

УДК 621.039.633

## ПОТОКИ В СИСТЕМАХ ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА ДЕМО-ТИН С УЧЕТОМ D- И T-ПЕЛЛЕТ ИНЖЕКЦИИ

© 2022 г. С. С. Ананьев<sup>a, \*</sup>, А. Ю. Днестровский<sup>a</sup>, А. С. Кукушкин<sup>a, b</sup><sup>a</sup> НИЦ “Курчатовский институт”, Москва, Россия<sup>b</sup> НИЯУ Московский инженерно-физический институт, Москва, Россия

\*e-mail: Ananyev\_SS@nrcki.ru

Поступила в редакцию 03.09.2021 г.

После доработки 11.11.2021 г.

Принята к публикации 19.11.2021 г.

В результате согласованного моделирования кодами ASTRA+SOLPS и FC-FNS найден диапазон параметров, в котором за счет инъекции пеллет различного изотопного состава обеспечивается требуемая доля трития в основной плазме  $f_{core}^T = 0.5$ . Проанализирована взаимозависимость потоков компонентов топлива для подпитки плазмы в рабочем окне параметров для токамака ДЕМО-ТИН. Рассмотрено влияние инъекции пеллет со стороны сильного и слабого магнитного поля для подпитки основной плазмы и стимуляции ELM на потоки в системах топливного цикла ДЕМО-ТИН. Показана необходимость повышения производительности систем пеллет-инъекции и разделения изотопов водорода в режимах с учетом конвективных ELM на порядок величины относительно оценок, сделанных ранее без учета ELM. Найдена зависимость частоты инъекции топливных пеллет со стороны сильного поля от их размеров и времени удержания частиц в плазме. Показана необходимость инъекции пеллет со стороны слабого поля для стимуляции ELM в найденном рабочем диапазоне. Показано влияние дополнительной стимуляции ELM на требования к подпитке основной плазмы.

*Ключевые слова:* термоядерный источник нейтронов, ДЕМО-ТИН, реактор синтез-деление, изотопы водорода, топливный цикл, подпитка плазмы, пеллет-инъекция, стимуляция ELM, согласованное моделирование плазмы, рабочее окно параметров, время удержания частиц

DOI: 10.31857/S0367292122030015

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Современные эксперименты показывают, что напуск газа в камеру токамака не обеспечивает надлежащий контроль плазмы с высокой плотностью и большой мощностью нагрева (см., например, [1] и ссылки там). Поэтому в качестве основного способа подпитки для современных токамаков ASDEX и JET [2, 3] и перспективных установок JT-60SA, ITER и DEMO [4–6] рассматривается инъекция частиц в виде замороженных крупинок (пеллет) путем ускорения в центробежной [2, 4] или газовой [3, 5] пушке – каждый из подходов имеет свои преимущества и недостатки. Ключевыми параметрами для эффективного ввода пеллет в основную плазму являются их скорость и направление инъекции. Так, инъекция частиц в пеллетах со стороны сильного магнитного поля (HFS) более эффективна [7], чем со стороны слабого (LFS), однако острее встает проблема с размещением инъекционных систем. Современные исследования по совершенствованию

систем пеллет-инъекции направлены, в основном, на повышение скорости топливных пеллет с 200–300 м/с до 500–1500 м/с, что необходимо для установок большого размера с радиусом  $R \sim 6$  м [5, 6].

Инъекция пеллет со стороны слабого магнитного поля на текущий момент рассматривается как эффективный способ контроля неустойчивостей, локализованных на краю плазмы (ELM) [5, 8, 9], с целью снижения нагрузки на элементы первой стенки и дивертора. Известно, что каждая пеллета достаточного размера, инжектированная в плазму в H-режиме, инициирует ELM [10]. Частая инъекция небольших пеллет в область сепаратрисы приводит к запуску ELM с меньшим энергосодержанием, чем в случае спонтанных ELM, что позволяет избежать повреждения приемных поверхностей. Частота инъекции таких пеллет должна быть существенно выше, чем частота топливных пеллет, а их размер меньше [5, 9].

Для ДЕМО-ТИН планируется применять инжекцию топливных пеллет со стороны сильного магнитного поля в качестве одного из основных способов подпитки плазмы и инжекцию пеллет со стороны слабого магнитного поля для контроля ELM [11]. С учетом ожидаемых параметров плазмы [12], топливные потоки в системах подпитки для ДЕМО-ТИН на порядок ниже, чем требуются для ITER, CFETR или DEMO [13]. На текущий момент для ДЕМО-ТИН рассматривается инжектор, разрабатываемый для проекта ITER [3, 5], однако допускается возможность использования центробежной системы, которая имеет свои преимущества. В проектах ITER и CFETR топливные пеллеты планируется изготавливать практически моноизотопными [5, 9, 14] с примесью другого изотопа в малом количестве. Требование по допустимой концентрации примеси определяется механической прочностью пеллет – важнейшим показателем при инжекции со скоростями  $\geq 300$  м/с [5, 6]. Ведутся работы [15] по изготовлению пеллет из смеси изотопов, используя специфическую методику экструзии и заморозки, обеспечивающую достаточную механическую прочность пеллет, однако эта технология далека от применения в установках синтеза. Парадигма использования только отработанных технологий для проекта ДЕМО-ТИН требует использовать инжекцию моноизотопных пеллет различными инжекторами, как это упоминалось в [16, 17].

В работах [18–20] была сделана оценка величин потоков в системах откачки, обработки и инжекции топливных изотопов D и T, а также проанализировано влияние различных способов подпитки на изотопный состав основной плазмы. Однако в этих работах не учитывались потери частиц в ELM, которые могут быть значительными при стимуляции последних инжекцией пеллет. Первые исследования влияния ELM на количество трития в топливном цикле, необходимое для работы ДЕМО-ТИН, были опубликованы в работе [21]. Целью данного исследования является детальный анализ влияния ELM на рабочее окно параметров для потоков D и T в системах топливного цикла (ТЦ) установки ДЕМО-ТИН. Рабочее окно параметров ТЦ включает параметры систем инжекции топлива, его откачки из вакуумной камеры и обработки. В этом окне параметров может быть достигнут требуемый стационарный режим установки с учетом эксплуатационных ограничений, касающихся тепловых нагрузок в диверторе, потерь энергии в ELM, а также ограничений, налагаемых конструкцией инжекционных систем (нейтральной инжекции – NBI, пеллет-инжекции – PIS, системы инжекции газа –GIS) и систем откачки.

Также, как и в работах [17, 19, 20], мы моделируем состояние основной (внутри сепаратрисы) и пристеночной (снаружи) плазмы комбинацией кодов ASTRA [22] и SOLPS4.3 [23], а потоки частиц в системах топливного цикла (ТЦ) – кодом FC-FNS [18]. При этом связь между этими тремя, в значительной степени, независимыми блоками осуществляется по не прямой схеме, где выходные данные одного блока параметризуются и в таком виде используются в качестве входных данных в другом [12, 24]. Это позволяет создать вычислительно эффективный алгоритм, описывающий взаимодействие различных компонентов модели, имеющих сильно различающиеся характерные времена.

## 2. ТРЕБОВАНИЯ К КОНСТРУКЦИИ СИСТЕМЫ ПЕЛЛЕТ-ИНЖЕКЦИИ

При проектировании системы инжекции криогенных пеллет ДЕМО-ТИН необходимо обеспечить гибкость в отношении размеров пеллет (количества частиц в них), скорости инжекции, места и направления инжекции и состава пеллет (изотопного состава). В процессе запуска установки и ее работы в стационарном режиме нужно использовать топливные пеллеты размера, оптимального для подпитки основной плазмы (см. ниже), при этом для подбора потоков частиц в плазму можно варьировать частоту инжекции и размеры топливных пеллет.

Максимальная скорость инжекции пеллет, при которой они попадают в плазму в неповрежденном виде, составляет  $V_{inj} < 300$  м/с (ожидается, что скорость инжекции  $V_{inj} > 500$  м/с приведет к увеличению доли разрушенных пеллет из-за кривизны инжекционного тракта [5, 6]). Для скорости инжекции  $V_{inj} = 300$  м/с, которая рассматривается для проекта ДЕМО-ТИН, до 20% массы пеллет может быть потеряно в направляющей трубе. Дальнейшее увеличение скорости инжекции должно сопровождаться уменьшением кривизны трубопроводов, по которым будут двигаться пеллеты, и оптимизацией размеров/формы пеллет.

Помимо потерь массы пеллет в направляющих системы инжекции, фрагменты разрушенных пеллет вносят вклад в подпитку пристеночной плазмы и дивертора [16–22]. Эти потери необходимо компенсировать увеличением производительности систем изготовления пеллет.

Как уже отмечалось, топливные пеллеты для ДЕМО-ТИН могут состоять из чистого T (возможно, с малой примесью D, которая несущественно влияет на механические свойства пеллет), либо из чистого D для обеспечения требуемого суммарного потока топливных изотопов в плазму. T- и D-пеллеты с HFS будут использо-

ваться для подпитки плазмы, а D-пеллеты с LFS предполагается использовать для стимуляции ELM. Для изготовления пеллет из различных изотопов необходимо предусмотреть две различные системы изготовления криогенных пеллет. При этом, возможно, удастся обойтись одной системой инжекции – в случае применения технологии на основе центрифуги [4]. Экспериментально показано [5], что можно достичь полного извлечения фрагментов пеллет и газа, использующегося для их ускорения, из направляющих трубопроводов для предотвращения их попадания в вакуумную камеру, однако это потребует дополнительного разделения D и T в случае общих направляющих. Таким образом, системы с раздельными направляющими для пеллет с различным изотопным составом выглядят предпочтительными.

Важно отметить, что при инжекции пеллет для стимуляции ELM, требований к целостности пеллет, поступающих в плазму, нет, так как они воздействуют на периферийную область плазмы и не должны проникать глубоко. Для снижения глубины проникновения также целесообразно использовать меньшую скорость инжекции, чем для топливных пеллет. Подробно величины различных потоков рассматриваются в следующих разделах.

### 3. ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ ПАРАМЕТРОВ ПЕЛЛЕТ-ИНЖЕКЦИИ И ПОТОКОВ В ОСНОВНОЙ И ДИВЕРТОРНОЙ ПЛАЗМЕ В КОДЕ FC-FNS

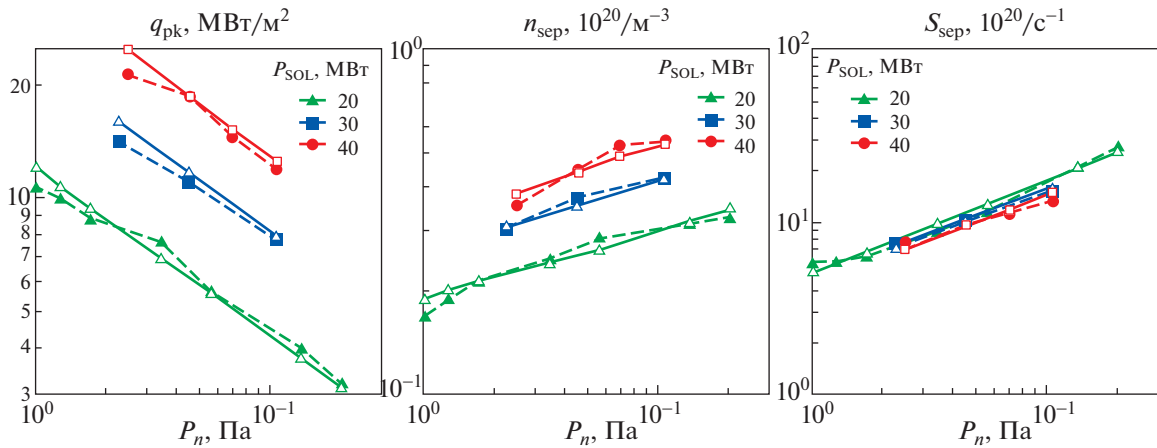
Общая схема интегрирования кодов SOLPS4.3, ASTRA и FC-FNS выглядит следующим образом. Вначале проводится серия двумерных расчетов для диверторной плазмы кодом SOLPS4.3. Здесь характерные времена установления составляют порядка 10 мс. Результаты этих расчетов представляются в виде скейлингов, связывающих параметры плазмы на сепаратрисе и нагрузки в диверторе с величинами входных потоков частиц и энергии. Пример такой аппроксимации приведен на рис. 1. С использованием этих скейлингов в качестве граничных условий проводятся одномерные расчеты для основной плазмы внутри сепаратрисы, где характерные времена составляют порядка секунды. Из этих расчетов определяются параметры, характеризующие плазму в нульмерных расчетах в коде FC-FNS, который моделирует распределение потоков в топливном цикле, где характерные времена составляют часы. Таким образом общее время расчета сокращается на несколько порядков по сравнению с гипотетическим непосредственным объединением всех трех кодов в одном расчете.

В [26] была предложена модель для описания баланса частиц в основной плазме с учетом ее подпитки за счет нескольких источников, включая топливную инжекцию в виде криогенных пеллет с HFS( $S_{pel}$ ), подпитки основной плазмы за счет инжекции нейтральных пучков NBI ( $S_{NBI}$ ) и подпитки за счет нейтралов, проникающих из SOL в основную плазму ( $S_{sep}$ ), для D и T:

$$N_{core} = N_{sep} + S_{NB} \cdot \tau_{NB} + S_{pel} \cdot \tau_{pel} + S_{sep} \cdot \tau_{sep} - S_{fus} \cdot \tau_{tot}, \quad (1)$$

где  $N_{core} = n_{core} \cdot V_{core}$  – полное число частиц изотопов водорода в основной плазме,  $N_{sep} = n_{sep} V_{core}$ ,  $n_{sep}$  – плотность плазмы на сепаратрисе, полученная из совместного расчета SOLPS и ASTRA, а  $V_{core}$  – объем основной плазмы внутри сепаратрисы. Здесь  $S_{NB}$ ,  $S_{pel}$ ,  $S_{sep}$  и  $S_{fus}$  – интенсивности источников (и стоков) ионов D и T за счет инжекции нейтралов, инжекции пеллет, поступления газа с периферии шнура и термоядерных реакций, а  $\tau_{NB}$ ,  $\tau_{pel}$ ,  $\tau_{sep}$ ,  $\tau_{tot}$  – соответствующие диффузионные времена удержания этих ионов, не различающиеся для D и T, но не равные между собой из-за разной глубины проникновения частиц источника и вычисляемые кодом ASTRA для использования в нульмерных расчетах в FC-FNS. Здесь величины  $\tau_{NB}$ ,  $\tau_{pel}$ ,  $\tau_{sep}$ ,  $\tau_{tot}$  являются результатом параметризации результатов расчетов кодом АСТРА. Использование их позволяет обойтись без многократных обращений к этому коду в процессе согласования параметров топливного цикла, что значительно ускоряет расчеты.

Важно заметить, что в наших расчетах кодом ASTRA коэффициенты диффузии нормируются таким образом, чтобы обеспечить заданные глобальные времена удержания частиц в плазменном шнуре  $\tau_p$ . При этом потери, связанные с “натуральными” ELM, включены в общие диффузионные потери. Неконтролируемые, “натуральные” ELM первого типа, типичные для разрядов с высокой мощностью в H-режиме, понижают температуру плазмы на краю шнура [27]. Это означает, что уход энергии в таких ELM происходит более интенсивно, чем уход частиц  $\delta W_{ELM}/W_{ped} > \delta N_{ELM}/N_{ped}$  (здесь  $W_{ped}$  и  $N_{ped}$  – энергосодержание и полное число частиц в области “пьедестала”, а  $\delta W_{ELM}$  и  $\delta N_{ELM}$  – энергия и количество частиц, выбрасываемые в процессе ELM). В то же время, мелкие (“конвективные”) ELM, получающиеся при стимуляции их частой инжекцией пеллет, не снижают температуру плазмы [27, 28], то есть, для таких ELM  $\delta W_{ELM}/W_{ped} = \delta N_{ELM}/N_{ped}$ . Таким образом, при том же среднем потоке энергии в ELM, потери частиц в стимулированных ELM могут заметно превышать потоки в “натуральных” ELM, соответствующие выбранному значе-



**Рис. 1.** Пример аппроксимации результатов расчетов кодом SOLPS4.3 для пика тепловой нагрузки на диверторную пластину  $q_{pk}$  (а), электронной плотности на сепаратрисе  $n_{sep}$  (б) и потока нейтралов через сепаратрису внутрь плазменного шнура  $S_{sep}$  (в). Сплошные символы и штриховые линии показывают вариацию соответствующего параметра при изменении давления нейтралов в диверторе  $p_n$  для трех различных значений мощности, поступающей в SOL с плазмой, а пустые символы и сплошные линии – соответствующую аппроксимацию скейлингом [25].

нию  $\tau_p$ . Поэтому ниже мы вводим поток  $S_{ELM}$ , описывающий потери частиц за счет стимулированных ELM, считая его много большим, чем поток за счет “натуральных” ELM, и пренебрегая последним [21].

Уход частиц топлива из основной плазмы  $S_{out}$  определяется балансом частиц в ней

$$S_{out} = S_{pel} + S_{sep} + S_{NB} - S_{fus}. \quad (2)$$

Система откачки должна при этом обеспечить удаление всех частиц, подаваемых в камеру – тех, что выходят из основной плазмы, и тех, что остаются на периферии, включая подпитку рабочим газом  $S_{puff}$ , применяемую для управления режимом работы дивертора и, при необходимости, для обеспечения эффективного поглощения мощности ионного циклотронного нагрева

$$S_{pump} = S_{out} + S_{puff} - S_{sep}. \quad (3)$$

Следует учесть, что напуск газа  $S_{puff}$  может, в принципе, не потребоваться, если всех других потоков частиц достаточно для поддержания требуемых параметров в рабочих пределах. Однако оценки, сделанные в [19, 20], указывают на существенное превышение  $S_{puff}$  над потоками  $S_{out}$ .

В работах [19, 20] с использованием совместных расчетов SOLPS, ASTRA и FC-FNS [18] были исследованы значения потоков топливных изотопов в основную плазму. При этом было показано, что инжекция D-пеллет с LFS ведет к изменению изотопного состава в пристеночной плазме и диверторе (поскольку здесь мы не рассматриваем детали распределения плазмы снаружи сепара-

трисы, вся эта область называется “диверторной”, без различия между диверторным слоем (SOL) и собственно дивертором). Подпитка основной плазмы нейтралами из дивертора чувствительна к изотопному составу атомов, которые там присутствуют, поэтому были сделаны оценки для рабочего окна доли трития в диверторе  $f_{div}^T$  для обеспечения параметров основной плазмы с учетом текущего состояния проекта ДЕМО-ТИН. В [26] была также проанализирована зависимость потоков частиц с пеллетами с HFS и LFS от выбранной рабочей точки  $f_{div}^T$ .

Как обсуждалось, только неповрежденные пеллеты могут рассматриваться в качестве источника частиц для подпитки, поскольку только они могут проникать внутрь пьедестала. Определив долю неповрежденных пеллет через  $k_{eff\_HFS}$  (этот коэффициент описывает эффективность подпитки плазмы; мы используем значение  $k_{eff\_HFS} = 0.9$  [7]), получим общий поток, который должен быть обеспечен пеллетами с HFS

$$S_{HFS} = S_{pel}/k_{eff\_HFS}. \quad (4)$$

Поток от фрагментов пеллет вносит вклад только в подпитку пристеночной плазмы и определяется выражением

$$S_{HFS\_puff} = S_{pel}(1/k_{eff\_HFS} - 1). \quad (5)$$

Этот поток вносит свой вклад в давление в диверторе, как было рассмотрено в [19, 20].

Частота инъекции пеллет с HFS может быть представлена в виде

$$f_{HFS} = S_{HFS} / N_{pel,HFS}, \quad (6)$$

где  $N_{pel,HFS} = V_{pel,HFS} \rho_{pel}$  — количество частиц в пеллете объемом  $V_{pel,HFS}$  (мм<sup>3</sup>) из D<sub>2</sub>/T<sub>2</sub> плотностью  $\rho_{pel}$ , а  $m$  — масса атома материала пеллеты.

Формирование ELM связано с конвективными потерями частиц из основной плазмы, которые для малых ELM пропорциональны потерям энергии в ELM

$$\delta N_{ELM} = N_{ped} \delta W_{ELM} / W_{ped}. \quad (7)$$

Здесь  $N_{ped} = V_{core} n_{ped}$  и  $W_{ped} = 1.5 V_{core} P_{ped}$  — полное содержание частиц и энергии в пьедестале,  $P_{ped}$  — давление плазмы в пьедестале для H-режима. Таким образом, усредненный по времени уход частиц из основной плазмы, связанный стимулируемыми ELM, может быть выражен как

$$S_{ELM} = f_{ELM} \delta N_{ELM} = \alpha_{ELM} P_{SOL} (N_{ped} / W_{ped}) \quad (8)$$

Частота ELM, необходимая для получения допустимого значения  $\delta W_{ELM}$ , определяется величиной  $\alpha_{ELM}$  — долей мощности, поступающей в SOL из основной плазмы ( $P_{SOL}$ ), которая переносится в ELM [29, 30]

$$f_{ELM} = \alpha_{ELM} P_{SOL} / \delta W_{ELM}. \quad (9)$$

Тогда частота инъекции пеллет, достаточная для поддержания контролируемых потерь энергии  $\delta W_{ELM}$  в ELM, равна

$$f_{pel} = f_{ELM} = f_{HFS} + f_{LFS}. \quad (10)$$

Поскольку топливные HFS-пеллеты, используемые для подпитки основной плазмы, также инициируют ELM, это снижает требования к стимуляции ELM за счет инъекции с LFS [31]. Тогда поток частиц, обеспечиваемый LFS-пеллетами (для стимуляции ELM), определяется необходимой частотой инъекции пеллет для достижения контролируемой частоты ELM ( $f_{pel}$ ) с учетом инъекции с HFS:

$$S_{LFS} = (f_{pel} - f_{HFS}) N_{pel,LFS}. \quad (11)$$

Инъекция пеллет со стороны слабого магнитного поля создает поток частиц  $S_{LFS}$  в плазму плюс дополнительный поток сопутствующего газа и разрушенные пеллет  $S_{LFS} (1/k_{eff,LFS} - 1)$ , который еще больше увеличивает газовую нагрузку в системе откачки. Хотя направляющие трубки могут быть короче, чем для HFS-инъекции, что уменьшает разрушение пеллет при движении по направляющим, размеры LFS-пеллет меньше и,

соответственно, коэффициент  $k_{eff,LFS} < k_{eff,HFS} < 1$  (мы используем значение  $k_{eff,LFS} = 0.5$  [7]).

Следует отметить, что при сохранении источника частиц от пеллет (HFS + LFS), может измениться соотношение  $S_{HFS}/S_{LFS}$  и общий поток, который должна обеспечивать система пеллет-инъекции  $S_{HFS} + S_{LFS}$ , вместе с изменениями размеров пеллет. Так, увеличение размера топливных пеллет снизит частоту HFS-инъекции при заданном топливном потоке  $S_{HFS}$  как  $f_{HFS} \sim 1/V_{pel,HFS}$ . Это снижение частоты должно быть компенсировано увеличением частоты LFS инъекции  $f_{LFS} = f_{pel} - f_{HFS}$ . Следовательно, использование пеллет большего размера при фиксированном размере LFS-пеллет приведет к увеличению общего потока топлива. Уменьшение при этом размеров LFS-пеллет (при условии достаточности их размера для инициирования ELM) приведет к снижению потока  $S_{LFS}$ . Тем не менее, общий поток, который обеспечивает система пеллет-инъекции, не может быть снижен таким образом. Видно, что с точки зрения общего потока DT через систему пеллет-инъекции, более выгодны HFS-пеллеты меньшего размера. Между тем, более крупные пеллеты имеют большую механическую прочность при движении с большими скоростями и могут обеспечивать подпитку основной плазмы с большей эффективностью [6, 11]. Таким образом, требуется оптимизация размеров пеллет для HFS- и LFS-инъекции (выше минимального для инициирования ELM) с учетом потерь частиц из пеллет в плазме для определения оптимального значения, при котором будет достигнут баланс между эффективностью подпитки топливом основной плазмы и величиной суммарного потока DT. Эта оптимизация выходит за рамки данной работы.

#### 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПЕРАЦИОННОГО ОКНА ПАРАМЕТРОВ С УЧЕТОМ ELM

При проектировании ДЕМО-ТИН и выборе конструкционных материалов было предложено отказаться от использования вольфрама в качестве обращенного к плазме материала для уменьшения влияния тяжелой примеси на основную плазму. В связи с этим, для защиты первой стенки токамака и элементов дивертора, принимающих экстремальные потоки мощности, планируется использовать бериллий и/или жидкометаллические технологии с литием [32]. При этом должна быть обеспечена работа установки в требуемом диапазоне тепловых воздействий на обращенные к плазме компоненты и конструкционные материалы.

Для базового сценария работы ДЕМО-ТИН при  $Q \sim 1$ ,  $n_{ped} \sim 4.67 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ ,  $I_{pl} = 5 \text{ МА}$ ,  $B_t = 5 \text{ Тл}$ ,  $P_{SOL} \sim 40 \text{ МВт}$ , значения давления плазмы в пье-

дестале в Н-режиме ДЕМО-ТИН могут быть оценены как  $p_{ped} = C_p I_{pl}^{1.5} B_t^{0.5} (2/a)^{1.5}$  (кПа) [33, 34], где коэффициент  $C_p = 0.8$ ,  $I_{pl}$  – ток в плазме (МА),  $B_t$  – магнитное поле на оси установки (Тл),  $a$  – малый радиус плазмы (м), тогда  $p_{ped} \sim 50$  кПа =  $0.05$  МДж м<sup>-3</sup>. Для объема основной плазмы  $V_{core} = 120$  м<sup>3</sup> получим  $W_{ped} = 1.5 V_{core} p_{ped} = 9$  МДж. Если принять  $\delta W_{ELM} \sim 0.5$  МДж, как в ИТЭРе [35] (примерно та же плотность энерговыделения на приемных пластинах – большой радиус вдвое меньше, ширина диверторного слоя вдвое больше), то  $\delta W_{ELM}/W_{ped} = 0.06$ , что соответствует небольшим конвективным ELM [27]. В действительности, величина  $\delta W_{ELM}$  требует уточнения, поскольку в работе [35] рассматривался вольфрамовый дивертор. Для бериллиевого дивертора она может быть меньше, то есть, условие конвективности выполняется и в этом случае. Поскольку детального исследования предельных нагрузок для бериллиевых диверторных пластин пока не проводилось, в настоящей работе принято  $\delta W_{ELM} \sim 0.5$  МДж.

Для  $\alpha_{ELM} = 0.2$ , выбранного в качестве оптимистичного значения согласно экспериментальным измерениям [29], частота инъекции пеллет HFS + LFS должна быть  $f_{pel} = f_{ELM} = 0.2$   $P_{SOL}/\delta W_{ELM} \sim 15$  Гц, что более чем на порядок выше оценок [11, 19, 20, 26], сделанных ранее без учета ELM. Поток частиц из плазмы, вызванный конвективными ELM,

$$S_{ELM} = \alpha_{ELM} P_{SOL} (N_{ped}/W_{ped}) \sim \sim 5 \times 10^{21} \text{ с}^{-1} = 9 \text{ Па м}^3 \text{ с}^{-1} \quad (12)$$

для частиц D и T. Полученное значение превышает рассчитанные в [19, 20, 26] потери из плазмы  $S_{out}$ , соответствующие режимам с “натуральными” ELM, в 2–4 раза. То есть, в режимах с контролируруемыми ELM глобальное время удержания частиц должно отличаться от рассмотренных нами ранее. Такие режимы требуют больших потоков частиц для подпитки плазмы и, соответственно, увеличения производительности систем ТЦ – именно в связи с этим проведение данного исследования имеет высокую важность.

Основываясь на соображениях, описанных выше, можно оценить операционное окно параметров для ДЕМО-ТИН, в котором параметры дивертора и контроль ELM могут быть обеспечены одновременно с требуемой рабочей плотностью основной плазмы. Для работы ДЕМО-ТИН в стационарном режиме необходимо обеспечить Н-режим с дополнительным нагревом  $P_{aux} = 36$  МВт (30 МВт NBI и 6 МВт ECR). В работах [20, 26] было найдено рабочее окно параметров дивертора с учетом условия частичного детачмен-

та диверторной плазмы и приемлемых нагрузок в диверторе, а также требуемая скорость откачки: нормированное давление газа в диверторе  $\mu = 0.7–0.87$  (полный детачмент при  $\mu = 1$ ),  $C_{pump} = 20$  м<sup>3</sup> с<sup>-1</sup>. Инжекция DT-смеси топливными системами выбрана таким образом, чтобы обеспечить долю трития в основной плазме  $f_{core}^T = 0.5$ .

Чтобы определить дополнительные ограничения, накладываемые стимуляцией ELM на рабочее окно параметров, рассмотрим три сценария с одинаковыми требованиями к основной плазме и одинаковой пиковой мощностью на пластинах дивертора

– Сценарий А – базовый сценарий без стимуляции ELM;

– Сценарий Б – компенсация конвективных потерь частиц в ELM без их дополнительной стимуляции;

– Сценарий В – с дополнительной стимуляцией ELM.

Для расчета подпитки топливными пеллетами и для потерь частиц из плазмы в ELM примем модель со стационарными потоками частиц и фиксированными радиальными профилями источников и стоков частиц [20, 26].

С появлением конвективных ELM инъекция дополнительных топливных пеллет позволяет поддерживать плотности основной плазмы – то есть, они компенсируют увеличившиеся потери частиц

$$(S_{pel(LFS)} + S_{pel(HFS)}) - S_{pel(HFS)}^* = S_{ELM} - S_{ELM}^*, \quad (13)$$

где  $S_{ELM}$  и  $S_{ELM}^*$  определяют величину потерь частиц из основной плазмы за счет управляемых (конвективных) и натуральных ELM соответственно. Следовательно, величина  $S_{pel(HFS)}^*$  будет соответствовать Сценарию А с натуральными ELM, когда

$$S_{ELM}^* = f_{ELM} \delta N_{ELM} = \gamma \alpha_{ELM} P_{SOL} N_{ped}/W_{ped} = \gamma \alpha_{ELM} P_{SOL}/(3T_{ped}), \quad \gamma \ll 1, \quad (14)$$

поскольку  $N_{ped}/W_{ped} = n_{ped} V_{ped}/(3n_{ped} T_{ped} V_{ped})$ . Если пренебречь изменением профилей при интенсивной инъекции пеллет и считать, что параметры пьедестала не изменяются, то плотность основной плазмы (1) можно оценить величиной

$$N_{core} = N_{sep} + S_{NB} \tau_{NB} + (S_{pel(LFS)} + S_{pel(HFS)} - (S_{ELM} - S_{ELM}^*)) \tau_{pel} + S_{sep} \tau_{sep} - S_{fus} \tau_{tot} \quad (15)$$

Здесь мы считаем, что LFS пеллеты не вносят непосредственного вклада в подпитку центральной части плазменного шнура, а только компенсируют дополнительные потери частиц на краю шнура, позволяя поддерживать прежнюю плотность на пьедестале. Принципиальное отличие этого источника частиц от  $S_{sep}$  состоит в том, что он работает только во время всплесков ELM, тогда как  $S_{sep}$  действует все время и подпитывает плазму в промежутках между отдельными ELM.

Из (14) и (8), пренебрегая неизвестной величиной  $\gamma \ll 1$ , получаем

$$(S_{ELM} - S_{ELM}^*) = \alpha_{ELM}(1 - \gamma)P_{SOL}/(3T_{ped}) \cong \alpha_{ELM}P_{SOL}/(3T_{ped}). \quad (16)$$

Из (15) и (16) находим уравнение для  $N_{core}$ :

$$N_{core} = N_{sep} + S_{NB}\tau_{NB} + (S_{pel(LFS)} + S_{pel(HFS)} - \alpha_{ELM}P_{SOL}/3T_{ped})\tau_{pel} + S_{sep}\tau_{sep} - S_{fus}\tau_{tot} \quad (17)$$

Из этого уравнения можно оценить величину  $(S_{pel(LFS)} + S_{pel(HFS)})$ , необходимую для поддержания требуемой плотности  $N_{core}$ . Полный вид нульмерных балансных соотношений, используемых в данной работе, для дейтериевого (D) пучка выглядит следующим образом [21]:

$$N_{core}^T = N_{sep}^T + (S_{pel}^T - \alpha_{ELM}P_{SOL}/3T_{ped}f_{ped}^T) \times \tau_{pel} + S_{sep}^T\tau_{sep} - S_{fus}^T\tau_{tot} \quad (18a)$$

$$N_{core}^D = N_{sep}^D + S_{NB}^D\tau_{NB} + (S_{pel(HFS)}^D + S_{pel(LFS)}^D - \alpha_{ELM}P_{SOL}/3T_{ped}(1 - f_{ped}^T)\tau_{pel} + S_{sep}^D\tau_{sep} - S_{fus}^D\tau_{tot}, \quad (18b)$$

где

$$S_{fus} = S_{fus}^T + S_{fus}^D,$$

$$S_{sep}^T = f_{div}^T S_{sep} \quad (19a)$$

$$S_{sep}^D = (1 - f_{div}^T) S_{sep} \quad (19b)$$

$$S_{out}^T = S_{sep}^T + S_{pel}^T - S_{fus}^T \quad (20a)$$

$$S_{out}^D = S_{sep}^D + S_{pel(HFS)}^D + S_{pel(LFS)}^D + S_{NB}^D - S_{fus}^D. \quad (20b)$$

Общее время удержания топливных частиц в плазме

$$\tau_p = (N_{core}^T + N_{core}^D)/(S_{sep} + S_{pel}^T + S_{pel(HFS)}^D + S_{pel(LFS)}^D + S_{NB}^D - S_{fus}). \quad (21)$$

Баланс источников частиц в диверторе

$$S_{out}^T + S_{out}^D + S_{puff}^T + S_{puff}^D = c_p P_n + S_{sep}^D + S_{sep}^T, \quad (22)$$

где

$$S_{puff}^T = S_{HFS}^T(1/k_{eff\_HFS} - 1) + S_{GIS}^T \quad (23a)$$

$$S_{puff}^D = S_{NB}^D(1/k_{eff\_NBI} - 1) + S_{pel(HFS)}^D(1/k_{eff\_HFS} - 1) + S_{pel(LFS)}^D(1/k_{eff\_LFS} - 1) + S_{GIS}^D, \quad (23b)$$

где  $S_{GIS}^{T,D}$  поток от газонапуска в вакуумную камеру.

Баланс частиц в диверторной зоне определяет долю трития в этой области  $f_{div}^T$ . В предположении, что времена удержания в диверторе для T и D одинаковые, имеем:

$$f_{div}^T = (S_{out}^T + S_{puff}^T)/(S_{out}^D + S_{puff}^D + S_{out}^T + S_{puff}^T). \quad (24)$$

Доля трития в пьедестале  $f_{ped}^T$  (т.е., на краю основной плазмы внутри сепаратрисы, где формируются ELM) определяется из условия:

$$N_{core}^T/N_{core} = f_{core}^T. \quad (25)$$

Для D + T пучка в уравнении (18a) добавится член  $S_{NB}^T\tau_{NB}$ , в уравнении (20a) —  $S_{NB}^T$ , в уравнении (21) —  $S_{NB}^T$ , а в уравнении (23a) —  $S_{NB}^T(1/k_{eff\_NBI} - 1)$ . В остальной система из 12 уравнений (18)–(25) с 12 неизвестными ( $S_{pel}^T, S_{pel(HFS)}^D, S_{pel(LFS)}^D, S_{sep}^T, S_{sep}^D, S_{out}^T, S_{out}^D, S_{puff}^T, S_{puff}^D, S_{GIS}^T, S_{GIS}^D, f_{ped}^T$ ) для D + T и D пучков совпадает. Для Сценария А примем  $S_{ELM} = S_{ELM}^*$ , в Сценарии Б  $S_{pel(LFS)} = 0$ .

#### 4.1. Сценарий А

Это идеальный случай, в котором инжекция пеллет с LFS для стимуляции ELM не предусмотрена, а инжекция топливных пеллет с HFS не меняет характер ELM. В этом случае потери частиц из основной плазмы соответствуют принятым временам удержания частиц. Считаем, что  $k_{eff\_HFS} < 1$ , т.е. часть потока частиц от пеллет с HFS (фрагментов от их разрушения) не проникает в пьедестал и не подпитывает основную плазму, но подпитывает SOL, как и нейтралы из дивертора.

Ранее кодами ASTRA и SOLPS было найдено окно допустимых параметров для ДЕМО-ТИН с учетом согласованного баланса гелия в основной и диверторной плазме и примеси Ne в диверторе. Было показано заметное снижение давления ней-

**Таблица 1.** Значения времен удержания частиц для различных источников, полученные из кода ASTRA (для  $\tau_p/\tau_E = 4$ )

$\langle n_e \rangle, 10^{19} \text{ м}^{-3}$	$\tau_{NB}, \text{ с}$	$\tau_{pel}, \text{ с}$	$\tau_{sep}, \text{ с}$	$\tau_{tot}, \text{ с}$	$\tau_E, \text{ с}$
6.00	1.90	1.60	0.37	0.71	0.77
7.00	1.86	1.81	0.49	1.03	0.73
8.00	2.15	1.98	0.56	1.23	0.69

**Таблица 2.** Параметры из кода ASTRA, используемые для FC-FNS при моделировании ТЦ

$\langle n_e \rangle, 10^{19} \text{ м}^{-3}$	$N_{core}, 10^{19}$	$S_{NB}, 10^{19} \text{ с}^{-1}$	$S_{sep}, 10^{19} \text{ с}^{-1}$	$P_{SOL}, \text{ МВт}$	$P_{fus}, \text{ МВт}$	$S_{neut}, 10^{19} \text{ с}^{-1}$
6.0	730	37	221	38	36	1.3
7.0	850	37	222	37	31	1.1
8.0	970	37	225	35	25	0.9

тралов в диверторе и сужение окна допустимых параметров из-за нарушения симметрии вверх-вниз (по сравнению со случаем без учета He [12, 20]). Для разработанной модели основной и диверторной плазмы, аналогично [26], кодом ASTRA были найдены стационарные решения при изменении значения плотности плазмы ДЕМО-ТИН и рассчитаны характерные времена удержания частиц. Полученные значения времен удержания  $\tau_{NB}$ ,  $\tau_{pel}$ ,  $\tau_{sep}$ ,  $\tau_{tot}$  и  $\tau_E$ , потоков частиц от источников  $S_{NB}$  и  $S_{sep}$ , величины нейтронного потока  $S_{neut}$ , суммарной мощности синтеза  $P_{fus}$  и доли мощности, поступающей в SOL из основной плазмы  $P_{SOL}$ , используемые в расчетах FC-FNS, приведены в табл. 1 и 2. На основании полученных результатов в данной работе проведена модификация кода FC-FNS для согласования всех параметров с плотностью основной плазмы при различных параметрах топливной инжекции.

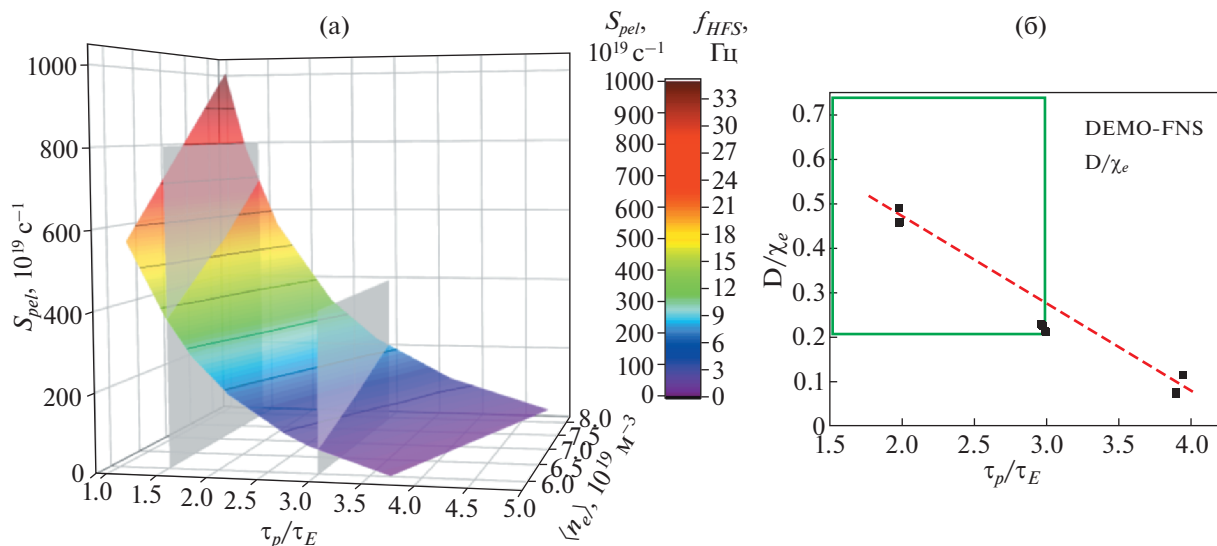
Расчеты потоков частиц в системах топливного цикла (ТЦ) установки ДЕМО-ТИН, проведенные с использованием кода FC-FNS для различных вариантов изотопного состава газа в нагревных инжекторах, позволили проанализировать зависимость величины источника  $S_{pel}$  от плотности основной плазмы  $\langle n_e \rangle$  и времени удержания частиц в плазме, характеризуемого отношением  $\tau_p/\tau_E$ , и определить частоты инжекции HFS пеллет  $f_{HFS}^{D,T}$ , необходимые для обеспечения требуемого источника  $S_{pel}^{D,T}$ .

Очевидно, что размер пеллет должен быть достаточно малым, чтобы не создавать значительных возмущений величины плотности плазмы. Четкая граница здесь не установлена, и в наших расчетах мы считаем, что в каждой пеллете должно содержаться частиц не больше 10% от их коли-

чества в плазме – как было предложено в [26]. Это означает ограничение размера пеллет величиной  $N_{pel} \leq 5.0-7.0 \times 10^{20}$  (или  $V_{pel,HFS} \leq 10-15 \text{ мм}^3$  с учетом разницы линейных размеров криогенных пеллет для D и T).

Полученные зависимости представлены на рис. 2а. Для всех значений плотности наблюдается рост величины источника при уменьшении  $\tau_p/\tau_E$ . Результаты в значительной степени совпадают с оценками, сделанными в [20]. На основании соображений, основанных на экспериментальных данных и изложенных в [31, 36], в данной работе мы рассматриваем диапазон  $\tau_p/\tau_E \sim 1.5-3.0$ , что соответствует отношению коэффициентов диффузии и теплопроводности  $D/\chi_e = 0.3-0.5$  (см. рис. 2б) [25]. Таким образом, рабочая точка ( $\tau_p/\tau_E = 4.0$ ,  $\langle n_e \rangle = 7.0 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ ), проанализированная ранее в работе [26], оказывается за пределами вероятного диапазона  $\tau_p/\tau_E$ . Видно, что при увеличении  $\langle n_e \rangle$  величина  $S_{pel}$  увеличивается (при практически неизменном значении  $S_{sep}$ ), что приводит к расширению диапазона рабочих значений  $f_{div}^T$ , в котором реализуются требуемые параметры  $N_{core}$  и  $f_{core}^T = 0.5$  [26]. Так, если для параметров плазмы, рассмотренных в [26] рабочий диапазон  $f_{div}^T$  не совпадал для разных вариантов нагревного пучка, то в окне параметров, обсуждаемых в этой работе, диапазоны  $f_{div}^T$  для  $D^0 + T^0$  и  $D^0$  практически не отличаются. В этом диапазоне обеспечивается требуемая доля трития в основной плазме при инжекции потоков частиц D и T в пеллетах ( $S_{pel}^T$  и  $S_{pel}^D$ ) и инжекции газа в вакуумную камеру ( $S_{GIS}^T$  и  $S_{GIS}^D$ ).





**Рис. 2.** (а) Величина суммарного источника частиц  $S_{pel}$  и суммарной частоты инжекции D/T-пеллет  $f_{HFS}$ , необходимых для обеспечения требуемого источника, в зависимости от времени удержания частиц в плазме  $\tau_p/\tau_E$  и значения плотности плазмы  $\langle n_e \rangle$  и (б) отношение коэффициентов диффузии и теплопроводности, соответствующее разным значениям  $\tau_p/\tau_E$ . Шкала в середине указывает на соответствие цвета и значений  $S_{pel}$ ,  $f_{HFS}$ . Рамочка на рис. 2б показывает вероятные границы величины отношений  $\tau_p/\tau_E$  и  $D/\chi_e$  [31]. Вертикальными плоскостями на рис. 2а показаны границы рабочего диапазона в соответствии с выбранным коэффициентом диффузии (рис. 2б).

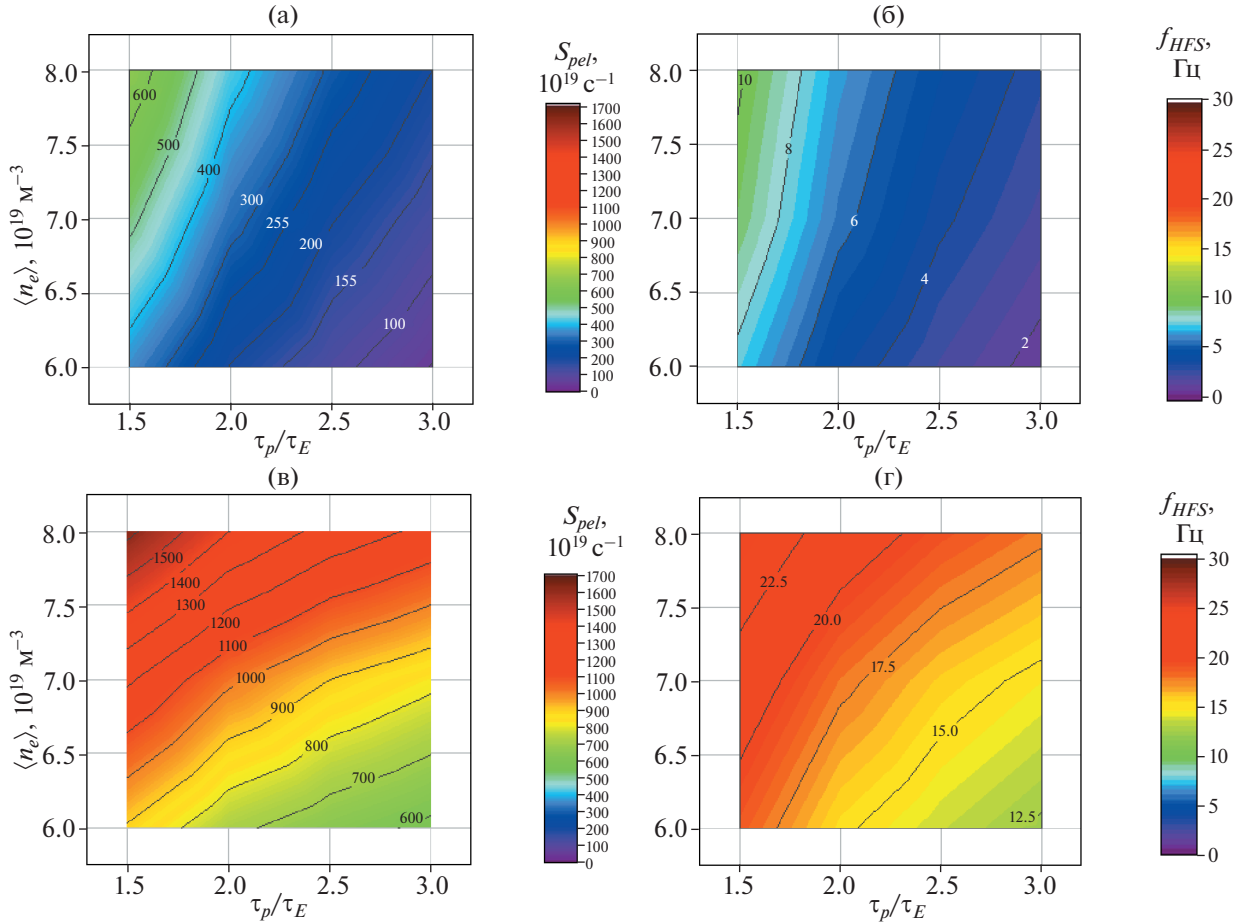
### 4.2. Сценарий Б

В сценарии А предполагалось, что характер ELM при инжекции топливных пеллет не меняется,  $\delta W_{ELM}/W_{ped} > \delta N_{ELM}/N_{ped}$ . Если это не так, и  $\delta W_{ELM}/W_{ped} \cong \delta N_{ELM}/N_{ped}$ , что может произойти, если частота инжекции заметно превышает частоту “натуральных” ELM, то потери частиц из основной плазмы резко возрастают и может потребоваться увеличение подпитки для компенсации этих потерь. Оценим этот эффект. Как и в предыдущем случае, будем считать, что  $k_{eff\_HFS} < 1$  и что дополнительной стимуляции ELM не требуется.

Чтобы поддерживать плотность плазмы на пьедестале выше плотности на сепаратрисе, подпитка топливом основной плазмы должна быть больше, чем потери оттуда. Это означает, что величина  $S_{out}$  должна быть больше чем потери  $S_{ELM}$ . В соответствии с этим, при уменьшении времени удержания или увеличении  $\langle n_e \rangle$ , величина источника от пеллет возрастет относительно оценок, сделанных в [11, 17, 19, 20, 26]. Увеличение суммарного потока  $S_{pel}$  приведет к увеличению потерь массы пеллет в периферийной области плазмы  $S_{pel} (1/k_{eff\_HFS} - 1)$  и снижению  $S_{GIS}$ . Это логично, так как в ТЦ предполагается непрерывная циркуляция топлива для его многократного использования, и большая часть потока  $S_{pump}$  должна направляться в систему газонапуска ( $S_{GIS}$ ) по-

сле очистки газовой смеси от примесных газов. Малая часть потока  $S_{pump}$  проходит разделение на отдельные изотопы и инжектируется в виде пеллет (лед  $D_2$  и  $T_2$ ) в плазму – при этом необходимая производительность системы разделения зависит от  $S_{HFS}$ . Таким образом, для удовлетворения возросших потребностей  $S_{HFS}$  поток топливных изотопов будет направлен в систему разделения изотопов (при снижении  $S_{GIS}$ ). При этом производительность системы разделения изотопов водорода должна оцениваться по величине  $S_{HFS}^T + S_{HFS}^D$ . Поскольку с увеличением производительности системы (диаметра разделительных колонн) будет возрастать накопление Т в них, по-видимому, могут потребоваться изменения в архитектуре ТЦ для обеспечения приемлемых величин содержащегося в системах ТЦ трития. Данная оптимизация выходит за рамки настоящей работы. В расчетах ASTRA мы основываемся на экспериментальных скейлингах для  $\tau_E$ , подбирая модель переноса. Эти скейлинги получены для Н-режима без стимуляции ELM. То есть, они учитывают потери энергии с “большими” ELM, в которых  $\delta W_{ELM}/W_{ped} \gg \delta N_{ELM}/N_{ped}$ . Поэтому считаем, что параметр  $\tau_p$ , который мы варьируем, описывает потери частиц без ELM, то есть, он соответствует удержанию в центральной части шнура.

В случае стимулированных ELM, потери энергии предполагаются (на основании эксперимен-



**Рис. 3.** Величина источника от пеллет  $S_{pel}$  с учетом “естественных” ELM (а) и конвективных ELM (в), частота инжекции пеллет (с размером, максимальным для каждой конкретной плотности плазмы)  $f_{HFS}$  (б) и (г) – для Сценариев А и Б, соответственно, в зависимости от времени удержания частиц  $\tau_p/\tau_E$  для различных значений плотности плазмы  $\langle n_e \rangle$  ( $10^{19} \text{ м}^{-3}$ ). Шкалы справа указывают на соответствие цвета на графиках и значений  $S_{pel}, f_{HFS}$ . На рис. (г) пунктирной линией показан уровень  $f_{HFS} = f_{ELM} = 15 \text{ Гц}$ .

тальных наблюдений) теми же,  $P_{ELM} = \alpha_{ELM} P_{SOL}$ , а потери частиц резко растут, так как теперь ELM “маленькие”, конвективные, и  $\delta W_{ELM}/W_{ped} \cong \delta N_{ELM}/N_{ped}$ . Если считать время удержания  $\tau_p^\# = N_{core}/S_{out\#}$ , то  $\tau_p^\# \ll \tau_p$  (здесь # означает “при стимуляции ELM”). При этом удержание в центральной части шнура, описываемое параметром  $\tau_p$ , не меняется, и все дополнительные потоки и источники для их компенсации локализованы на периферии. Это верно для  $S_{LFS}$ , а для  $S_{HFS}$  мы пренебрегаем изменением профиля плотности внутри пьедестала – точнее, между верхом пьедестала и местом, где ионизируются пеллеты с HFS.

Резюмируя, можно сказать, что в этом случае  $\tau_p$  – это не реальное время удержания частиц во всем шнуре, а параметр, характеризующий перенос частиц в центральной части шнура. Зави-

симость  $S_{pel}$  и  $f_{HFS}$  от времени удержания частиц  $\tau_p/\tau_E$  для различных значений плотности плазмы  $\langle n_e \rangle$  для Сценариев А и Б показана на рис. 3. На рис. 3(г) пунктирной линией показан уровень  $f_{HFS} = f_{HFS}^T + f_{HFS}^D = f_{pel} = 15 \text{ Гц}$ .

Значения потоков для Сценариев А и Б приведены в табл. 3 и 4. В табл. 3 представлены потоки частиц D/T из источников  $S_{NB}, S_{pel}, S_{sep}$  и  $S_{out}$  для разных вариантов нагревного пучка,  $D^0 + T^0$  или  $D^0$ , для Сценария А – без учета ELM (включая натуральные – неконвективные ELM) и Сценария Б – с учетом потерь частиц из основной плазмы за счет ELM (конвективных). В табл. 4 представлены потоки частиц в диверторе для Сценариев А и Б для  $\langle n_e \rangle = 6.0\text{--}8.0 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ .

Сопоставление значений из табл. 3 для Сценариев А и Б показывает увеличение требуемой про-

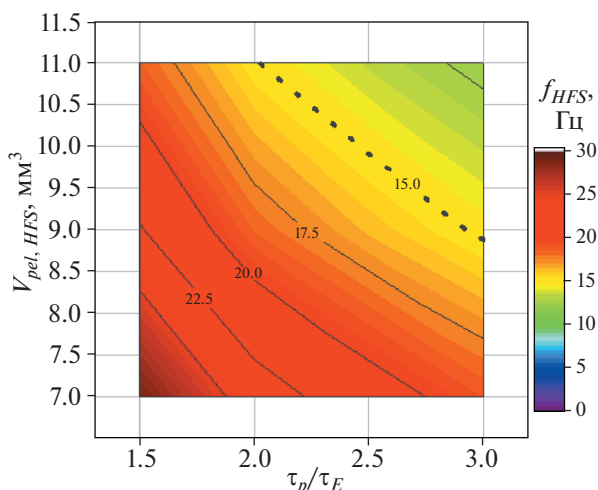
**Таблица 3.** Значения потоков частиц D и T ( $10^{19} \text{ с}^{-1}$ ) из источников  $S_{NB}$ ,  $S_{pel}$ ,  $S_{sep}$  и  $S_{out}$  для разных вариантов нагревного пучка ( $D^0 + T^0$  или  $D^0$ ) для Сценария А – без учета ELM и Сценария Б – с учетом потерь частиц из основной плазмы с ELM

Пучок	$\langle n_e \rangle, 10^{19} \text{ м}^{-3}$	$\tau_p/\tau_E$	Сценарий	$S_{NB}^T$	$S_{NB}^D$	$S_{pel}^T$	$S_{pel}^D$	$S_{sep}^T$	$S_{sep}^D$	$S_{out}^T$	$S_{out}^D$	
$D^0 + T^0$	6.0	1.50	А	19	19	179	179	110	110	307	307	
			Б			445	445			572	572	
		3.00	А			26	26			153	153	
			Б			290	290			417	417	
		7.0	1.50	А	19	19	260	260	111	111	388	388
				Б			608	608			737	737
	8.0	3.00	А			64	64			192	192	
			Б			412	412			540	540	
		1.50	А	19	19	326	326	112	112	455	455	
			Б			812	812			942	942	
		3.00	А			99	99			229	229	
			Б			587	587			717	717	
$D^0$	6.0	1.50	А	0	38	200	159	110	110	308	305	
			Б			466	423			575	569	
		3.00	А			45	7			153	153	
			Б			312	268			420	414	
		7.0	1.50	А	0	38	279	241	111	111	389	388
				Б			627	589			737	736
	8.0	3.00	А			83	44			193	192	
			Б			431	393			541	540	
		1.50	А	0	38	345	306	112	112	456	455	
			Б			832	793			943	941	
		3.00	А			119	80			229	229	
			Б			607	567			718	715	

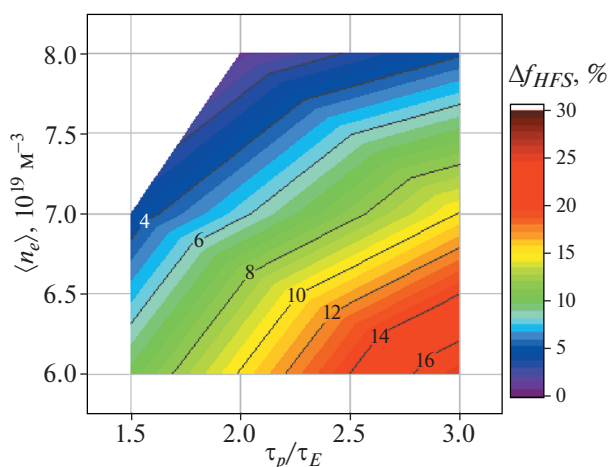
изводительности систем пеллет-инжекции, разделения изотопов водорода и ряда других систем ТЦ при увеличении потока  $S_{HFS}$  в рабочем диапазоне параметров относительно оценок, сделанных для Сценария А без учета ELM – до 12 раз. Увеличение  $S_{HFS}$  приводит к снижению  $S_{GIS}$  до 14 раз (см. табл. 4). При этом допустимый диапазон значений  $f_{div}^T$  (в котором  $S_{HFS}^T > 0$  и  $S_{HFS}^D > 0$ ) оказывается шире, чем для Сценария А, за счет

возрастания  $S_{HFS}$ . То есть, при отклонении  $f_{div}^T$  от значения 0.5, частоты  $f_{HFS}^T$  и  $f_{HFS}^D$  могут быть подобраны для поддержания  $f_{core}^T = 0.5$ .

Выше мы оценили частоту инъекции пеллет  $f_{pel} = 15$  Гц, достаточную для поддержания контролируемой энергии отдельных ELM  $\delta W_{ELM} \sim \sim 0.5$  МДж. Удовлетворить условие на необходимую частоту стимуляции ELM  $f_{pel}$  можно, в прин-



**Рис. 4.** Зависимость суммарной частоты инъекции топливных пеллет от их размеров  $V_{pel,HFS}$  ( $\text{мм}^3$ ) для различных значений времени удержания частиц в плазме  $\tau_p/\tau_E$  (для  $\langle n_e \rangle = 6.0 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ ). Шкала справа указывает на соответствие цвета и значений  $f_{HFS}$ . На рис. пунктирной линией показан уровень  $f_{HFS} = f_{ELM} = 15$  Гц.



**Рис. 5.** Относительное изменение частоты  $f_{HFS}^D$  топливной HFS-инъекции D для максимального размера LFS- и HFS-пеллет. Шкала справа указывает соответствие цвета и значений  $\Delta f_{HFS}^D$  (%) для обоих вариантов нагревного пучка –  $D^0 + T^0$  и  $D^0$ .

ципе, и не прибегая к инъекции с LFS – за счет уменьшения размеров топливных пеллет. Зависимость частоты инъекции топливных пеллет от их размеров приведена на рис. 4 (для  $\langle n_e \rangle = 6.0 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ ) для различных времен удержания частиц в плазме. Видна довольно очевидная обратная зависимость частоты от размера пеллеты – вместе с тем, как обсуждалось выше по тексту, пеллеты меньшего размера могут иметь недостаточную механическую прочность. В данной работе оптимизация размера топливных пеллет не проводится, и этот размер принимается макси-

мально возможным для каждого значения плотности плазмы (см. выше) – например, для  $\langle n_e \rangle = 6.0 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ ,  $V_{pel,HFS}(\text{max}) = 11 \text{ мм}^3$ .

При использовании пеллет такого – то есть, зависящего от  $n_e$  – размера, в большей части диапазона  $\langle n_e \rangle$  суммарная частота инъекции  $f_{HFS}^D + f_{HFS}^T < f_{pel} = 15$  Гц – т.е., она недостаточна для поддержания контролируемых потерь энергии  $\delta W_{ELM}$  в ELM, что видно на рис. 3. Следовательно, для рассматриваемого диапазона параметров

**Таблица 4.** Значения потоков частиц D и T ( $10^{19}$  1/с) в диверторе для разных вариантов нагревного пучка ( $D^0 + T^0$  или  $D^0$ ) для Сценария А – без учета ELMs и Сценария Б – с учетом потерь частиц из основной плазмы с ELM

Пучок	$\langle n_e \rangle, 10^{19} \text{ м}^{-3}$	$\tau_p/\tau_E$	Сцена-рий	$S_{GIS}^T$	$S_{GIS}^D$	$S_{puff}^T$	$S_{puff}^D$
$D^0 + T^0$	6.0	1.50	А	747	747	769	769
			Б	452	452	504	504
		3.00	А	918	918	923	923
			Б	625	625	659	659
	7.0	1.50	А	658	658	689	689
			Б	271	271	340	340
		3.00	А	876	876	885	885
			Б	489	489	537	537
	8.0	1.50	А	585	585	623	623
			Б	44	44	136	136
		3.00	А	836	836	849	849
			Б	294	294	361	361
$D^0$	6.0	1.50	А	747	750	769	772
			Б	450	456	502	508
		3.00	А	919	919	924	924
			Б	625	625	659	659
	7.0	1.50	А	658	659	689	690
			Б	271	272	341	342
		3.00	А	876	877	885	886
			Б	489	489	537	537
	8.0	1.50	А	585	586	623	624
			Б	44	46	136	138
		3.00	А	837	837	850	850
			Б	294	296	362	363

необходимо применять дополнительную стимуляцию ELM.

#### 4.3. Сценарий В

В этом сценарии учитываются дополнительные потери частиц, вызванные стимулируемыми ELM. Предполагается, что источник частиц, связанный с пеллетами с LFS, используемыми для стимуляции ELM, имеет эффективность  $k_{eff\_LFS} < 1$ , что усиливает его влияние на SOL.

Рассматривать влияние дополнительной стимуляции ELM с различными размерами LFS пеллет целесообразно как для области параметров, где  $f_{HFS} < 15$  Гц, так и на случай изменения значений  $\alpha_{ELM}$  и/или  $\delta W_{ELM}$  – в этом случае частота  $f_{ELM}$  возрастает и частоты топливной инъекции  $f_{HFS}$  недостаточны для стимуляции ELM с требуемыми параметрами ( $f_{HFS} < f_{ELM}$ ).

При дополнительной LFS-инъекции, обеспечивающей необходимую подпитку области пьеды-

**Таблица 5.** Частота топливной инжекции D (HFS) с учетом дополнительной инжекции D (LFS) для стимуляции ELM в зависимости от размеров пеллет  $V_{pel,LFS}$  (для разных вариантов нагревного пучка ( $D^0 + T^0$  и  $D^0$ ) при соблюдении условия  $f_{HFS} + f_{LFS} = f_{ELM}$

Пучок	$\langle n_e \rangle, 10^{19} \text{ м}^{-3}$	$\tau_p/\tau_E$	$V_{pel,LFS}, \text{ мм}^3$				$f_{ELM}, \text{ Гц}$
			1.0		2.0		
			$f_{HFS}^D, \text{ Гц}$	$\Delta f_{HFS}^D, \%$	$f_{HFS}^D, \text{ Гц}$	$\Delta f_{HFS}^D, \%$	
$D^0 + T^0$	6.0	1.5	18.8	3.1	18.1	6.7	30.4
		3.0	11.6	8.0	10.5	16.9	30.4
	7.0	1.5	24.1	1.4	23.7	2.9	25.0
		3.0	15.7	4.7	14.9	10.1	25.0
	8.0	1.5	26.3	0.4	26.2	0.8	23.4
		3.0	21.8	1.5	21.4	3.3	23.4
$D^0$	6.0	1.5	18.8	3.1	18.1	6.7	30.4
		3.0	11.6	8.0	10.5	17.0	30.4
	7.0	1.5	24.0	1.4	23.6	2.9	25.0
		3.0	15.6	4.8	14.8	10.1	25.0
	8.0	1.5	26.2	0.4	26.0	0.8	23.4
		3.0	21.6	1.5	21.2	3.4	23.4

стала, изменяются требования на величину потока  $S_{pel(HFS)}^D$  от HFS пеллет. При этом, чем меньше абсолютная величина  $S_{pel(HFS)}$ , тем более существенно выглядит изменение частоты  $f_{HFS}$ . Так, при инжекции LFS пеллет размером до  $2 \text{ мм}^3$  в области параметров, где  $f_{HFS} < 15 \text{ Гц}$  (см. рис. 3г), изменение частоты топливной инжекции  $\Delta f_{HFS}^D = (f_{HFS(\delta_{\text{взLFS}}^D) - f_{HFS(cLFS)}^D) / f_{HFS(\delta_{\text{взLFS}}^D)}$  при максимальном размере LFS и HFS пеллет достигает значения 3%.

Изменение критерия  $\delta W_{ELM}$  до величины 0.25 МДж, например, повышает значение  $f_{ELM}$  до  $\sim 30 \text{ Гц}$ . Тогда дополнительная стимуляция ELM оказывается необходима практически во всем окне параметров  $\tau_p/\tau_E$  и  $\langle n_e \rangle$ . Чувствительность значения частоты  $f_{HFS}$  топливной инжекции D к размерам LFS пеллет при удовлетворении условия  $f_{HFS}^T + f_{HFS}^D + f_{LFS}^D = f_{ELM}$  приведена в табл. 5 (поскольку LFS инжекция D не влияет на HFS инжекцию T, зависимости для  $f_{HFS}^T$  не приводятся) и показана на рис. 5. В связи с возрастанием значения  $S_{pel(HFS)}$ , различия между вариантами  $D^0 + T^0$  – и  $D^0$  – нагревного пучка в частотах пел-

лет-инжекции становятся незначительными. Видно, что изменение частоты топливной инжекции  $\Delta f_{HFS}^D$  (при максимальном размере LFS- и HFS-пеллет) достигает значения 17%. Таким образом, влияние дополнительной стимуляции ELM на требования к подпитке основной плазмы может быть существенным при высоких значениях  $f_{LFS}^D$ , что соответствует режимам с низкой плотностью и хорошим удержанием, или ужесточением требований к ослаблению ELM ( $\alpha_{ELM} > 0.2$  и/или  $\delta W_{ELM} < 0.5 \text{ МДж}$ ). Это следует принимать во внимание при выборе рабочей точки.

Чтобы определить требуемый размер пеллет для контроля ELM, надо провести нелинейное МГД-моделирование наподобие [37] для условий плазмы ДЕМО-ТИН и найти зависимость минимального размера пеллет от условий в основной плазме и на пьедестале. В данной работе мы этого не делаем и приводим расчеты для различных размеров LFS-пеллет ( $V_{pel,LFS} < 2 \text{ мм}^3$  или  $N_{pel,LFS} < 9.6 \times 10^{19}$ ), предполагая, что они достаточны для стимуляции ELM.

Как уже упоминалось, для стимуляции ELMs целесообразно использовать пеллеты D. При

этом поток  $S_{LFS}^D$  (а именно,  $S_{LFS}(1/k_{eff\_LFS} - 1)$ ) оказывает влияние на  $f_{div}^T$ , что снижает поток  $S_{puff}^D$ , необходимый для поддержания  $f_{div}^T$  на требуемом уровне. В этом случае пьедестал плотности плазмы поддерживается за счет  $S_{LFS}^D$ , что влияет на  $f_{core}^T$ , и для поддержания последнего приходится увеличивать  $f_{div}^T$ . В связи с этим, диапазон рабочих значений  $f_{div}^T$  (границы диапазона  $f_{div}^T$  соответствуют  $S_{pel}^D = 0$  и  $S_{pel}^T = 0$  [26]) при инжекции пеллет D с LFS оказывается уже, чем для Сценария Б (за счет  $S_{LFS}^D > 0$ ), однако из-за больших абсолютных значений  $S_{HFS}$  эти отличия не будут существенны при выборе частот инжекции D и T.

## 5. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В работе рассмотрено влияние инжекции пеллет (с HFS для подпитки основной плазмы и с LFS для стимуляции ELM) на потоки частиц D и T в системах ТЦ ДЕМО-ТИН.

В результате моделирования кодами ASTRA + SOLPS и FC-FNS показано, что в диапазоне параметров  $1.5 < \tau_p/\tau_E < 3.0$  и  $\langle n_e \rangle = 6.0\text{--}8.0 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$  инжекция пеллет различного изотопного состава обеспечивает требуемую долю трития  $f_{core}^T = 0.5$  в основной плазме ДЕМО-ТИН. Проанализированы потоки компонентов топлива в рабочем окне параметров плазмы в зависимости от  $\tau_p/\tau_E$  и  $\langle n_e \rangle$ . Рассчитанный рабочий диапазон для доли T в диверторе  $f_{div}^T$  позволяет варьировать частоты инжекции пеллет D и T для обеспечения требуемого изотопного состава основной плазмы  $f_{core}^T$  (в случае режимов с  $f_{div}^T$  отличной от  $f_{core}^T$ ).

Рассчитаны потери частиц в ELM для  $\delta W_{ELM} \sim 0.5$  МДж,  $\alpha_{ELM} = 0.2$  и требуемая частота их стимуляции  $f_{ELM} = 15$  Гц. В большей части найденного диапазона частоты инжекции HFS-пеллет, содержащих до 10% количества частиц в плазме ( $N_{pel} \leq 5.0\text{--}7.0 \times 10^{20}$  для  $\langle n_e \rangle = 6.0\text{--}8.0$  соответственно) оказываются ниже полученной оценки  $f_{pel} < f_{ELM} = 15$  Гц. Следовательно, для поддержания контролируемых потерь энергии  $\delta W_{ELM}$  в ELM необходимо применять дополнительную стимуляцию ELM.

Проанализирована зависимость частоты инжекции HFS пеллет от их размеров и времени удержания частиц в плазме. Дополнительная стимуляция ELM путем инжекции LFS-пеллет (для значений  $V_{pel,LFS} \leq 2 \text{ мм}^3$ ) рассмотрена для определения степени влияния на подпитку основной плазмы частицами и частоту  $f_{HFS}$  (при условии

$f_{pel} = f_{HFS} + f_{LFS} = f_{ELM}$ ). Этот эффект следует принимать во внимание при выборе рабочей точки.

Показано, что наименьшие топливные потоки через систему пеллет-инжекции достигаются при использовании минимального размера LFS пеллет, достаточного для инициирования ELM, и HFS-пеллет для подпитки основной плазмы. Увеличение размера топливных пеллет  $N_{pel,HFS}$  обеспечит лучшую эффективность подпитки, но увеличит потоки частиц T/D через системы инжекции и разделения изотопов. Этот вывод чувствителен к предположениям относительно увеличения эффективности подпитки топливом с увеличением размера пеллет, что, в свою очередь, зависит от таких неопределенностей, как количественная оценка проникновения частиц в основную плазму и потерь частиц за счет ELM, инициированных этими пеллетами. Аналогичным образом, полученные оценки могут измениться с учетом требований со стороны методики ICRH-нагрева плазмы – если потребуется значительный дополнительный напуск газа для обеспечения надлежащего согласования излучения антенны с плазмой.

Показано возрастание требуемой производительности систем пеллет-инжекции и разделения изотопов водорода (и ряда других систем ТЦ) с учетом конвективных ELM (при увеличении потока  $S_{pel}$ ) относительно оценок, сделанных ранее – до порядка величины. Это может повлиять на увеличение количества трития в ТЦ установки (в соответствии с текущей структурой ТЦ).

Проведенный анализ возможности топливной подпитки основной плазмы и контроля ELM показывает, что H-режим в ДЕМО-ТИН с  $Q \sim 1$ ,  $P_{aux} = 36$  МВт и высоким потоком мощности из плазмы  $P_{SOL} \sim 40$  МВт при соблюдении требований по тепловым нагрузкам в диверторе и параметрам основной плазмы может быть реализован при инжекции топливных пеллет с HFS в большом диапазоне размеров  $V_{pel,HFS} \leq 15 \text{ мм}^3$  и LFS-пеллет с размером, достаточным для инициирования ELM  $V_{pel,LFS} \leq 2 \text{ мм}^3$ , и в пределах физических ограничений и проектных требований систем ДЕМО-ТИН:  $\mu \leq 1$ ,  $q_{pk} \leq 10 \text{ МВт м}^{-2}$ ,  $\delta W_{ELM} \leq 0.5$  МДж,  $S_{pump} \sim 40\text{--}50 \text{ Па м}^3\text{с}^{-1}$ . Для обеспечения устойчивости работы установки рабочая точка должна выбираться достаточно далеко от инженерных пределов производительности систем откачки и подпитки.

В нашем анализе мы используем некоторые предположения, которые могут повлиять на границы полученного рабочего окна для ДЕМО-ТИН в H-режиме. В частности, мы не определяем минимальный размер пеллеты, достаточный для инициирования ELM, для фиксированных параметров пьедестала, и минимально возможный

размер топливных пеллет. Это представляется нам перспективной задачей.

Расчеты были выполнены в модели, которая не учитывает переходные процессы, вызванные ELM и инжекцией пеллет. Топливная подпитка пеллетами и уход частиц из-за конвективных потерь от ELM нестационарны, что может, в принципе, влиять на эффективность подпитки основной плазмы и, таким образом, изменять рабочее окно, которое мы нашли. Тем не менее, мы не ожидаем большой разницы между нашими результатами и теми, которые могут быть получены с учетом потерь энергии с ELM.

В приведенном выше моделировании мы предполагали, что дополнительный нагрев осуществляется с помощью NBI и ECH. Если используется ICR-нагрев и он требует значительно-го напуска газа, чтобы обеспечить необходимую связь ВЧ-излучения с основной плазмой, то диапазон потоков  $S_{puff}$  должен быть пересмотрен.

Работа частично поддержана Российским научным фондом (грант № 18-72-10162). Результаты моделирования кодом SOLPS4.3 получены с использованием оборудования центра коллективного пользования “Комплекс моделирования и обработки данных исследовательских установок мега-класса” НИЦ “Курчатовский институт”, <http://ckp.nrcki.ru/>.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lang P.T., Blanken T.C., Dunne M., McDermott R.M., Wolfrum E., Bobkov V., Felici F., Fischer R., Janky F., Kallenbach A., Kardaun O., Kudlacek O., Mertens V., Mlynek A., Ploeckl B., Stober J.K., Treutterer W., Zohm H., Asdex Upgrade Team. Feedback controlled, reactor relevant, high-density, high-confinement scenarios at ASDEX Upgrade // Nucl. Fusion. 2018. V. 58. № 3. P. 036001 (13 pp).
2. Ploeckl B., Day C., Lamalle P., Lang P.T., Rohde V., Viezzer E. // Fusion Eng. Des. 2015. 96–97. P. 155.
3. Géraud A., Lennholm M., Alarcon T., Bennett P., Frigione D., Garnier D., Lang P.T., Lukin A., Mooney R., Vinyar I., JET-EFDA contributors // Fusion Eng. Des. 2013. V. 88. P. 1064.
4. Lang P.T., Nakano T., Davis S., Matsunaga G., Pégourie B., Ploeckl B., Treutterer W. // Fusion Eng. Des. 2019. V. 146. P. 91.
5. Combs S.K., Baylor L.R., Meitner S.J., Caughman J.B.O., Rasmussen D.A., Maruyama S. // Fusion Eng. Des. 2012. V. 87. P. 634.
6. Lang P.T., Day C., Fable E., Igitkhanov Y., Köchl F., Mooney R., Pegourie B., Ploeckl B., Wenninger R., Zohm H. // Fusion Eng. Des. 2015. V. 96–97. P. 123.
7. Abdou M., Morley N.B., Smolentsev S., Ying A., Malang S., Rowcliffe A., Ulrickson M. // Fusion Eng. Des. 2015. V. 100. P. 2.
8. Kukushkin A.S., Polevoi A.R., Pacher H.D., Pacher G.W., Pitts R.A. // J. Nucl. Mater. 2011. V. 415. P. S497. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2010.08.050>
9. Wang H., Peng S., Wang X. // 12th International Conference on Tritium Science & Technology (Tritium-2019). 2019. O6B.2.
10. Lang P.T., Conway G.D., Eich T., Fattorini L., Gruber O., Günter S., Horton L.D., Kalvin S., Kallenbach A., Kaufmann M., Kocsis G., Lorenz A., Manso M.E., Marschek M., Mertens V., Neuhauser J., Nunes I., Schneider W., Suttrop W., Urano H., the ASDEX Upgrade Team. // Nucl. Fusion 2004. V. 44. № 5. P. 665.
11. Ananyev S.S., Ivanov B.V., Kuteev B.V. // Fusion Eng. Des. 2020. V. 161. 111940
12. Dnestrovskiy A.Y., Kukushkin A.S., Kuteev B.V., Sergeev V.Y. // Nucl. Fusion. 2019. V. 59. № 9. 096053.
13. Butler B., Lawless R., Jackson T., George R., Lopes J., Davies S., Santucci A., Day C., Giegerich T., Ploeckl B., Shaw R., Hörstemsmeier Y., Neugebauer C. // 12th Intern. Conf. Tritium Science & Technology (Tritium-2019). 2019. O2B.4.
14. ITER 2009 Baseline. Plant Description. 2009.
15. Baylor L., Meitner S., Duckworth R., Gebhart T. // 12th Intern. Conf. Tritium Science & Technology (Tritium-2019). 2019. P2\_44.
16. Ananyev S.S., Spitsyn A.V., Kuteev B.V. // Fusion Eng. Des. 146 (September). 2019. P. 582.
17. Ananyev S.S., Dnestrovskiy A.Y., Kukushkin A.S., Spitsyn A.V., Kuteev B.V. // Fusion Sci. Technol. 2020. V. 76. P. 503.
18. Ananyev S.S., Spitsyn A.V., Kuteev B.V. // Fusion Eng. Des. 2019. V. 138. P. 289.
19. Ananyev S.S., Dnestrovskiy A.Yu., Kukushkin A.S., Spitsyn A.V., Kuteev B.V. // Fusion Eng. Des. 2020. V. 155. P. 111562.
20. Ananyev S.S., Dnestrovskiy A.Yu., Kukushkin A.S., Spitsyn A.V., Kuteev B.V. // Physics of Atomic Nuclei. 2020. V. 83. № 7. P. 1101.
21. Ananyev S.S., Ivanov B.V., Dnestrovskiy A.Yu., Kukushkin A.S., Spitsyn A.V., Kuteev B.V. // Nucl. Fusion. 2021. V. 61. 116062. <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ac28ad>
22. Pereverzev G.V., Yushmanov P.N. // Report ID 282186. Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, 2002.
23. Kukushkin A.S., Pacher H.D., Kotov V., Pacher G.W., Reiter D. // Fusion Eng. Des. 2011. V. 86. P. 2865; <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2011.06.009>
24. Pacher G.W., Pacher H.D., Kukushkin A.S., Pitts R.A. // Nucl. Fusion. 2011. V. 51. 083004. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/51/8/083004>
25. Dnestrovskiy A.Yu., Kukushkin A.S., Kuteev B.V., Sergeev V.Yu. // 28th IAEA Fusion Energy Conf. 10–15 May 2021 (online)
26. Ананьев С.С., Днестровский А.Ю., Кукушкин А.С. // ВАИТ. Сер. Термоядерный синтез. 2020. Т. 43. Вып. 4. С. 96.



27. *Loarte A., Saibene G., Sartori R., Campbell D., Becoulet M., Horton L., Eich T., Herrmann A., Matthews G., Asakura N., Chankin A., Leonard A., Porter G., Federici G., Janeschitz G., Shimada M., Sugihara M., Horten L., Eich T., Herrmann A., Matthews G., Asakura N., Chankin A., Leonard A., Porter G., Federici G., Janeschitz G., Shimada M., Sugihara M.* // Plasma Phys. Control. Fusion. IOP Publishing, 2003. V. 45. № 9. P. 1549.
28. *Lang P.T., Loarte A., Saibene G., Baylor L.R., Becoulet M., Cavinato M., Clement-Lorenzo S., Daly E., Evans T.E., Fenstermacher M.E., Gribov Y., Horton L.D., Lowry C., Martin Y., Neubauer O., Oyama N., Schaffer M.J., Stork D., Suttrop W., Thomas P., Tran M., Wilson H.R., Kavin A., Schmitz O.* // Nucl. Fusion. 2013. V. 53. № 4. P. 043004.
29. *Herrmann A.* Overview on stationary and transient divertor heat loads // Plasma Phys. Contr. Fusion. 2002. V. 44. P. 883.
30. *Leonard A.W., Herrmann A., Itami K., Lingertat J., Loarte A., Osborne T.H., Suttrop W., the ITER Divertor Modeling, Database Expert Group, the ITER Divertor Physics Expert Group* // J. Nucl. Mater. 1999. V. 266–269. P. 109.
31. *Polevoi A.R., Shimada M., Sugihara M., Igitkhanov Y.L., Mukhovatov V.S., Kukushkin A.S., Medvedev S.Y., Zvonkov A.V., Ivanov A.A.* // Nucl. Fusion. 2005. V. 45. 1451.
32. *Sergeev V.Y., Kuteev B.V., Bykov A.S., Gervash A.A., Glazunov D.A., Goncharov P.R., Dnestrovskij A.Y., Khayrutdinov R.R., Klishchenko A.V., Lukash V.E., Mazul I.V., Molchanov P.A., Petrov V.S., Rozhansky V.A., Shpanskiy Y.S., Sivak A.B., Skokov V.G., Spitsyn A.V.* // Nucl. Fusion. 2015. V. 55. 123013.
33. *Hughes J.W., Snyder P.B., Reinke M.L., LaBombard B., Mordijck S., Scott S., Tolman E., Baek S.G., Golfinopoulos T., Granetz R.S., Greenwald M., Hubbard A.E., Marmor E., Rice J.E., White A.E., Whyte D.G., Wilks T., Wolfe S.* // Nucl. Fusion. 2018. V. 58. 112003.
34. *Medvedev S.Yu., Martynov A.A., Kononov S.V., Leonov V.M., Lukash V.E., Khayrutdinov R.R.* // Plasma Physics Reports. 2021. V. 47. P. 1119.
35. *Pitts R.A., Carpentier S., Escourbiac F., Hirai T., Komarov V., Kukushkin A.S., Lisgo S., Loarte A., Merola M., Mitteau R., Raffray A.R., Shimada M., Stangeby P.C.* // J. Nucl. Mater. 2011. V. 415. № 1 SUPPL. P. S957–S964.
36. *Valovič M., Meyer H., Akers R., Brickley C., Conway N.J., Cunningham G., Kirk A., Lloyd B., Patel A., Taylor D., Walsh M.J., the MAST Team* // Nucl. Fus. 2005. V. 45. 942.
37. *Futatani S., Huijsmans G., Loarte A., Baylor L.R., Commaux N., Jernigan T.C., Fenstermacher M.E., Lasnier C., Osborne T.H., Pegourié B.* // Nucl. Fusion. 2014. V. 54. 073008.