

УДК 533.9

СЦЕНАРИЙ ПОДЪЕМА ТОКА ПЛАЗМЫ В ТОКАМАКЕ TRT

© 2021 г. Э. Н. Бондарчук^{a, b}, А. А. Кавин^{a, b, *}, А. Б. Минеев^{a, b, d},
С. В. Коновалов^{b, c}, В. Э. Лукаш^{b, c}, Р. Р. Хайрутдинов^{b, c}^a Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова,
Санкт-Петербург, Россия^b Частное учреждение государственной корпорации по атомной энергии “Росатом”,
“Проектный центр ИТЭР”, Москва, Россия^c НИЦ “Курчатовский институт”, Москва, Россия^d Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: kavin@sintez.niefa.spb.su

Поступила в редакцию 12.04.2021 г.

После доработки 27.05.2021 г.

Принята к публикации 02.06.2021 г.

Представлены результаты моделирования начальной стадии разряда плазмы в токамаке TRT (Tokamak with Reactor Technologies) и индуктивного сценария ввода тока в нее с использованием кодов SCENPLINT, TRANSMAC и DINA. Рассчитаны начальный запас полоидального магнитного потока в центральном соленоиде, расход потока на пробой и расход потока для получения в плазме тока 5 МА за 30 с при ограничениях максимального поля в обмотках соленоида в 14 Тл, а в остальных обмотках менее 7 Тл. В начале сценария плазма имеет лимитерную конфигурацию, вытянутость которой увеличивается от $K \approx 1$ до $K \approx 1.5$. Диверторная конфигурация формируется к 13 с при токе в плазме $I_p \approx 2$ МА. Подъем тока до проектной величины $I_p \approx 5$ МА осуществляется одновременно с формированием равновесной конфигурации с $K \approx 2.0$ при постепенном наращивании плотности плазмы и увеличением мощности ЭЦР-нагрева до 10 МВт.

Ключевые слова: токамак, плазма, моделирование, сценарий, форма плазмы

DOI: 10.31857/S0367292121110160

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в стадии анализа и разной степени проработки находится новое поколение токамаков со сверхпроводниковой магнитной системой: SPARC [1], TRT [2], DTT [3] и JT-60SA [4–6].

Параметры указанных токамаков менялись в ходе проработки (так, размеры SPARC несколько выросли, $R_0 = 1.65 \text{ м} \rightarrow 1.85 \text{ м}$; размеры TRT уменьшились, $R_0 = 3.2 \rightarrow 2.15 \text{ м}$ при росте магнитного поля $B_t = 6 \rightarrow 8 \text{ Тл}$; размеры DTT немного снизились, $R_0 = 2.15 \rightarrow 2.11 \text{ м}$ вместе со снижением тока плазмы $I_p = 6 \rightarrow 5.5 \text{ МА}$).

Уровень инженерной проработки этих установок также различен. С некоторой условностью перечислим установки в порядке роста уровня и детализации разработки: SPARC, TRT, DTT, JT-60SA. При этом создаваемый Японией и Евросоюзом токамак JT-60SA к настоящему времени уже построен и будет введен в эксплуатацию в 2021 г.

Современные значения базовых параметров этих установок приведены в табл. 1.

Наименьшее значение тороидального магнитного поля на оси плазмы в токамаке JT-60SA ($B_t \leq 2.7 \text{ Тл}$), что позволяет использовать в обмотке тороидального поля NbTi. Магнитное поле в центральном соленоиде достигает 9 Тл, для него используется Nb₃Sn. В токамаке DTT с тороидальным полем на оси плазмы 6 Тл и максимальным полем на обмотке 12 Тл естественным является переход на Nb₃Sn (в DTT в зоне центрального соленоида предполагается испытать небольшую вставку из высокотемпературного сверхпроводника (ВТСП)). В токамаках TRT и SPARC с высоким значением тороидального магнитного поля электромагнитная система (ЭМС) проектируется из ВТСП.

Во всех указанных установках подъем тока плазмы индуктивный. Использование сверхпроводимости в ЭМС приводит к дополнительным ограничениям (по сравнению с “теплой” ЭМС) на допустимую скорость изменения поля в центральном соленоиде во времени. В результате,

Таблица 1. Базовые характеристики токамаков SPARC, TRT, DTT и JT-60SA

	R_0 , м	a , м	k_{95}	B_t , Тл	I_p , МА	P_{aux} , МВт	Плазма	Тип с/п
SPARC-2020	1.85	0.57	1.75	12	8.7	11–24(*)	DT, DD	ВТСП
TRT-2020	2.15	0.57	1.8	8	5	40–50	DD	ВТСП
DTT	2.11	0.64	1.8	6	5.5	45	DD	Nb ₃ Sn
JT-60SA	3	1.14	1.8	2.7	5.5(**)	41	DD	NbTi, Nb ₃ Sn

(*)SPARC: значение мощности нагрева плазмы 11 МВт соответствует разряду в H-моде, 24 МВт – в L-моду удержания.

(**)JT-60SA: значение тока плазмы для полностью неиндуктивного режима $I_p = 2.3$ МА.

подъем тока до базового значения, как правило, довольно длительный.

1. ОСОБЕННОСТИ СЦЕНАРИЕВ РАЗРЯДА ПЛАЗМЫ В ТОКАМАКАХ SPARC, JT-60SA И DTT

До изложения базовых сценариев в токамаке TRT коснемся кратко особенностей сценариев в токамаках SPARC, JT-60SA и DTT.

1.1. SPARC

В данной установке предполагается довольно короткий импульс разряда (10 с плато тока) при очень большой скорости подъема тока плазмы I_p (за 10 с подъем тока до 8.7 МА, т.е. средняя скорость подъема тока 0.87 МА/с). Инженерных подробностей реализации такого сценария не приводится [1].

1.2. DTT

Пробой предполагается осуществить в центральной части вакуумного объема, геометрия области пробоя – $R_{bd} = 2.11$ м, $a_{bd} \sim 0.6$ м, $Z_{bd} = 0$. Напряжение на обходе: $U_{bd} = 10.6$ В ($E = 0.8$ В/м), полоидальное поле рассеяния $B_{str} = 30$ Гс.

После пробоя (100 мс) предполагается, что ток плазмы I_p растет до 3 МА за 15 секунд (со средней скоростью 0.5 МА/с) в лимитерной конфигурации с сечением плазмы, меняющимся от круглого к эллиптическому. За период 15–22 с ток растет до 4.3 МА, при этом граница плазмы отдалается от внутренней стенки на 3 см. В течение 22–27 секунды конфигурация плазмы достигает базовых значений $\delta_{95} = 0.3$ и $k_{95} = 1.65$, а ток плазмы $I_p = 5.5$ МА.

На 28-й секунде включается дополнительный нагрев (45 МВт) и происходит переход в H-моду. После 36-й секунды физические параметры предполагаются примерно постоянными вплоть до конца плато (73-я секунда). При этом $q_{axis} = 1.0$, $q_{95} = 2.55$.

В конце плато, ток плазмы I_p выводится со скоростью 100 кА/с (до 500 кА/с) при сохранении однонулевой конфигурации с низкой величиной относительного давления, низкой вытянутостью и контролируемой плотностью (не более 0.5 от предела Гринвальда). Затем конфигурация плазмы переходит в лимитерную с касанием внутренней стенки, и ток плазмы I_p снижается до нуля.

Длительность стадии подъема тока и горения плазмы на плато тока до 100 с. При этом подъем тока плазмы I_p до 5.5 МА занимает 27 с (средняя скорость подъема тока 0.2 МА/с) [3].

1.3. JT-60SA

Базовое значение длительности разряда 100 с. Такая длительность должна достигаться как в режиме чисто *индуктивного* разряда, так и в *гибридном* разряде (индуктивный старт + переход на неиндуктивное поддержание тока) и в т.н. стационарном режиме с неиндуктивным поддержанием тока [6].

Пробой предполагается осуществить на внутреннем обводе, геометрия области пробоя – $R_{bd} = 2.83$ м, $a_{bd} = 1$ м, $Z_{bd} = 0$. Напряжение на обходе: $U_{bd} = 5.3$ В, полоидальное магнитное поле рассеяния $B_{str} = 10$ Гс.

Скорость роста тока на начальной стадии разряда 0.4 МА/с. Максимальный запас потока в полоидальной системе 40 В·с, максимальное значение магнитного поля в соленоиде 9 Тл.

В JT-60SA предполагается исследование плазмы в лимитерной и диверторных конфигурациях с одним (LSN, USN) и двумя нулями (DN) при вытянутости сечения плазмы $k_{95} \leq 1.7–1.8$ и треугольности $\delta_{95} \leq 0.3–0.4$.

2. СЦЕНАРИЙ ПОДЪЕМА ТОКА ПЛАЗМЫ В ТОКАМАКЕ TRT

2.1. Анализ старта разряда в токамаке TRT с помощью кодов SCENPLINT и TRANSMAK

Пробой плазмы в токамаке TRT целесообразно осуществлять на внутреннем обводе камеры,

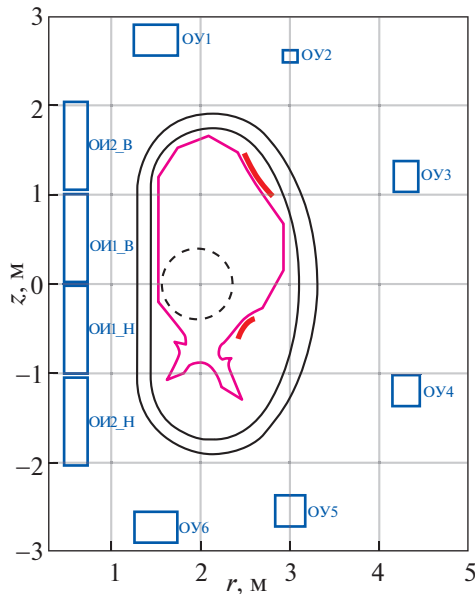


Рис. 1. Полоидальные обмотки, вакуумная камера, лимитер, пассивные витки и область пробоя в токамаке TRT.

поскольку там больше тороидальное магнитное поле и вихревое электрическое поле и легче обеспечить область с низкими полоидальными полями. Полоидальные обмотки, вакуумная камера, лимитер, пассивные витки и область пробоя (выделена пунктиром) токамака TRT показаны на рис. 1. Следует отметить, что все полоидальные обмотки токамака предполагается изготовить из высокотемпературного сверхпроводника.

2.1.1. Математическая модель задачи. Для описания переходных процессов на старте разряда в токамаках используется система обыкновенных дифференциальных уравнений, которая может быть представлена в матричном виде

$$\frac{d(LI)}{dt} + RI = U, \quad (1)$$

где L – матрица индуктивностей, I – вектор токов в контурах с током, R – матрица сопротивлений контуров с токами, U – вектор напряжений на источниках питания полоидальных обмоток. Матрица индуктивностей L полностью определяется геометрией проводящих элементов конструкции токамака и плазмы.

В данной математической модели токамака все проводящие элементы конструкции представляются в виде системы аксиально-симметричных контуров. Это относится как к катушкам полоидального поля, так и к описанию вакуумной камеры и других пассивных проводящих элементов. Что касается матрицы R , то ее элементы полностью определяются проводящими свойствами соответствующих материалов.

Расчетная модель может учитывать дополнительные резисторы в электрических цепях катушек полоидального поля с целью повышения напряжения на них на стадии пробоя плазмы.

Целью решения этой задачи являлось нахождение таких начальных токов полоидальных катушек и программных напряжений на них как функций от времени, которые позволяют реализовать условия пробоя, то есть одновременное формирование в нужный момент времени необходимой величины электрического поля E_{bd} в зоне пробоя и низких рассеянных магнитных полей. Величина рассеянных магнитных полей не должна превышать, как правило, 1–2 мТл в зоне пробоя.

После пробоя горизонтальная компонента магнитного поля должна поддерживаться близкой к нулю, чтобы избежать возникновения больших смещений плазмы от положения равновесия в вертикальном направлении. В то же время примерно однородная вертикальная компонента магнитного поля, которая обеспечивает равновесие плазмы с круглым поперечным сечением по большому радиусу, должна соответствовать величине, определяемой по формуле Шафранова. Два последних условия могут быть записаны в виде

$$\begin{aligned} \langle B_r(R, Z) \rangle &\approx 0 \\ \langle B_z(R, Z) \rangle + \frac{\mu_0 I_p}{4\pi R} \left[\ln\left(\frac{8R}{a}\right) + \beta_p + \frac{l_i}{2} - \frac{3}{2} \right] &\approx 0 \end{aligned} \quad (2)$$

Как правило, на этой стадии форма плазменного шнура имеет приблизительно круглое поперечное сечение. Это достигается, если показатель спада магнитного поля, определяемый как:

$$\langle n \rangle = -\frac{R}{\langle B_z \rangle} \frac{d\langle B_z \rangle}{dR}, \quad (3)$$

в зоне пробоя плазмы находится в диапазоне $0.1 \leq \langle n \rangle \leq 0.7$. Помимо этих условий в модели учитываются ограничения на величины токов и напряжений на катушках полоидального поля, определяемые выбором источников питания, а также на величину максимального магнитного поля на катушках.

Указанная математическая модель реализуется в вычислительном коде TRANSMAK [7], который решает задачу синтеза сценария для стадии инициации плазмы, то есть позволяет найти напряжения на катушках полоидального поля, токи в полоидальных обмотках с момента начального запаса потока и значения сопротивлений в контурах обмоток (если требуется). Математически описываемая здесь задача сводится к оптимизационной задаче, где целевым функционалом является либо максимальная величина внешнего магнитного потока в зоне инициации плазмы в момент пробоя, либо максимальная величина

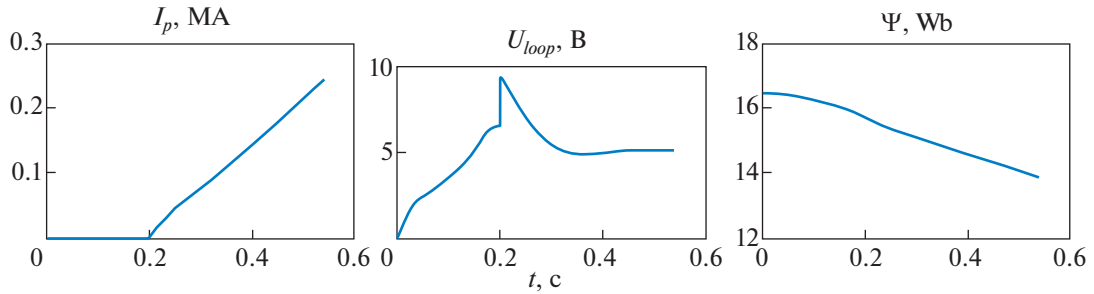


Рис. 2. Ток плазмы (I_p), внешнее напряжение (U_{loop}) и магнитный поток (Ψ) в течение старта разряда в области пробоя.

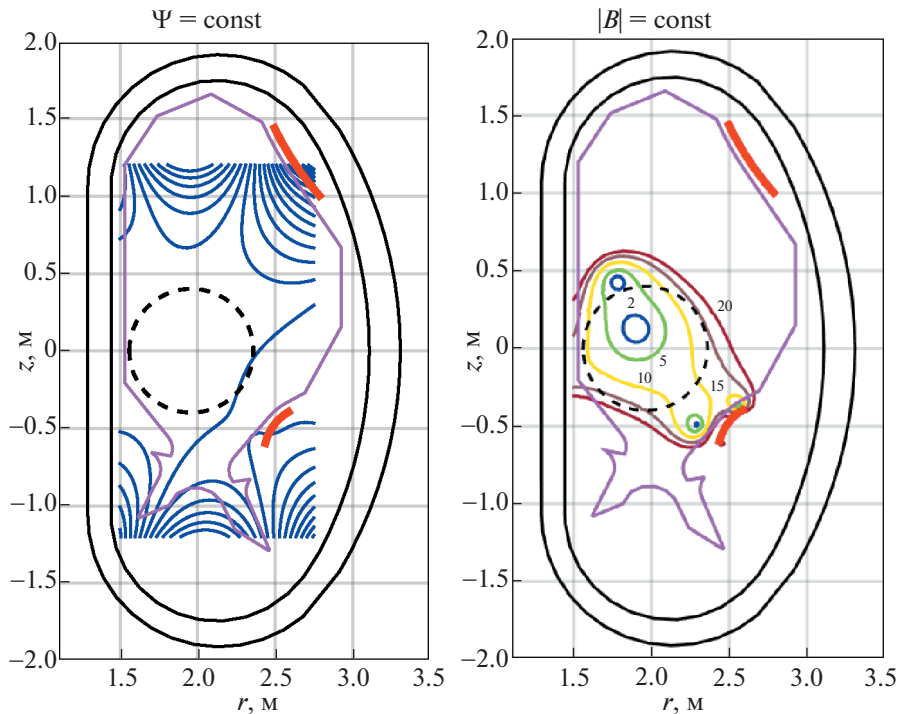


Рис. 3. Линии постоянного потока (слева) и линии постоянного модуля полоидального поля в момент пробоя ($t_{bd} = 0.2$ с) в области пробоя (справа). Указаны величины полоидального магнитного поля в Гс.

магнитного потока в зоне инициации плазмы в начальный момент времени.

Для оценки омического сопротивления плазменного шнура на стадии инициации плазмы в коде TRANSMAC используется нульмерная многокомпонентная транспортная модель (код SCENPLINT [7]), которая служит для оценки омического сопротивления плазмы и входит в состав вычислительного комплекса TRANSMAC.

Следует отметить, что коды SCENPLINT и TRANSMAC широко используются для расчета начальной стадии в токамаке-реакторе ИТЭР.

2.1.2 Данные для расчета начальной стадии разряда. Принято, что лимитер на внутреннем обводе располагается на $R_{lim} \approx 1.53$ м (см. рис. 3), ма-

лый радиус области пробоя $a_{bd} = 0.4$ м, поэтому большой радиус — $R_{bd} = 1.93$ м ($Z_{bd} = 0$). Торoidalное поле в центре области пробоя $B_{t,bd} \approx 8.3$ Тл.

Для начальной стадии разряда в TRT (до величины тока плазмы $I_p \approx 0.25$ МА) используется индуктивный сценарий. В качестве ограничения на параметры сверхпроводящих катушек принято, что максимальное поле катушек соленоида не должно превышать $B_{Oy} \leq 14$ Тл, а максимальное поле внешних полоидальных катушек $B_{Oij} \leq 7$ Тл. Эти ограничения позволяют обеспечить приемлемые электромагнитные нагрузки на указанные катушки.

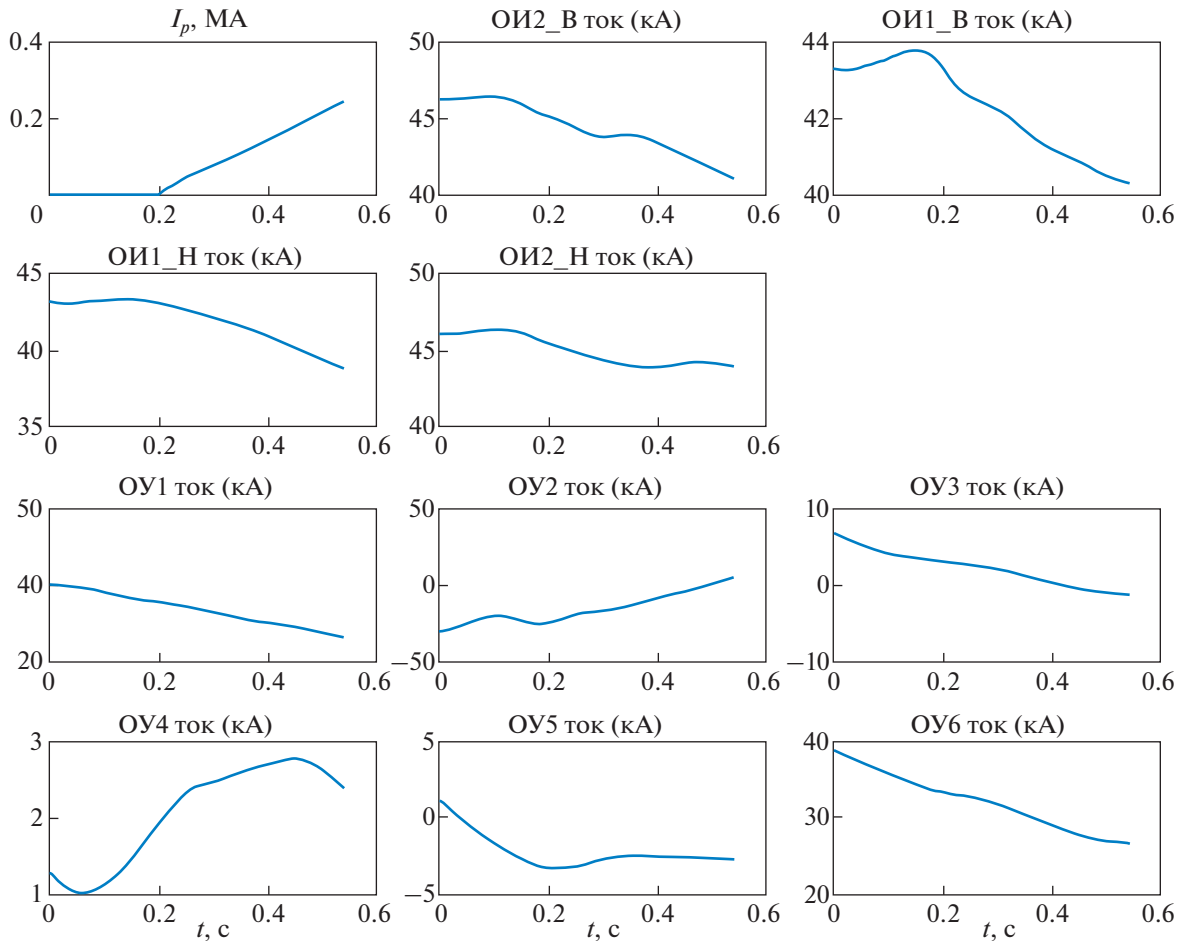


Рис. 4. Токи в обмотках в течение старта разряда.

Для формирования условий пробоя в токамаке TRT необходимо обеспечить низкий уровень полоидальных магнитных полей B_{str} (полей рассеяния) в области пробоя в момент пробоя, достаточно большое напряжение на обходе U_{bd} , определенный уровень давления рабочего газа в камере p . Расчеты показали, что при учете наведенных токов в проводящих структурах установки требуется достижение полей рассеяния в момент пробоя на уровне $B_{str} \approx 2$ мТл.

Если принять, что рабочий газ – дейтерий с давлением $p \approx 0.5$ мПа, напряжение пробоя $U_{bd} \approx 6.5$ В (при этом напряженность электрического поля в центре области пробоя $E \approx 0.5$ В/м), то основные критерии пробоя могут быть выполнены. В частности, выполнено эмпирическое условие “реализуемости пробоя” $E \times B_{t,bd}/B_{str} > 1000$ В/м [11].

Расчеты по коду SCENPLINT позволяют найти требуемую эволюцию сопротивления плазмы и оценить некоторые исходные параметры. Приведем важнейшие из них:

- напряжение в момент пробоя $U_{bd} = 6.5$ В, соответствующее электрическое поле в центре области пробоя $E \approx 0.5$ В/м;
- радиус области пробоя $a_{bd} = 0.4$ м;
- давление рабочего газа (дейтерий) $p = 0.5$ мПа;
- относительный уровень содержания бериллия (примеси) $\approx 4\%$;
- тороидальное магнитное поле в центре области пробоя $B_{t,bd} = 8.3$ Тл;
- для осуществления пробоя полоидальное магнитное поле рассеяния в момент пробоя в области пробоя не более $B_{str} = 2$ мТл.

В качестве пассивной структуры рассматривались две стальные оболочки вакуумной камеры толщиной 25 мм и с удельным сопротивлением $\rho_{vv} = 0.74$ мкОм · м.

Тороидальное сопротивление внутренней оболочки 42.9 мкОм. Тороидальное сопротивление внешней оболочки 36.9 мкОм. Полное торо-

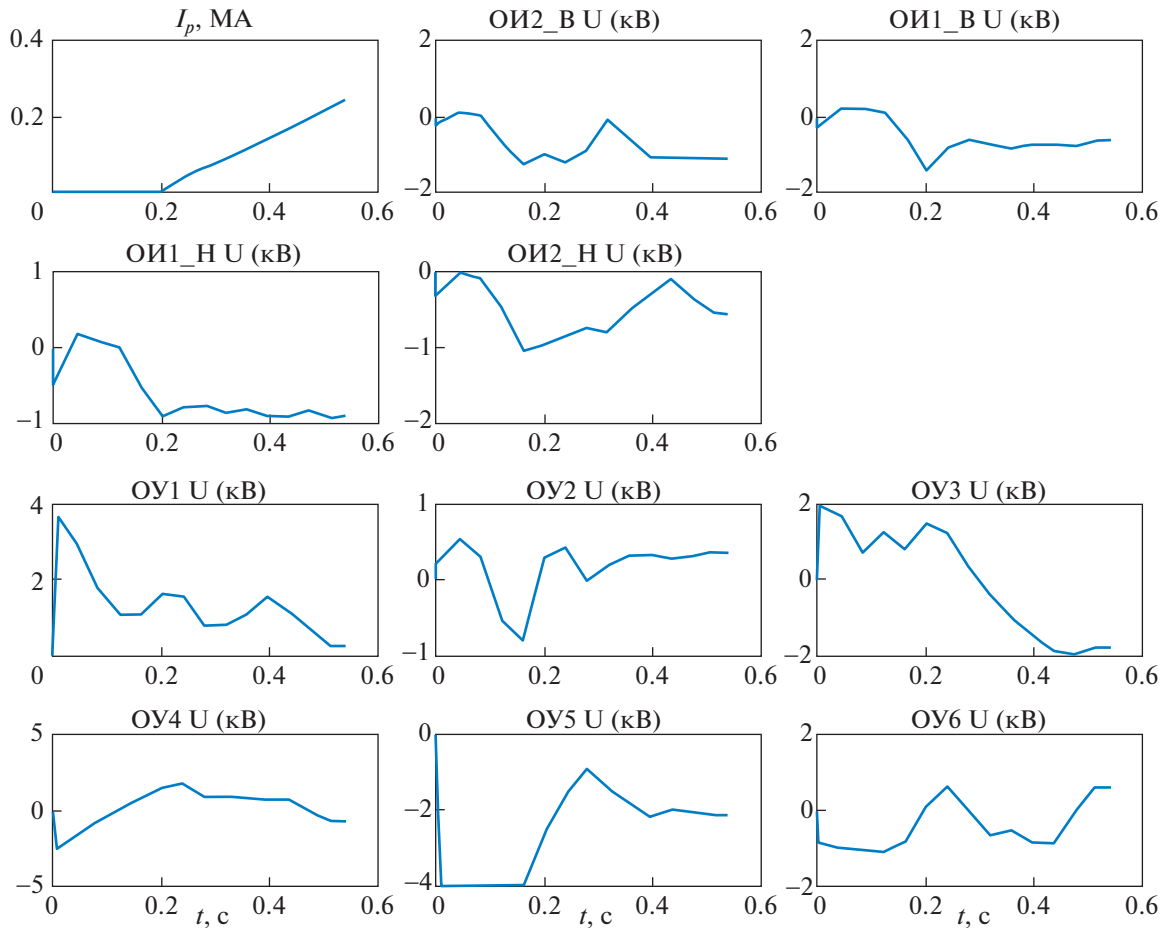


Рис. 5. Напряжения на обмотках в течение старта разряда.

идальное сопротивление вакуумной камеры $20 \mu\Omega$.

В качестве внутрикамерных элементов рассматривались медные пассивные витки с сопротивлением $40 \mu\Omega$, соединенные магнитно встречно и показанные на рис. 3 красным цветом.

2.1.3 Результаты расчетов начальной стадии.

Результаты расчета основного сценария начальной стадии представлены на рис. 1–10. Исследования показали, что в электрических цепях обмоток OY1, OY3, OY4, OY5, OY6 следует использовать следующие сопротивления до момента времени $t \approx 0.54$ с (конец начальной стадии, ток плазмы $I_p \approx 0.25$ MA)

$$R_{OY1} = 0.1 \text{ Ом}, \quad R_{OY3} = 0.8 \text{ Ом}, \quad R_{OY4} = 0.4 \text{ Ом}, \\ R_{OY5} = 0.5 \text{ Ом}, \quad R_{OY6} = 0.05 \text{ Ом}.$$

Максимальное напряжение на резисторах составляет примерно 5.5 кВ. Как правило, резисторы используются только на начальной стадии разряда, в конце которой происходит их отключение.

На рис. 2 показаны ток плазмы (до величины $I_p \approx 0.25$ MA), внешнее напряжение и магнитный поток в течение старта разряда (от токов полоидальных обмоток и токов вакуумной камеры) в области пробоя. В этом сценарии при конструктивном ограничении на максимальное поле обмоток в 14 Тл начальный поток может достигать величины $\Psi_{ext}(0) \approx 16.45$ Вб, а поток в момент пробоя $t_{bd} = 0.2$ с равняется $\Psi_{ext}(t_{bd}) \approx 15.7$ Вб. Напряжение в момент пробоя составляет $U_{bd} \approx 6.5$ В. В конце этого сценария поток составляет $\Psi_{ext}(t = 0.54 \text{ с}) \approx 13.9$ Вб.

На рис. 3 показаны линии постоянного потока и линии постоянного модуля полоидального поля в момент пробоя $t_{bd} = 0.2$ с в области пробоя. Как следует из рисунка, в области пробоя в момент пробоя наблюдается низкий уровень рассеянных полей с нулем поля (меньше 20 Гс).

На рис. 4 показаны токи в обмотках полоидальной системы в течение начальной стадии. Максимальные токи в обмотках центрального соленоида в начальный момент разряда примерно

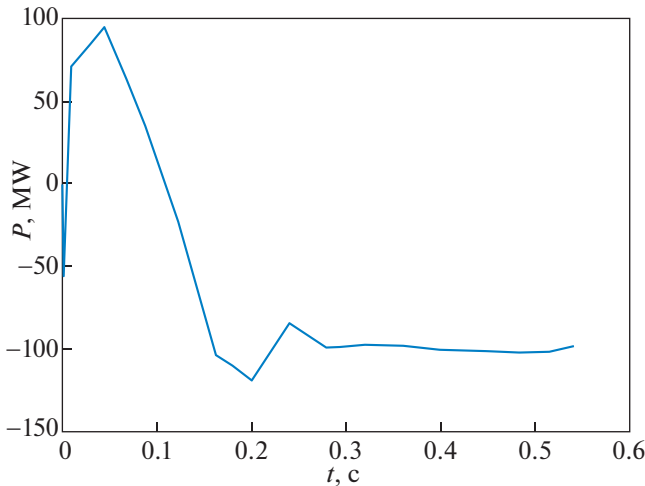


Рис. 6. Суммарная мощность источников питания на старте разряда.

46 кА, что обеспечивает поле на катушках соленоида не более 14 Тл.

На рис. 5 показаны напряжения источников электропитания на полоидальных обмотках в течение начальной стадии. Максимальное напряжение 4 кВ достигается на обмотке ОУ5.

На рис. 6 показана суммарная мощность источников электропитания полоидальных обмоток в течение начальной стадии. Максимальная мощность не превышает 120 МВт. В качестве источников питания полоидальных обмоток предполагается использовать управляемые тиристорные преобразователи, которые в инверторном режиме (ток и приложенное напряжение разных знаков) отдают электрическую мощность обратно в сеть (отрицательная мощность).

На рис. 7 приведена конфигурация плазмы в конце начальной стадии разряда ($t = 0.54$ с), когда ток плазмы достигает $I_p \approx 250$ кА, малый радиус $a_p \approx 0.4$ м. При этом плазма имеет круглую форму с вытянутостью примерно равной 1.

Таким образом, моделирование показало, что полоидальная система установки обеспечивает условия пробоя и ранний подъем тока плазмы I_p на внутреннем лимитере. При этом:

- начальный запас потока при ограничении максимального поля на обмотках центрального соленоида в 14 Тл составляет 16.45 Вб,
- уровень полей рассеяния в момент пробоя $t_{bd} = 0.2$ с в области пробоя ($R_{bd} = 1.93$ м, $Z_{bd} = 0$, $a_{bd} = 0.4$ м) не превышает 20 Гс,
- напряжение в момент пробоя 6.5 В,
- в течение старта разряда до тока плазмы $I_p \approx 250$ кА ($t = 0.54$ с, средняя скорость подъема ≈ 0.5 МА/с) расход потока составляет ≈ 2.6 Вб,

– использование резисторов в цепях некоторых обмоток на старте разряда позволяет уменьшить максимальные напряжения источников питания обмоток до 4 кВ и обеспечить уровень мощности в пределах ≈ 120 МВт. Резистивные напряжения обеспечивают требуемый быстрый вывод токов из некоторых обмоток на старте разряда, который может быть осуществлен без резисторов только при больших напряжениях источников питания,

– максимальное поле на обмотках индуктора на старте разряда не превышает 14 Тл, на остальных обмотках максимальное поле не более 7 Тл.

2.2. Транспортная модель, используемая для расчета сценария ввода тока плазмы после начальной стадии

Расчеты эволюции плазмы токамака TRT в процессе ввода тока выполнены с помощью плазмозфизического кода DINA [8]. Код включает в себя осесимметричную по тороидальному обходу двумерную модель расчета равновесия плазмы со свободной границей во внешних магнитных полях, одномерные уравнения диффузии полоидального магнитного потока и энергии электронов и ионов, а также систему контурных уравнений для расчета тороидальных токов в проводящих структурах вакуумной камеры токамака. Плазмозфизическая модель включает также неоклассическое выражение для расчета бутстреп-тока [9].

При моделировании сценария ввода тока в плазму принято допущение относительно использования выражения для глобального времени удержания энергии в режиме L-моды [10]

$$\tau_L = 0.023 I_p^{0.96} B^{0.03} P_{heat}^{-0.73} n_{19}^{0.41} \times M^{0.2} R^{1.83} (a/R)^{-0.06} K^{0.64}, \tag{4}$$

на которое нормируется энергетическое время жизни плазмы

$$\tau_E = \frac{E_{th}}{(P_{heat} - P_{rad} - dE_{th}/dt)}. \tag{5}$$

В выражениях (4) и (5) приняты обозначения: E_{th} – тепловая энергия плазмы; P_{heat} – мощность теплового нагрева; P_{rad} – мощность радиационного излучения; R и a , соответственно, большой и малый радиусы плазмы; K – вытянутость плазмы; B_t – тороидальное магнитное поле, определенное в геометрическом центре камеры R_0 ; n_{19} – средняя плотность ионов в единицах 10^{19} м^{-3} ; M – средняя масса иона. В выражении (4) используются единицы измерения с, МА, Тл, МВт, 10^{19} м^{-3} , м. Радиальная зависимость коэффициента теплопроводности задается в виде $f(\bar{\rho}) = 0.3 + \bar{\rho}^2$. Здесь $\bar{\rho}$ – радиальная координата магнитной поверхности

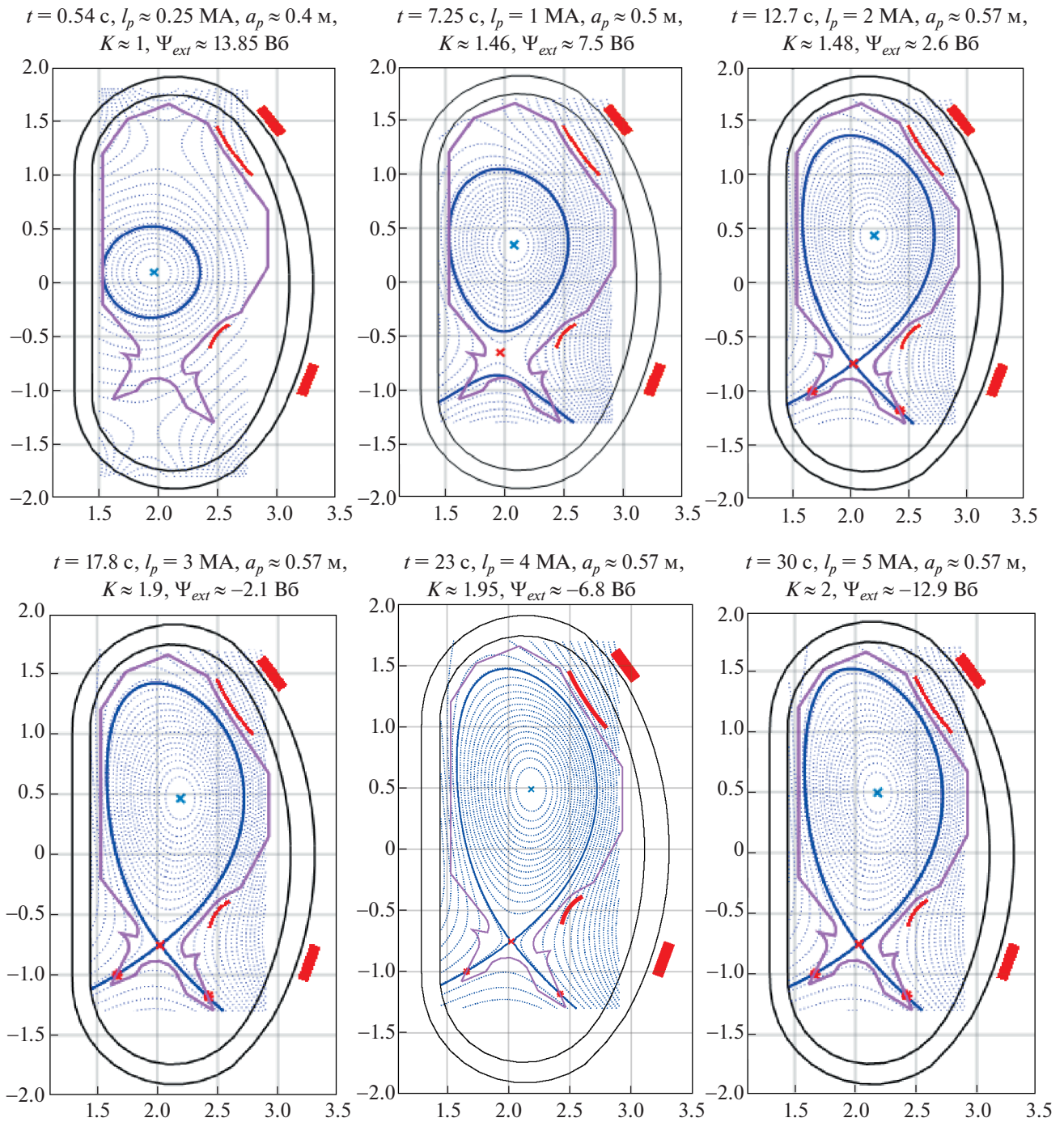


Рис. 7. Конфигурации плазмы в моменты сценария ввода тока плазмы I_p до 5 МА (фиолетовая линия – лимитер).

$(\bar{\rho} = \sqrt{\Phi/\Phi_{\max}}$, где Φ – тороидальный магнитный поток, заключенный внутри текущей магнитной поверхности и Φ_{\max} – поток внутри плазменной границы). Для расчета электрической проводимости плазмы используется неоклассическое выражение.

Предполагается, что после начальной стадии дейтериевая плазма в отсутствии примесей имеет

параболический профиль плотности. Распределение ЭЦР-мощности дополнительного нагрева по радиусу плазмы также принято параболическим. Эволюция мощности дополнительного нагрева в процессе ввода тока показана на рис. 8. Относительно граничной температуры электронов и ионов используется условие $T_{e,i}(a) = 0.1\langle T_{e,i} \rangle$, где $\langle T_{e,i} \rangle$ – средняя по объему плазмы величина.

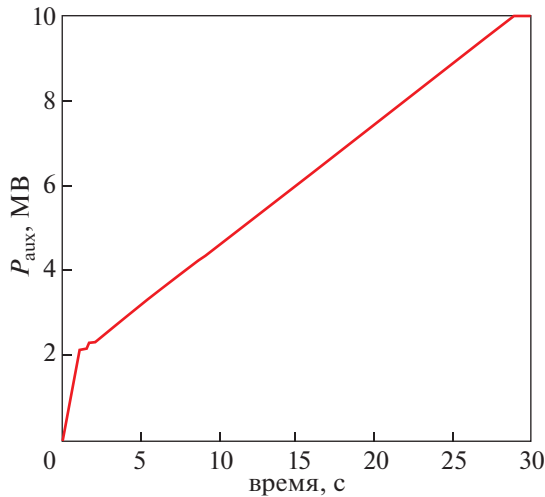


Рис. 8. Эволюция мощности дополнительного нагрева в процессе ввода тока.

2.3. Сценарий ввода тока плазмы до 5 МА

С использованием транспортной модели п. 2.2 был рассчитан сценарий ввода тока плазмы до 5 МА. Расчет сценария продолжался с момента времени $t = 0.54$ с (конец начальной стадии разряда). В этот момент времени внешний полоидальный поток составляет $\Psi_{ext} \approx 13.85$ Вб.

Эволюция формы плазмы в течение подъема тока плазмы I_p до величины 5 МА показана на рис. 7. Дополнительный нагрев плазмы значительно облегчает индукционный ввод тока. В рассматриваемом сценарии используется ЭЦР-нагрев с линейным ростом мощности от 2 до 10 МВт (см. рис. 8). Одновременно с ростом тока и температуры осуществляется также подъем плотности плазмы (рис. 9).

В момент времени $t = 7.5$ с ток плазмы достигает значения $I_p \approx 1$ МА, при этом внешний поток составляет $\Psi_{ext}(t = 7.5 \text{ с}) \approx 7.5$ Вб. Лимитерная конфигурация плазмы имеет вытянутое сечение (вытянутость $K \approx 1.46$) с малым радиусом $a_p \approx 0.5$ м.

В момент времени $t = 12.7$ с плазма имеет однонулевую диверторную конфигурацию с током $I_p \approx 2$ МА, показанную на рис. 7. Большой и малый радиусы плазмы достигают базовых значений ($R_p \approx 2.15$ м, $a_p \approx 0.57$ м), однако величина вытянутости плазмы по x -точке ($K_x \approx 1.85$) еще меньше базовой. Ветви сепаратрисы проходят практически через заданные точки на диверторных мишенях (strikepoints), отмеченные на рисунке красными маркерами. В этот момент времени внешний поток составляет $\Psi_{ext}(t = 12.7 \text{ с}) \approx 2.6$ Вб.

В моменты времени $t = 17.8$ и 23 с плазма имеет однонулевую диверторную конфигурацию с то-

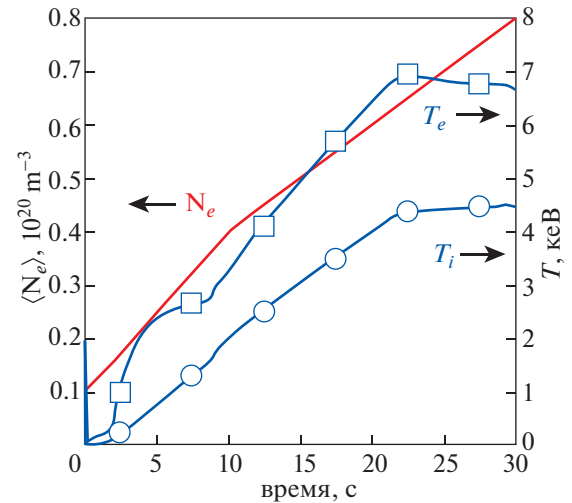


Рис. 9. Эволюции средних по объему плазмы величин электронной и ионной температур и концентрации электронов в процессе ввода тока.

ками в плазме соответственно $I_p \approx 3$ и 4 МА. Большой и малый радиусы плазмы сохраняют базовые значения ($R_p \approx 2.15$ м, $a_p \approx 0.57$ м), а величина вытянутости плазмы возрастает до $K_x \approx 1.95$. Ветви сепаратрисы проходят через заданные точки на диверторных мишенях. В эти моменты времени внешний полоидальный поток составляет, соответственно, $\Psi_{ext} \approx -2.1$ и -6.8 Вб.

Эволюции средних по объему плазмы величин электронной и ионной температур, а также концентрации электронов в процессе ввода тока показаны на рис. 9.

Плато тока плазмы ($I_p \approx 5$ МА) начинается в момент времени $t = 30$ с. Однонулевая конфигурация плазмы в этот момент времени имеет базовые параметры: большой радиус плазмы $R_p \approx 2.15$ м, малый радиус плазмы $a_p \approx 0.57$ м, вытянутость по x -точке $K_x \approx 2$. Ток в обмотке центрального соленоида ОИ1_В достигает максимального значения – 57 кА. Ветви сепаратрисы проходят через заданные точки на диверторных мишенях. Внешний поток составляет $\Psi_{ext}(t = 30 \text{ с}) \approx -12.9$ Вб.

Таким образом, в этом сценарии усредненное внешнее напряжение, приложенное к плазме на стадии подъема тока до 5 МА, составляет $U_p \approx 1$ В и расход потока составляет $\Delta\Psi_{ext} \approx -29.3$ Вб.

На рис. 10 показаны эволюции тока плазмы I_p , токов в полоидальных обмотках и внешнего потока в течение рассмотренного сценария. Максимальный ток в обмотках центрального соленоида не превышает 57 кА, в остальных обмотках существенно меньше. В рассмотренном сценарии максимальные поля на обмотках центрального

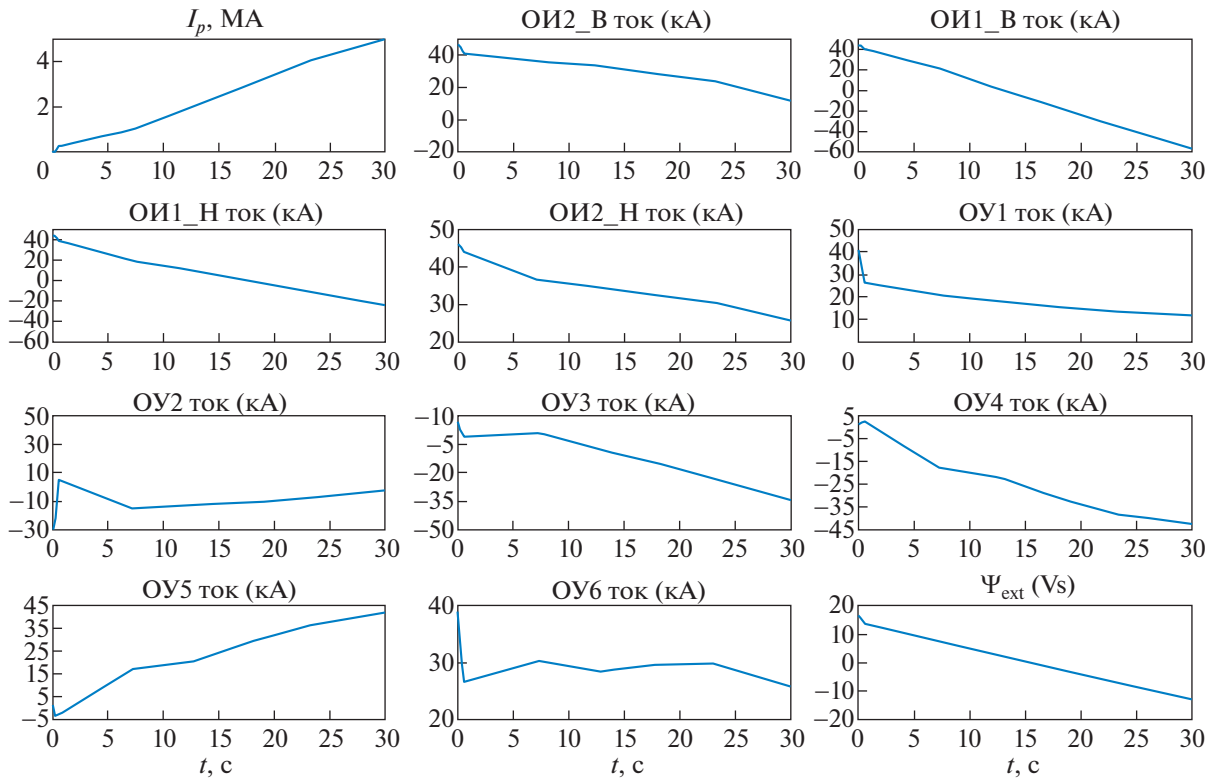


Рис. 10. Ток плазмы, токи в полоидальных обмотках и внешний поток в течение стадии подъема тока плазмы до 5 МА.

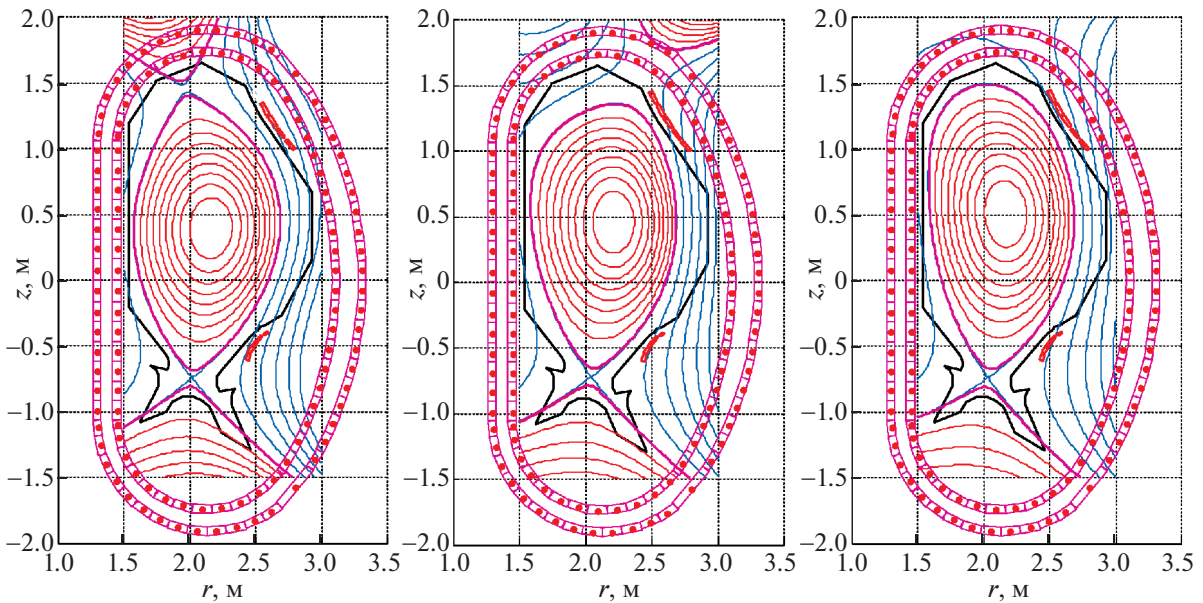


Рис. 11. Примеры равновесий плазмы TRT с двумя X-точками, с отрицательной треугольностью и SOL с шириной более 5 см.

соленоида около 14 Тл. Эта величина была выбрана в качестве предельно допустимой для сверхпроводящей полоидальной системы установки.

Следует отметить, что рассмотренный выше сценарий ввода тока ориентировался на одновременное формирование базовой конфигурации

равновесия плазмы в TRT, $K_x = 2.0$ и $\delta_x = 0.3$. Однако, как для оптимизации операционных режимов разряда, так и для обеспечения возможности экспериментальной апробации различных инновационных концепций дивертора, ЭМС TRT обладает широкими возможностями по созданию магнитных конфигураций различной геометрии включая двухнулевую конфигурацию, конфигурации с отрицательной треугольностью и др. Примеры равновесий плазмы TRT с двумя X-точками, с отрицательной треугольностью (~ -0.13) и SOL с шириной более 5 см показаны на рис. 11.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе представлены результаты моделирования сценария ввода тока в плазму TRT до 5 МА, рассчитанного с помощью кода DINA. Для расчета начальной стадии в этом сценарии были использованы коды SCENPLINT и TRANSMAX.

Начальный запас потока при ограничении максимального поля на обмотках центрального соленоида в 14 Тл составляет 16.4 Вб. Расход потока в начале разряда до тока плазмы $I_p \approx 0.5$ МА равняется ≈ 2.6 Вб.

В начале сценария плазма имеет лимитерную конфигурацию, вытянутость которой увеличивается от $K \approx 1$ до $K \approx 1.5$. Диверторная конфигурация формируется приблизительно к 13 с (ток плазмы $I_p \approx 2$ МА).

Плато тока плазмы ($I_p \approx 5$ МА) начинается в момент времени $t = 30$ с. Однонулевая конфигурация плазмы в этот момент времени имеет базовые параметры: большой радиус плазмы $R_p \approx 2.15$ м, малый радиус плазмы $a_p \approx 0.57$ м, вытянутость $K_x \approx 2$. Внешний полоидальный поток составляет $\Psi_{ext}(t = 30 \text{ с}) \approx -12.9$ Вб. Усредненное внешнее напряжение, приложенное к плазме на стадии подъема тока до 5 МА, составляет $U_p \approx 1$ В.

Изменение полоидального потока в ≈ 29.3 Вб позволяет обеспечить подъем тока плазмы I_p до 5 МА за 30 с.

Начиная с момента времени $t = 12.7$ с ($I_p \approx 2$ МА) и до начала плато тока плазмы, ветви сепаратрисы проходят через заданные точки на диверторных пластинах.

Максимальные поля на обмотках центрального соленоида в течение сценария около 14 Тл, на остальных обмотках максимальные поля менее 7 Тл.

Рассматриваемая полоидальная система TRT позволяет формировать двухнулевую плазменную конфигурацию, а также конфигурацию со слабой отрицательной треугольностью плазмы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Госкорпорации Росатом в рамках договора от 5 сентября 2019 г. № 313/1671-Д.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Status of the SPARC Physics Basis // Journal of Plasma Physics. 2020. V. 86. P. 861860501–861860508.
2. Красильников А.В., Коновалов С.В. и др. // Физика плазмы. 2021. Т. 46. В печати.
3. DTT. DivertorTokamak Test Facility. Interim Design Report, April 2019, DTT_IDR_2019_WEB.pdf.
4. Matsukawa M., Terakado T., Yamauchi K., Shimada K., Cara P., Gaio E., Novello L., Ferro A., Coletti R., Santinelli M., Coletti A. // J. Plasma Fusion Res. Series, 2010. V. 9. P. 264.
5. Matsukawa M. // Engineering Future in the Design of JT-60 SA. IAEA06_ftp7_5_matsukawa Radial build.pdf.
6. Conceptual Design Report on JT-60 SA, 05-2. Physical Assessment.pdf.
7. Belyakov V.A., Lobanov K.M., Makarova L.P., Mineev A.B., Vasiliev V.V. // Plasma Devices and Operations. 2003. V. 11. P. 193.
8. Khayrutdinov R.R. and Lukash V.E. // Journal of Computational Physics. 1993. V. 109. № 2. P. 193.
9. Hinton F.L., Hazeltine R.D. // Review of Modern Physics. 1976. V. 48. № 2. Part, P. 239.
10. ITER Physics Basics, Chapter 2 // Nucl. Fusion. 1999. V. 39. P. 2206.
11. Tanga A., Thomas P.R., Cordey J.G., Christiansen J.P., Ejima S., Kellman A. et al. Tokamak Start-up / Ed. by U.Knoepfel. N.Y.: Plenum Press, 1986.