-видимому, более эффективным было бы понижать температуру у пластин большим напуском основного газа, уменьшив напуск примеси и понизив эффективный заряд до уровня меньшего 2. Внутренний угловой дивертор приводит к формированию плазмы с повышенной плотностью и малой температурой во всем внутреннем SOL вплоть до внутреннего обвода, в то время как при обычном “V-образном” диверторе этого не происходит. Для стабильной работы токамака рекомендуется угловой внешний и “V-образный” внутренний дивертор. В рабочем режиме рекомендуется использовать магнитную конфигурацию с положением точки пересечения сепаратрисы внешнего углового дивертора на нижней пластине, так как это облегчает переход плазмы на внешней пластине в режим отрыва, а также приводит к некоторому снижению температуры и у внутренней пластины.

5. ВЫВОДЫ

Было показано, что один и тот же максимум плотности потока тепла на пластины можно получить различными комбинациями напуска основного газа и примеси. При мощности на сепаратрисе 18 МВт можно обеспечить низкую плотность потока тепла на пластины дивертора 5 МВт/м² при плотности плазмы на сепаратрисе менее 7×10^{19} м⁻³ и эффективном заряде менее 2. Такой режим работы токамака выглядит реалистичным. В случае повышения мощности на сепаратрисе возможен режим работы с более высокой тепловой нагрузкой на пластины дивертора, все еще остающейся в технологических пределах. Также за счет увеличения нагрузки на пластины при заданной мощности при необходимости может быть понижена концентрация плазмы на сепаратрисе.

Увеличение расстояния между сепаратрисой и элементами камеры приводит значительному снижению потоков тепла на внешний дивертор и уменьшению температуры плазмы вблизи него, а также к увеличению излучения из дивертора. Увеличение этого расстояния всего на 1 см позволяет снизить поток тепла, максимум его плотности, ионную и электронную температуры почти в два раза. Таким образом, вариант с более широким SOL является более предпочтительным.

Было показано, что угловой дивертор приводит к сильному падению температуры электронов и ионов у пластин до уровня 1 эВ и облегчает переход плазмы у пластин в режим отрыва. Это является преимуществом углового дивертора перед “итероподобным”. Положение точки пересечения сепаратрисой внешнего углового дивертора позволяет управлять режимами его работы и переходом плазмы из состояния взаимодействия с пластиной в состояние отрыва. Положение точки пересечения сепаратрисы внешнего углового дивертора на нижней пластине является оп-

тимальным, так как это облегчает переход плазмы на внешней пластине в режим отрыва, а также приводит к некоторому снижению температуры и у внутренней пластины.

Моделирование с коэффициентами переноса аналогичными токамаку JET дает большие величины потоков тепла на пластины дивертора при аналогичных остальных параметрах, чем моделирование с коэффициентами из работы [1]. Таким образом, это более реалистичный вариант, на который надо ориентироваться. По сравнению с работой [1] в моделировании также учтены дрейфовые потоки и рассмотрен режим улучшенного удержания. В целом, сохраняется вывод о том, что существует реалистичный диапазон рабочих параметров: величина напуска газа и примеси, поток тепла из центральной области, тепловая нагрузка на диверторные пластины, концентрация электронов на сепаратрисе. В то же время существенный дополнительный вывод — необходимость увеличения расстояния между сепаратрисой и первой стенкой камеры.

Работа выполнена за счет средств государственного контракта от 17.04.2023 № Н.4к.241.09.23.1060 “НИОКР в обоснование программы исследований и технических требований к системам токамака с реакторными технологиями. Этап 2023–2024 годов”.

Компьютерное моделирование конфигураций токамака ТРТ представленных в работе выполнено в Суперкомпьютерном центре Санкт-Петербургского Политехнического Университета Петра Великого (СКЦ СПбПУ). Авторы выражают глубокую благодарность сотрудникам научно-исследовательского отделения “Энергонапряженные многослойные компоненты” НИИЭФА им. Д.В. Ефремова за подробные обсуждения возможных конфигураций ТРТ и Кукушкину К.А. за помощь в подготовке публикации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kukushkin A.S., Pshenov A.A.* // Plasma Phys. Rep. 2021. V. 47. P. 1238.
2. *Kaveeva E., Rozhansky V., Veselova I., Senichenkov I., Giroud C., Pitts R., Wiesen S., Voskoboynikov S.* // Nuclear Materials Energy. 2021. V. 28. P. 101030.
3. *Yu Y., Zhou D., Sakamoto M., Cao B., Zuo G., Hu J.* // Nuclear Materials Energy. 2023. V. 34. P. 101333.
4. *Pitts R.A., Bonnin X., Escourbiac F., Frerichs H., Gunn J.P., Hirai T., Kukushkin A.S., Kaveeva E., Miller M.A., Moulton D., Rozhansky V., Senichenkov I., Sytova E., Schmitz O., Stangeby P.C.* // Nucl. Mater. Energy. 2019. V. 20. P. 100696.
5. *Krasilnikov A.V., Konovalov S.V., Bondarchuk E.N., Mazul I.V., Rodin I.Yu., Mineev A.B., Kuzmin E.G., Kavin A.A., Karpov D.A., Leonov V.M., Khayrutdinov R.R., Kukushkin A.S., Portnov D.V., Ivanov A.A., Belchenko Yu.I.* // Plasma Phys. Rep. 2021. V. 47. P. 1092.
6. *Mazul I.V., Giniyatulin R.N., Kavin A.A., Litunovskii N.V., Makhankov A.N., Piskarev P.Yu., Tanchuk V.N.* // Plasma Phys. Rep. 2021. V. 47. P. 1220.
7. *Пискарев П.Ю., Мазуль И.В., Маханьков А.Н., Колесник М.С., Окунева Е.В., Литуновский Н.В.* // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2024. Т. 47. С. 41.
8. *Bonnin X., Dekeyser W., Pitts R., Coster D., Voskoboynikov S., Wiesen S.* // Plasma Fusion Res. 2016. V. 11. P. 1403102.
9. *Eich T., Goldston R.J., Kallenbach A., Sieglin B., Sun H.J., ASDEX Upgrade Team and JET Contributors* // Nuclear Fusion. 2018. V. 58. P. 034001.
10. *Xu G.S., Wang L., Yao D.M., Jia G.Z., C.F. Sang, Liu X.J., Chen Y.P., Si H., Yang Z.S., Guo H.Y., Du H.L., Luo Z.P. et al.* // Nuclear Fusion. 2021. V. 61. P. 126070.
11. *Pan O., Bernert M., Lunt T., Cavedon M., Kurzan B., Wiesen S., Wischmeier M., Stroth U. and the ASDEX Upgrade Team* // Nuclear Fusion. 2023. V. 63. P. 016001.
12. *Senichenkov I.Yu., Poletaeva A.G., Kaveeva E.G., Veselova I.Yu., Rozhansky V.A., Coster D., Bonnin X., Pitts R.A.* // Nuclear Materials and Energy. 2023. V. 34. P. 101361.
13. *Senichenkov I.Yu., Ding R., Molchanov P.A., Kaveeva E.G., Rozhansky V.A., Voskoboynikov S.P., Shtyrkhunov N.V., Makarov S.O., Si H., Liu X., Sang C., Mao S. and CFETR Team* // Nuclear Fusion. 2022. V. 62. P. 096010.
14. *Sun H.J., Silburn S.A., Carvalho I.S., King D.B., Giroud C., Fishpool G., Matthews G.F., Henriques R.B., Keeling D.L., Rimini F.G. et al.* // Nuclear Fusion. 2023. V. 63. P. 016021.
15. *Giraud C., Pitts R.A., Kaveeva E., Rozhansky V., Brezinsek S., Huber A., Mailloux J., Marin M., Tomes M., Veselova I., Hillesheim J.* // 48th EPS Confer. on Plasma Physics and Controlled Fusion, Amsterdam 27.06–01.07.2022.
<https://indico.fusenet.eu/event/28/contributions/500/>
16. *Ambrosino R.* // Fusion Engineering and Design. 2021. V. 167. P. 112330.
17. *Rodriguez-Fernandez P., Creely A.J., Greenwald M.J., Brunner D., Ballinger S.B., Chrobak C.P., Garnier D.T., Granetz R., Hartwig Z.S., Howard N.T. et al.* // Nuclear Fusion. 2022. V. 62. P. 042003.
18. *Potzel S., Wischmeier M., Bernert M., Dux R., Reimold F., Scarabosio A., Brezinsek S., Clever M., Huber A., Meigs A., Stamp M.* // Journal of Nuclear Materials. 2015. V. 463. P. 541–545.

19. *Loarte A.* // Plasma Phys. Control. Fusion. 2001. V. 43. P. R183.
20. *Rozhansky V., Kaveeva E., Senichenkov I., Sytova E., Veselova I., Voskoboynikov S., Coster D.* // Contrib. Plasma Phys. 2018. V. 58. P. 540.
21. *McCormick K., Dux R., Fischer R., Scarabosio A., the ASDEX Upgrade Team.* // Journal of Nuclear Materials. 2009. V. 390–391. P. S465.
22. *Bernert M., Janky F., Sieglin B., Kallenbach A., Lipschultz B., Reimold F., Wischmeier M., Cavedon M., David P., Dunne M.G. et al.* // Nuclear Fusion. 2021. V. 61. P. 024001.

TRT DIVERTOR OPTIMIZATION IN SOLPS-ITER MODELING

**P. A. Molchanov^{a, b}, P. S. Kudrevatykh^{a, b}, N. V. Shtyrkhunov^{a, b}, E. G. Kaveeva^{a, b, *},
V. A. Rozhansky^{a, b}, and I. Yu. Senichenkov^{a, b}**

^a*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, 195251, Russia*

^b*Institution “Project Center ITER”, Moscow, 123182, Russia*

**e-mail: E.Kaveeva@spbstu*

The analysis of possible divertor working regimes and edge plasma parameters for TRT tokamak project is performed basing on modeling. It is shown that for the separatrix power of 18 MW corresponding to approximately twice higher full input power the low divertor integral heat flux 5 MW/m² can be provided for the separatrix plasma density lower than $7 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ and the effective charge Z_{eff} lower than 2. These parameters are realistic for this device. In case of bigger separatrix power the working regime is possible with higher divertor heat load still within the technological limits of the machine. Modeling also shows positive effect of the increase of the distance between the separatrix and the vacuum vessel structures and better performance of the corner divertor configuration comparing to the “ITER-like” one.

Keywords: TRT, SOLPS-ITER, modeling, tokamak