

интенсивностями токов, недостаточными для использования их на ускорителях. В криогенном импульсном источнике Е. Донца (ОИЯИ, СССР) при энергии электронов 500 эВ получены пучки ионов  $\text{Ar}^{15+}$  и  $\text{Xe}^{29+}$ . Большой интерес представляют также приведенные в докладе сечения ионизации МЗИ электронным ударом для С, N и Ar. Р. Беккер и сотрудники (Франкфурт, ФРГ) предполагают, что интенсивность непрерывного тока  $\text{U}^{11+}$  может быть получена до 100 мкА, что удовлетворяет требованиям UNILAC.

В развитии источников МЗИ с подогревом плазмы на электронно-диплотронном резонансе за последнее время сделан существенный шаг. Этой теме было посвящено четыре доклада (Гренобль и Орсе, Франция; Марбург, ФРГ; Ок-Ридж, США). Последняя модель источника (Р. Желе и сотрудники, Гренобль) представляет собой трехкаскадное сочленение магнитных «бутылок», в котором плазма перетекает из одной секции в другую с повышением зарядового состояния. Получены токи  $10^{14}$  частиц/с  $\text{C}^{3+}$  и  $\text{O}^{6+}$  и максимальный заряд ионов  $\text{Kr}^{15+}$ . Значение  $nT$  составляет  $6 \cdot 10^{15}$  эВ/см<sup>3</sup>, что в четыре раза превышает значение  $nT$  в дуговом источнике (ИАЭ). По-видимому, это направление в разработке источников МЗИ перспективно, ожидается получение ионов  $\text{U}^{90+}$  в достаточном количестве для использования на ускорителях, обсуждается возможность применения такого источника в проекте GANIL (Франция).

Образование отрицательных ионов тяжелых элементов в интенсивно развивающихся в настоящее время источниках осуществляется в результате катодного распыления образца материала ионами  $\text{Cs}^+$  ( $E \sim 20$  кэВ). «Линейная» конструкция ионного источника за последние два года (Р. Мидлетон, США) вытесняется более компактной «обращенной», в которой конические мишени (К. Чепман, США) или плоские (Г. Элтон, США) бомбардируются также  $\text{Cs}^+$ -ионами, ускоренными от поверхности термоионизатора, а отрицательные ионы ускоряются в обратном направлении теми же электродами ионной оптики, которые ускоряют  $\text{Cs}^+$ . Н. Смит (США) отмечает существование корреляции между электронным средством и выходом отрицательных ионов в различных типах ионных источников (т. е. чем ниже электронное средство, тем ниже выход). Интенсивности пучков ионов различных элементов составляют, например:  $\text{Li}^- \sim 5$ ,  $\text{C}^- \sim 70$ ,  $\text{O}^- \sim 130$ ,  $\text{Si}^- \sim 45$ ,  $\text{S}^- \sim 55$  мкА. Кроме отмеченных типов источников продолжают совершенствоваться плазменные источники отрицательных ионов — триплазмотроны (Леджон, Франция) и дуговые источники с осцилляцией электронов (Н. Смит, США). Е. Штеффенс (ФРГ) в подробном докладе сообщил о разработке источника поляризованных отрицательных тяжелых ионов для Гейдельбергского тандема. Получен ток 200 нА  $\text{Li}^{3+}$  на мишень,

указывается на возможность получения поляризованных ионов Na, Cl, I и Br. Среди теоретических работ следует отметить доклады Р. Олсона (США) о процессах образования отрицательных ионов водорода и Д. Кауфмана (США) о электронном средстве.

Г. Фрик и другие (Франция) сообщили интересные результаты обдирки ионов Ni, I и Au с энергией 0,5—0,85 МэВ/А на углеродных фольгах с толщиной 2—200 мкг/см<sup>2</sup>, работа проводится для проекта GANIL. К. Бете и сотрудники (ФРГ) для обдирки использовали сверхзвуковую струю примерно в том же диапазоне толщин, расход аргона на толщине мишени 100 мкг/см<sup>2</sup> составлял 0,4 г/с при диаметре струи 2 мм.

В последнее время все больше уделяется внимания обследованию параметров ионных пучков и прежде всего измерению эмиттанса для получения пучков с высокой фазовой плотностью. Измерен эмиттанс пучков, полученных из дуговых ионных источников с радиальным (Д. Кларк и сотрудники, США) и аксиальным (К. Бете и сотрудники, ФРГ) вытягиванием ионов. Эмиттанс пучков отрицательных ионов измерен Н. Андерсоном (Дания), Н. Смитом (США) и Г. Дукасом и др. (Англия). В последнем докладе сообщается о разработке системы для измерения эмиттанса с помощью компьютера и использования анализатора энергии ионов с высоким разрешением.

Строительство новых экспериментальных установок для исследования и разработки источников МЗИ за последние три года в ведущих центрах за рубежом Беркли, Ок-Ридже (США), Дармштадте (ФРГ) свидетельствует о стремлении к дальнейшему развитию источников, поскольку затраты на эти работы, несомненно, полностью окупаются упрощением проектируемых ускорителей и повышением эффективности эксплуатируемых.

Конференция явилась важным этапом в развитии источников МЗИ, она подвела итоги основным достижениям в этой области, продемонстрировала все возрастающий интерес к исследованию и разработке источников тяжелых ионов во многих странах мира и позволила специалистам обсудить результаты работ научно-исследовательских лабораторий различных стран за последние годы. Работы советских специалистов по источникам многозарядных ионов дугового типа с подогревным катодом и электронно-лучевым источникам занимают ведущее место. Советские доклады вызвали большой интерес участников конференции. Источники с подогревным катодом до настоящего времени являются наиболее эффективными для использования их на ускорителях.

Труды конференции будут опубликованы в журнале IEEE, NS-23, № 2, апрель 1976.

МАКОВ Б. Н.

### III Международная конференция по импульсной плазме с большим $\beta$

Несмотря на общеизвестные успехи ставшей классической программы «Токамак», продолжают настойчивые поиски других, более эффективных систем получения и удержания высокотемпературной плазмы.

Результаты изучения систем, в которых  $\beta$ -отношение газокINETического давления плазмы к давлению веще-

ного удерживающего магнитного поля порядка единицы или больше, обсуждались на III Международной конференции по импульсной плазме с большим  $\beta$ . Конференция проходила в Калемской лаборатории (Великобритания) с 9 по 12 сентября 1975 г. В конференции приняли участие более 120 делегатов из 14 стран. Ее



организаторами были Комиссия по атомной энергии Великобритании, Лондонский институт физики, Американское физическое общество и МАГАТЭ. Аналогичные конференции проводились в 1969 и 1972 гг.

Организационный комитет (четко работавший как при подготовке, так и во время конференции) отобрал около 100 докладов по тематикам: стеллараторы и токамаки с большим  $\beta$ , пинчи с обратным полем, скрюпинчи, плазменный фокус, теория плазмы с большим  $\beta$ . На конференции были заслушаны семь обзорных докладов: М. Кауфмана (ФРГ) «Стеллараторы с большим  $\beta$ », Х. Бодина (Англия) «Пинчи с обратным полем», Д. Тейлора (Англия) «Релаксация тороидальных разрядов», А. Бернара (Франция) «Плазменный фокус», К. Хирано (Япония) «Скрюпинчи и токамак с круглым сечением», Д. Шлютера (ФРГ) «Скрюпинчи и токамаки с большим  $\beta$  при некруглом сечении», Д. Фрейдберга (США) «Теория устойчивости плазмы с большим  $\beta$ ».

В последние пять лет начался новый период развития исследования по программе пинчей (прямых и замкнутых) и особенно пинчей со стабилизирующей обратным полем (RFP). Системы с обратным полем заманчивы по ряду причин:

1) в таких системах удерживающее поле (сильное у поверхности плазмы) спадает к стенкам камеры, что повышает коэффициент использования поля и эффективность реактора на базе RFP;

2) с увеличением величины азимутального тока ( $I_z$ ) через плазму растет ее температура, величина  $\beta$  и магнитного шира.

Экспериментальная роль обратного поля на стабилизацию пинча показана давно. Однако непонимание физики явления долго не позволяло развивать это направление. Сейчас, в результате проведенных теоретических и экспериментальных работ, достигнут существенный прогресс в познании динамики и закономерностей в таких системах.

На конференции подробно обсуждались проблемы МГД-устойчивости, диффузии частиц и поля, потерь частиц, микронеустойчивостей, эффектов перегрева плазмы, баланса энергии и т. д. в  $\theta$ -пинчах с обратным полем.

Существенным успехом считают достигнутое понимание процесса получения устойчивых конфигураций в условиях, когда обратное поле спонтанно создается протекающим по плазме током. Это происходит, когда величина продольного тока плазмы находится в рамках некоторых рассчитываемых граничных значений. Такой режим RFP весьма заманчив с точки зрения инженерных проблем будущего термоядерного реактора, так как существенно упрощает его конструкцию.

Подробно современное состояние теории и экспериментов по пинчам с обратным полем было рассмотрено в обзорных докладах Х. Бодина, Д. Тейлора и частично Д. Фрейдберга. В них было показано, что для низкотемпературной столкновительной плазмы установки НВТХ-1 (при использовании программированного поля) достигнуты классические величины времен жизни конфигурации и энергии ( $\tau_k$  и  $\tau_E$ ) при  $\beta \approx 30\%$ . Возможности эксперимента ограничивались слишком малой величиной  $\omega t$ , а также слишком быстрым ростом  $\beta$  и градиента давления до значений, превышающих допустимые по условиям МГД-устойчивости.

На установке Zeta, где устойчивая конфигурация с обратным полем создавалась самопроизвольно, величины  $\tau_E$  и  $n\tau$ , сравнимые с получаемыми сейчас на токамаках, наблюдались при сравнительно высоких  $\omega t$

с  $T_e \approx 150 \div 200$  эВ и  $\beta \approx 10\%$ . Однако время жизни конфигурации ограничивалось низкой электронной температурой. В настоящее время есть все предпосылки для строительства большой установки, в которой самообращение поля будет сопровождаться и его программированием на стадиях образования и удержания плазмы при  $I_z \approx 1$  МА. Детальные инженерные проработки будущей установки НВТХ-2 уже сделаны. Предполагается, что свойства плазмы в ней будут близки к требуемым для создания реактора, а время жизни плазмы будет составлять десятки миллисекунд при  $\beta = (20 \div 40)\%$ .

В докладах сотрудников Лос-Аламоса приведены результаты экспериментов и расчетов по стабилизации МГД-неустойчивостей обратными связями на установке «Сциллак». В 1975 г. опыты проводились на 120-градусном секторе системы. Для понижения скорости развития неустойчивостей  $m = 1$  до величины, при которой может работать существующая система обратных связей, пришлось понизить величину магнитного поля до 17 кГс. В этом режиме плазменная конфигурация с довольно высокими параметрами [ $n = (2 \div 4) 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , радиус плазмы  $\sim 1$  см;  $\beta = 0,6 \div 0,7$ ;  $T_e = T_i \approx 120$  эВ] сохраняется более 25 мкс. В этих же опытах проверена и показана применимость теории стабилизации Д. Фрейдберга для подавления обратными связями неустойчивости моды  $m = 2$ .

Доклады по  $\theta$ -пинчам подтверждают, что в понимании физики плазмы с большим  $\beta$  за пять лет достигнут существенный прогресс. Теоретические работы согласуются с экспериментальными. К сожалению, это в меньшей степени относится к белт-пинчам, скрюпинчам и токамакам с большим  $\beta$ . Попытки найти условия устойчивой работы при плотности порядка  $(10^{15} \div 10^{16}) \text{ см}^{-3}$  в этих системах заманчивы с точки зрения достижения критерия Лаусона при больших плотностях. Заметный прогресс в понимании процессов в таких системах обеспечили интересные теоретические работы Д. Фрейдберга и В. Гроссмана, Х. Люи и К. Чю, Д. Бейкера, Д. Шлютера и К. Хирано, в которых удалось найти зависимости между основными параметрами плазмы и конфигурациями магнитных полей.

Численные методы Х. Люи и К. Чю для однокирочной модели обеспечивают хорошее согласие с экспериментами, проведенными в Голландии на установке SPICA с плазмой относительно невысокой температуры.

До последнего времени на установках типа белт-пинч изучалась плазма с  $T_i$  и  $T_e$  порядка 40 эВ. Только на установке TENQ в Юлихе получена и исследована плазма с  $n_e \approx 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  и  $T_i \approx 180$  эВ. Однако пока и здесь не удалось получить достаточно устойчивую плазму. Ее динамика оказывается довольно сложной. Несмотря на попытки менять в широких пределах величины  $q$ ,  $\beta$  и  $b/a$ , плазма остается неустойчивой.

Высказывалось единодушное мнение, что более высокая начальная температура в тороидальных пинчах существенно повысит время существования устойчивой конфигурации. Поэтому основной задачей на ближайшее время для белт-пинчей остается проверка устойчивости и энергетического времени жизни плазмы при более высоких температурах.

Р. Краковский показал, что плазму с  $n_e \approx 10^{15} \text{ см}^{-3}$  нагреть до температуры  $T_i \approx 1$  кэВ ударными волнами при современном уровне высоковольтной техники довольно трудно. В прямых  $\theta$ -пинчах для дополнительного повышения температуры плазмы применяют адиа-



батическое сжатие. В берт-пинчах сильное сжатие не применимо, так как оно приведет к потере устойчивости, как это было продемонстрировано в докладе Д. Шлютера. Эффективность ударного нагрева при использовании малоиндуктивных конденсаторных батарей изучалась в Гархинге и Лос-Аламосе на установках с прямыми  $\theta$ -пинчами при напряжениях 250—500 кВ. На таких же напряжениях эксплуатируются и строятся берт-пинчи в Гархинге (ВР-II-а на 160 и ВР на 250 кВ) и Юлихе (TENQ на 160 и HVBP на 250 кВ). Обсуждаются варианты и с более высоким напряжением (500 кВ и 1 МВ). Оригинальный метод получения быстро нарастающего магнитного поля (время нарастания порядка 1 мкс) предложил Р. Вильгельм. Он считает, что нашел решение проблемы энергетики будущего поколения берт-пинчей, хотя с точки зрения инженерных проблем термоядерного реактора его проект со сложными стальными сердечниками и коммутируемыми обмотками может оказаться не менее сложным, чем мегавольтовые системы.

Интересные результаты получены на установках VICASP и TORMAC. В них создается тороидальная конфигурация плазмы с высоким  $\beta$ , обладающая свойствами системы с «минимумом В». Сохранение плотности плазмы ( $n \approx 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ) и температуры ( $T_e \approx 30 \text{ эВ}$ ) в течение времени жизни поля (60 мкс) свидетельствует о равновесии и МГД-устойчивости плазмы в таких системах. Нагрев плазмы осуществляется магнитно-звуковой волной, распространяющейся перпендикулярно внешнему тороидальному магнитному полю. TORMAC представляется одной из весьма удобных систем для создания реактора. Работы над системой ведутся под руководством М. Левина в Калифорнском университете в Беркли совместно с учеными Принстонского университета. Для подобных конфигураций весьма важен вопрос о механизме ухода частиц через магнитные щели, поэтому в ближайшие годы в Принстоне и Беркли предполагают более тщательно изучить эту проблему.

Среди программ тороидальных установок с плазмой при высоком  $\beta$  программа тороидальных пинчей с обратным полем оказывается сейчас наиболее продвинутой в теоретическом, экспериментальном и инженерном отношении.

На конференции было обсуждено несколько проектов термоядерных реакторов.

Ученые Лос-Аламоса представили проекты двух реакторов: прямого (на базе линейного  $\theta$ -пинча) и тороидального (SFTR). Длина прямого реактора 500 м, большой диаметр SFTR — 80 м. Опыт, накопленный при эксплуатации термоядерной установки «Сидлак» (длина камеры порядка 25 м), позволяет более смело искать пути решения проблемы управляемого термоядерного синтеза на столь грандиозных системах. Сложность создания устойчивых замкнутых конфигураций и близость линейных размеров тороидального (~250 м) и прямого (~500 м) вариантов заставляют серьезно задуматься о типе реактора на базе  $\theta$ -пинча. Во всяком случае, представленные на конференцию доклады свидетельствуют о том, что интерес к прямым  $\theta$ -пинчам сохраняется. По этой программе в Лос-Аламосе начаты исследования на двух крупных установках со специально разработанной высоковольтной техникой (используемые напряжения 250—500 кВ).

Сохраняется интерес и к системам со сжатием магнитных потоков и плазмы металлическими лайнерами. Как известно, эти работы наиболее целенаправленно ведутся в ИАЭ им. И. В. Курчатова и в Научно-иссле-

довательской лаборатории военно-морского флота (Вашингтон). Последняя представила два доклада: руководителя программы А. Робсона и П. Терчи. В первом рассматривается возможность создания очень компактного реактора с лайнером, в котором предполагается многократно использовать вращающийся лайнер из жидкого металла. Во втором описываются опыты на новой экспериментальной установке, специально сконструированной и построенной для проведения лайнерных исследований. На этой установке отработано устойчивое обжатие металлических лайнеров (со степенью сжатия до 28 и с конечным полем 1,3 МГс), а также начаты эксперименты с жидкими лайнерами из смеси натрия (22%) и калия (78%). Для анализа динамики лайнеров в этой лаборатории очень широко применяется численный эксперимент на ЭВМ. В докладах показано, что расчеты и эксперименты хорошо согласуются.

Советский Союз представил два доклада по лайнерам, вызвавших большой интерес. В одном сообщается об успешном сжатии нейтрального аргона (до давления  $10^5 \text{ ат}$ ) трехмерно схлопывающимся металлическим лайнером (достигнутая степень сжатия  $\sim 10^3$ ), а также обсуждается идея о немагнитном сжатии и удержании ( $\beta \gg 1$ ) плазмы холодным газом. Во втором — показана возможность использования потоков плазмы, генерируемых установками типа МК-200, для инъекции в системы со схлопывающимися лайнерами. В опытах использовалась плазма с параметрами, близкими к необходимым для создания демонстрационного реактора.

Плазменный фокус по-прежнему остается интересным в реакторном аспекте как способ получения плотной высокотемпературной плазмы, а также как источник термоядерных излучений для материаловедения. В докладах на конференции не было сенсационных сообщений. Все «фокусники» с нетерпением ожидают результатов из Фраскати (Италия). Однако установка К. Мезонье пока еще не отлажена и не дает больших нейтронных потоков. Создается впечатление, что без результатов К. Мезонье никто не осмеливается наращивать энергию конденсаторных батарей фокусных систем, хотя, как это показано в докладе Х. Сахлина из Ливермора, можно ожидать качественных изменений в ходе кривой «нейтронный выход — энергия батареи» при дальнейшем наращивании мощности. Х. Сахлин приводит подробный анализ масштабирования устройств типа «плазменный фокус» с целью создания мощных источников излучений, возможностей получения мощных релятивистских электронных и ионных пучков в таких устройствах. В устном выступлении Х. Сахлин рассказал об интересных опытах по использованию электронного пучка плазменного фокуса для абляции дейтерия в капиллярной полости стеклянной бусинки, устанавливаемой на оси симметрии анода.

К этой работе близка другая работа Ливерморской лаборатории с участием Д. Шерера и сотрудника Университета в Санта-Клара (Калифорния) Д. Чена — эксперимент с Z-пинчем, окруженным газом. В работе рассмотрены численно и экспериментально вопросы быстрой накачки энергии в Z-пинч за времена, меньшие времен развития МГД-неустойчивостей, и при выполнении условий для захвата и использования для нагрева плазмы энергии рождающихся при реакциях синтеза  $\alpha$ -частиц. Результаты опытов можно считать положительными: доказаны экспериментально возможности и быстрого нагрева и поддержания баланса энергии за счет энергии  $\alpha$ -частиц.



Оригинальный плазменный фокус — «гипоциклоидальный пинч» — изучается в Вандербилдском университете (шт. Теннесси) совместно с НАСА. Эксперимент подробно описан в докладе Дж. Ли и Д. Макфарленда. При «трехмерном» сжатии плазмы в системе, которую можно назвать «двойным плазменным фокусом», получена плотность  $n_e > 10^{18}$  см<sup>-3</sup> и температура ~1 кэВ. Плазма с такими параметрами живет более 5 мкс. Удержание сопровождается излучением нейтронов и мягкого рентгена. Интересно, что плазменная конфигурация оказывается весьма долгоживущей. Об этом свидетельствуют имеющие самостоятельный интерес результаты изучения взаимодействия излучения СО<sub>2</sub> лазера (50 Дж в свете, длительность импульса  $\tau = 150$  нс, диаметр луча 5 мм) с плазмой: излучение лазера практически полностью поглощается на протяжении 70 мкс плазмой гипоциклоидального пинча.

На конференции были рассмотрены проекты реакторов на базе «Сциллак», пинча с обратным полем, скрюпича, прямого  $\theta$ -пинча, а также проекты устройств для материаловедческих исследований. Это были рабочие обсуждения без каких-либо революционизирующих новостей, очень полезные для понимания наиболее перспективных путей дальнейшего развития.

Несмотря на насыщенность программы конференции, ее участники и гости находили время для полезных бесед и обсуждений. Следует отметить уверенность большинства участников конференции в необходимости дальнейшей разработки и изучения систем с  $\beta \gg 1$  как в аспекте термоядерного реактора, так и в аспекте их использования в прикладных задачах.

ЦЕРЕВИТИНОВ С. С.

## Советско-американский проект дивертера для реактора-токамака

В октябре 1975 г. группа советских и американских физиков и инженеров завершила начальный этап совместной разработки концепционного проекта дивертера для реактора-токамака. Необходимость подобной работы остро ощущается в связи с планируемым строительством крупных токамаков. Еще недавно дивертеры рассматривались как один из возможных методов борьбы с примесями в токамаках. Однако для двухкомпонентных токамаков, работающих с малым  $n_t$ , дивертеры могут оказаться единственным средством откачки водорода, инжектируемого в разрядную камеру.

Проектируемый дивертер базируется на таких параметрах ( $R = 6,25$  м;  $a = 2$  м;  $B_T = 50$  кЭ,  $I_p = 7$  МА), которые позволяют использовать его в реакторах T-20, ORNL EPR и ANL EPR.

Основные физические и инженерные требования к дивертерным системам можно сформулировать следующим образом. Во-первых, обеспечение надежной изоляции плазмы от стенок в разрядной камере и образование экранирующего дивертерного слоя. Во-вторых, создание условий, при которых можно обеспечить высокие скорости откачки и малые обратные потоки нейтральных атомов водорода в разрядную камеру. В-третьих, максимальное уменьшение удельных тепловых нагрузок на контактные пластины и облегчение условий теплосъема с них. В-четвертых, выбор оптимального расположения и конструкции дивертерных катушек, которые позволили бы иметь надежную защиту от нейтральных потоков, разбирать ее и создавать необходимую магнитную конфигурацию самым простым и экономичным способом с наиболее эффективным использованием объема тороидальных катушек.

В разработанном проекте дивертера (см. схему) все эти проблемы решаются достаточно удовлетворительно. Благодаря длинным дивертерным каналам удается использовать так называемые «плазменные затворы» — значительную ионизацию нейтральных частиц внутри канала и повысить давление в дивертерных камерах до  $(2-3) \cdot 10^{-5}$  мм рт. ст., при котором только и возможно обеспечить необходимую скорость откачки, определяемую диффузией плазмы из токового шнура. Вывод плазменных потоков к внешней периферии тороидальной системы снижает удельные тепловые нагрузки на контактные (нейтрализующие) пластины и облегчает проблемы теплосъема, а также позволяет иметь дивер-

терные камеры большого объема, что в свою очередь дает возможность использовать наиболее эффективные встроенные откачные системы. Характерной особенностью дивертерных обмоток является то, что их суммарный ток внутри тороидальных катушек равен нулю (токи в обмотках DF-1 и DF-2 равны и обратны по направлению) и, следовательно, они могут быть сделаны в виде двойных полуколец; это обеспечивает возможность демонтажа всей системы на два полукольца. Эффективность использования объема и расположения нейтронной защиты ясны из рисунка.

Проблемы изоляции плазмы от стенок и создания экранирующего дивертерного слоя в предлагаемом проекте, как и в других дивертерных системах, требуют дальнейшего изучения, главным образом с помощью специальных экспериментов.

Завершенная часть работы над проектом определила, естественно, лишь основные особенности разрабаты-

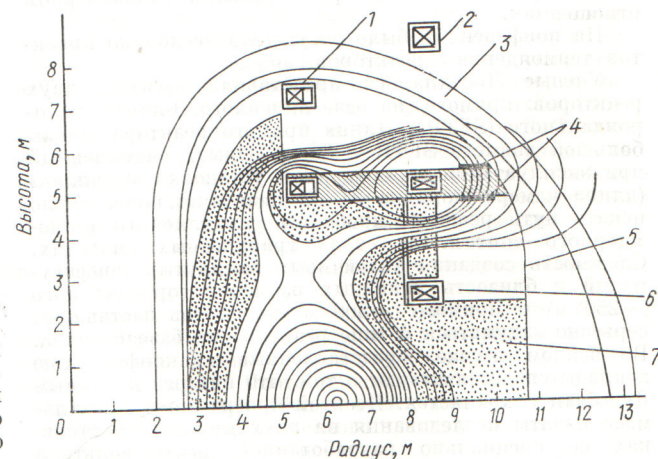


Схема проекта дивертера для реактора-токамака:

1 — обмотка DF-1; 2 — EF-1; 3 — катушка TF; 4 — контактные (нейтрализующие) пластины; 5 — разрядная камера; 6 — обмотка DF-2; 7 — бланкет и нейтронная защита