

УДК 533.951

АНАЛИЗ ЭВОЛЮЦИИ ПЛАЗМЫ ПРИ СРЫВЕ ПЛАЗМЫ ПО ВЕРТИКАЛИ В МОДИФИЦИРОВАННОМ ТОКАМАКЕ T-15

*В.Н. Докука, В.Э. Лукаш, Р.Р. Хайрутдинов**НИИ «Курчатовский институт», Москва, Россия*

Описываются результаты моделирования «горячих» VDE в плазме модифицированного токамака T-15, в процессе которых развиваются огромные электромагнитные нагрузки. Расчёты выполнены с помощью кода ДИНА с учётом образования гало-тока в периферийной области плазмы токамака в процессе срыва. Моделирование срывов осуществляется для сценариев с омическим и дополнительным нагревом плазмы с целью оценки электромагнитных нагрузок на внутрикамерные проводящие структуры и на элементы вакуумной камеры. Расчёты показывают, что наибольшие нагрузки как от наведённого тока, так и от полоидального компонента гало-тока достигаются при срыве плазмы вниз. На нижней пластине пассивной стабилизации величина нагрузки ~1 МН. Максимальная суммарная нагрузка на элементы вакуумной камеры составляет ~3,19 МН. Максимальные усилия являются достаточно кратковременными, порядка десятка мс. Полученные данные электромагнитных нагрузок необходимы для прочностных расчётов вакуумной камеры и пассивных структур внутри вакуумной камеры.

Ключевые слова: токамак, равновесие плазмы, срыв плазмы по вертикали, тепловой срыв, гало-токи, электромагнитные нагрузки.

ANALYSIS OF PLASMA EVOLUTION DURING VERTICAL PLASMA DISRUPTION IN THE MODIFIED TOKAMAK T-15

*V.N. Dokuka, V.E. Lukash, R.R. Khayrutdinov**NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia*

The simulation results of "hot" VDE in tokamak plasma in a modified T-15 in which the large electromagnetic loadings are developing are described. The calculations are performed with using DINA code taking into account halo currents in the peripheral region of a tokamak plasma in the process of disruption. Simulations of plasma disruptions are fulfilled for scenarios with Ohmic and auxiliary plasma heating with the purpose of calculating of the electromagnetic loads on the elements of vacuum vessel and conductive structures inside it. The calculations show that the most strong loadings are achieved from as both induced current and poloidal component of halo current during plasma disruptions down. On the bottom plate of passive stabilization, the value of EM-loading is ~1 MN. The maximum total load on elements of the vacuum chamber is ~3.19 MN. The duration of maximum loadings is rather short, about ten milliseconds. The obtained electromagnetic loadings are necessary for strength calculations vacuum chamber and passive structures inside it.

Key words: tokamak, plasma equilibrium, vertical plasma disruption, thermal quench, halo currents, electro-magnetic loadings.

ВВЕДЕНИЕ

В модернизированном токамаке T-15 [1] предполагается использовать вертикально вытянутую плазму, как имеющую лучшие характеристики. Однако такая плазма обладает неустойчивостью в вертикальном направлении. В рабочем состоянии стабилизация положения плазмы обеспечивается системой обратных связей. В случае нарушения работы системы управления возможен неконтролируемый уход плазмы по вертикали (VDE — Vertical Displacement Event), заканчивающийся срывом плазменного тока. Эффект срыва тока плазмы в токамаке представляет собой одно из наиболее опасных по своим последствиям явлений. В процессе срыва становится возможным выделение большого количества энергии на обращённых к плазме элементах вакуумной камеры, что приводит к эрозии конструкционных материалов. Из-за быстрого перемещения плазменного шнура в процессе срыва возникают дополнительные механические усилия за счёт наведённого в механической конструкции электрического тока, что также повышает вероятность разрушения элементов конструкции токамака. Вследствие низкой температуры плазмы после теплового срыва (порядка 4—10 эВ) и, следовательно, высокой резистивности плазмы происходит быстрое затухание плазменного тока. Такое затухание приводит к большой величине напряжения на обходе плазмы, которое создаёт условия для генерации тока ускоренных электронов и тока-гало в периферийной плазме, замыкающихся на стенку вакуумной камеры. При этом полоидальный компонент тока-гало из-за высокого значения тороидального магнитного поля может создавать существенные механические нагрузки в районе точки касания плазмой стенки вакуумной камеры. При затухании тока в плазме часть его перебрасывается на проводящие элементы вакуумной камеры, что ещё увеличивает механическую нагрузку на камеру.

Условно явление VDE можно разделить на два типа [2] по моменту начала быстрой диссипации тепловой энергии плазмы — теплового срыва, в результате которого происходит падение плазменного давления практически до нуля. К первому типу VDE обычно относят явление, при котором сам тепловой срыв является инициатором неуправляемого движения плазмы по вертикали, — так называемое «холодное» VDE, которое ещё принято называть «большой срыв» (MD — Major Disruption). Во втором случае VDE возникает после начала неуправляемого движения плазмы в вертикальном направлении вследствие её вертикальной неустойчивости («горячее» VDE). Неуправляемое движение плазмы по вертикали в этом случае начинается из-за потери управляемости положением плазменного шнура в результате малых плазменных возмущений в процессе разряда. Собственно тепловой срыв при этом происходит при лимитерной конфигурации плазмы после «срезания» её до уровня запаса устойчивости $q_{95} \approx 1,5\text{—}2$ [3].

В представленной работе рассматриваются результаты моделирования только «горячих» VDE в плазме T-15, выполненного с помощью плазмозфизического кода ДИНА [4] в соответствии с моделью для моделирования срывов плазмы с учётом гало-тока [5]. В статье приводится описание магнитной системы токамака T-15; рассматриваются результаты VDE вверх, который является наиболее вероятным в условиях стандартной плазмы токамака T-15; приводятся анализ электромагнитных нагрузок в случае VDE вверх, соответствующие, на проводящие структуры, расположенные внутри вакуумной камеры, и вакуумную камеру и анализ последствий VDE вниз, который обеспечивается созданием соответствующего горизонтального магнитного поля; анализируются электромагнитные нагрузки на вакуумную камеру и проводящие структуры внутри вакуумной камеры при срыве вниз; приведены выводы.

МАГНИТНАЯ СИСТЕМА ТОКАМАКА T-15

Структура магнитной системы вместе с вакуумной камерой и пассивными элементами токамака T-15 представлена на рис. 1, а. Для управления положением, током и формой плазмы используются 10 катушек полоидального магнитного поля, к которым относятся три секции центрального соленоида (I_{CSU} , I_{CSC} , I_{CSL}), шесть обмоток управления формой и положением плазменного шнура (I_{PF1} — I_{PF6}) и обмотки HFC, обеспечивающие стабилизацию скорости смещения плазмы по вертикали относительно нуля. Ток в этих катушках, за исключением обмотки HFC, в процессе расчёта предполагался неизменным. Проводящие элементы вакуумной камеры и пассивные элементы (витки пассивной стабилизации плазмы по вертикали PS и стальные пластины DIV, расположенные под диверторным устройством и служащие для дополнительной стабилизации плазмы при срывах) моделируются набором аксиально-симметричных элементов. На рис. 1, б представлена базовая конфигурация плазмы в токамаке T-15 на стадии плато тока.

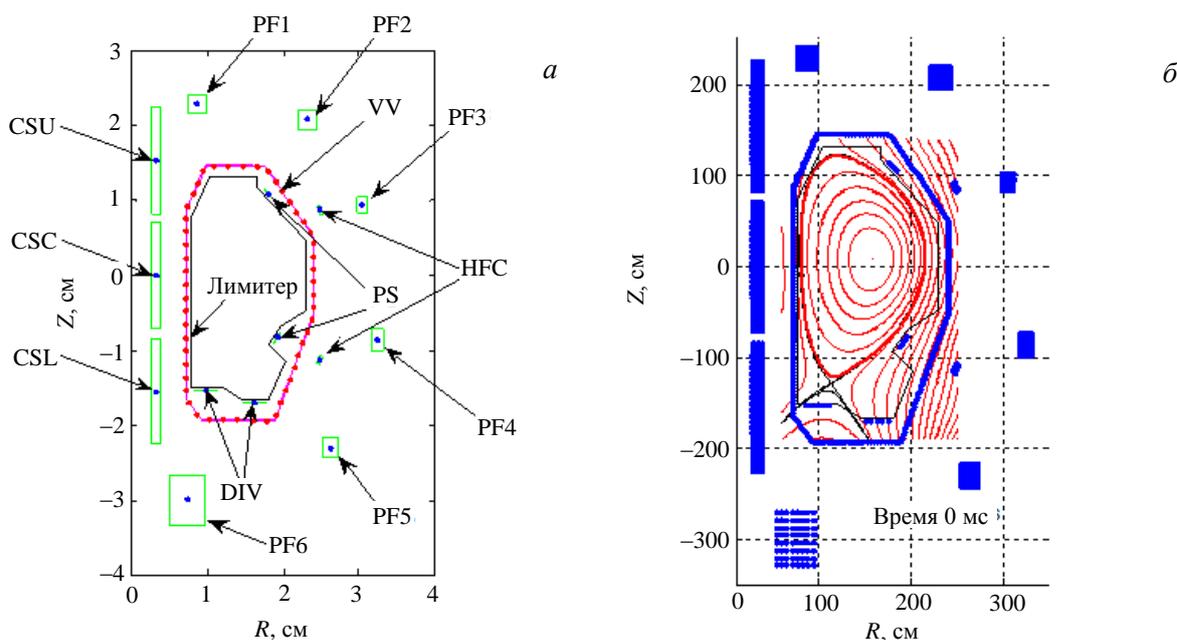


Рис. 1. Структура магнитной системы, вакуумная камера токамака T-15 (а) и базовая конфигурация плазмы на стадии плато тока (б)

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ САМОПРОИЗВОЛЬНОГО VDE В ТОКАМАКЕ T-15

Моделирование срыва плазмы вверх было проведено для омического сценария и сценария с дополнительным нагревом плазмы (ДНП) [1]. Начальное равновесие плазмы соответствует стадии плато тока, при этом ток в обмотках центрального соленоида (ЦС) и управления формой и положением плазмы взят на момент времени 1,6 с из результатов моделирования омического сценария разряда и на момент времени 2 с для сценария с ДНП, которые представлены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Ток в ЦС и обмотках управления формой плазмы

Параметр	Сценарий	
	с омическим нагревом плазмы	с дополнительным нагревом плазмы
Ток в верхней секции ЦС I_{CSU} , МА·виток	-6,45	-3,76
Ток в центральной секции ЦС I_{CSC} , МА·виток	-8,73	-6,25
Ток в нижней секции ЦС I_{CSL} , МА·виток	-6,03	-3,48
Ток в обмотке управления формой, МА·виток:		
I_{PF1}	1,29	1,21
I_{PF2}	-0,91	-0,73
I_{PF3}	-0,25	-0,40
I_{PF4}	-0,56	-0,77
I_{PF5}	-1,32	-1,00
I_{PF6}	6,65	6,48

В численном эксперименте исследовался случай самопроизвольного VDE при выключенной системе управления положением плазмы. Актуальность проведения моделирования VDE для случая омического разряда аргументируется тем, что отработка всех технологических систем токамака, а также системы магнитного управления плазмой первоначально проводится в сценариях с омическим нагревом. Основной целью выполненных расчётов является исследование электромагнитных нагрузок на вакуумную камеру и элементы пассивных структур токамака T-15 в процессе срыва плазмы. Полученные данные используются для проведения прочностных расчётов вакуумной камеры.

Рассмотрим последовательность событий в процессе «горячего» VDE, которое начинается в результате внезапной потери вертикальной устойчивости до начала теплового срыва, которая может являться результатом, например, отказа в работе системы управления положением плазмы, слишком большого возмущения плазменного равновесия, превышения предела стабильности моды $n = 0$ и т.д. В этом случае плазма начинает неуправляемо двигаться вертикально, сохраняя при этом основную часть своей первоначальной тепловой энергии и тока. Анализ направления движения плазмы в такой ситуации показывает, что в связи со структурой магнитной системы токамака T-15 наиболее вероятным является направление «вверх». Для инициации VDE вниз необходимо кратковременное принудительное воздействие со стороны системы управления плазмой, приводящее к неконтролируемому начальному смещению плазменного шнура вниз на 5—10 см. На рис. 2 показана схема последовательности событий в процессе «горячего» VDE в плазме токамака.

В процессе движения в вертикальном направлении плазма становится лимитерной после соприкосновения с защитным покрытием вакуумной камеры. При этом режим удержания энергии переходит из H- в L-моду, в результате чего к моменту теплового срыва плазма теряет до 10% от первоначального запаса энергии [6]. Из-за срезания части плазмы в процессе движения в лимитерной конфигурации происходит уменьшение тороидального магнитного потока, заключенного внутри последней замкнутой магнитной поверхности (ПЗМП), и снижение величины запаса устойчивости q_b на границе плазмы.

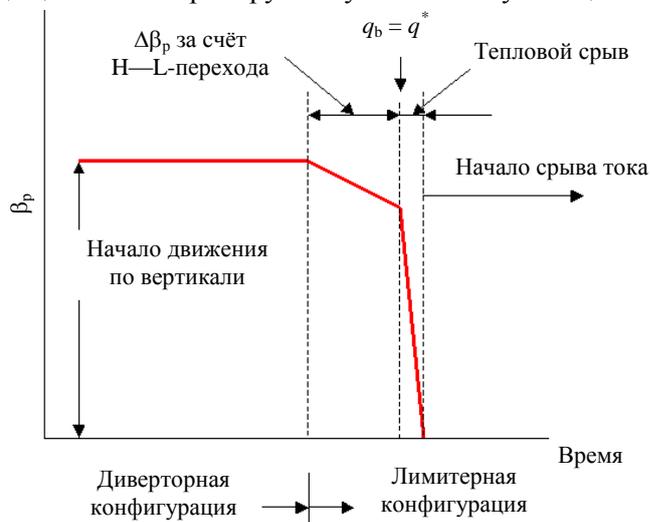


Рис. 2. Последовательность событий в процессе «горячего» VDE в плазме токамака

Эксперименты показывают, что после того, как q_b становится меньше некоторой критической величины q^* [7], возбуждается МГД-неустойчивость, приводящая к быстрому выбросу тепловой энергии (тепловому срыву) и началу процесса затухания тока. Быстрое уменьшение тока в плазме вследствие её возросшей резистивности приводит к появлению большой величины напряжения на обходе плазмы. Наличие этого напряжения, а также уменьшение заключённого внутри ПЗМП тороидального магнитного потока, приводящего к появлению напряжения в полоидальном направлении, вызывает генерацию электрического тока внутри области (тока-гало), окружающей ПЗМП [8]. При проведении моделирования «горячего» VDE критическая величина запаса магнитной устойчивости на границе плазменного шнура q^* полагается равной 2. Кроме того, предполагается, что в процессе VDE профиль плотности плазмы остаётся плоским, а её величина поддерживается постоянной на уровне $5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$. Процессы переноса энергии в плазме при этом не учитывались, а величина электронной температуры в плазме после теплового срыва предполагалась постоянной и равной 6 эВ.

На рис. 3 представлена эволюция положения магнитной оси ($Z_{\text{mag}}, R_{\text{mag}}$) в процессе срыва плазмы вверх для омического разряда и с ДНП. При срыве вверх происходит быстрый переход (примерно на 20 мс) в лимитерную конфигурацию из-за касания плазмой верхней наклонной части вакуумной камеры, примыкающей к ее внутреннему обводу. Синий цвет на этом рисунке и последующих соответствует случаю срыва в режиме омического разряда, красный — срыву в режиме с ДНП. В процессе движения плазмы запас устойчивости на её границе q_a (в дальнейшем под q_a понимается величина q_{95}) достигает критического значения q^* . После чего давление плазмы резко падает в результате теплового срыва, снижается значение полоидальной β_p и наблюдается следующее за МГД-возмущением перераспределение профиля тока, которое приводит к снижению величины внутренней индуктивности I_i . Резкий сброс внутренней индуктивности приводит к кратковременному подъёму тока плазмы, за которым, как видно на рис. 4, наступает стадия резистивного затухания тока плазмы и генерации тока в области гало (гало-тока). В случае срыва из омического сценария разряда тепловой срыв наступает на 173,6 мс и, соответственно, на 277,5 мс при срыве в режиме с ДНП. Таким образом, при дополнительном нагреве наблюдается почти 100 мс задержка теплового срыва. Это объясняется более высокой начальной температурой плазмы, более высокой проводимостью плазмы и более медленным затуханием плазменного тока. В итоге выполнение условия $q_b < q^*$ для момента начала генерации гало-тока в периферийной плазме наступает значительно позднее. Для случая срыва из омического сценария разряда образование гало-тока наступает на 173,9 мс, тогда как при срыве из сценария с ДНП это происходит на 277,7 мс.

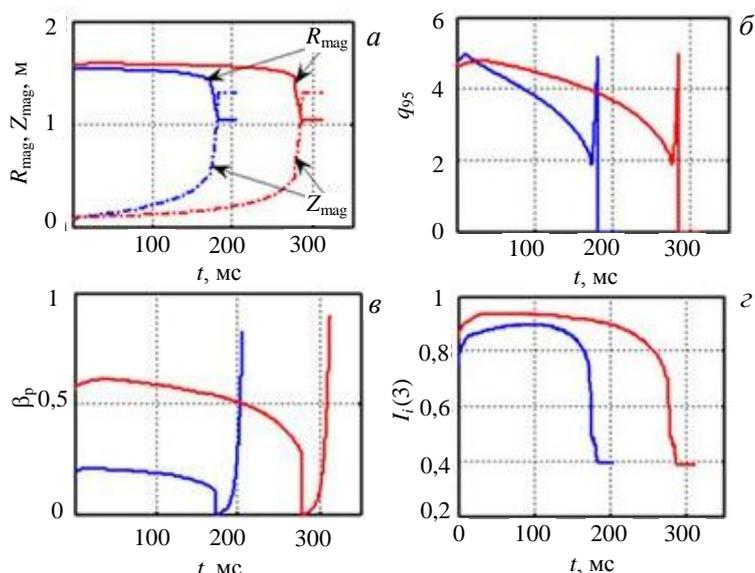


Рис. 3. Эволюция положения магнитной оси ($Z_{\text{mag}}, R_{\text{mag}}$) (а), запаса устойчивости на границе шнура q_{95} (б), полоидальной β_p (в) и внутренней индуктивности $I_i(3)$ (г) в процессе срыва плазмы вверх

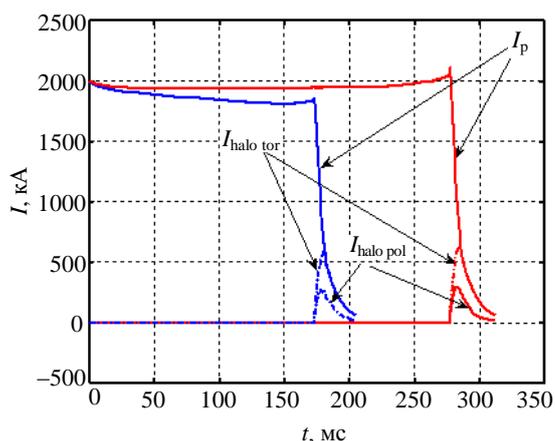


Рис. 4. Эволюция тока плазмы I_p и компонентов гало-тока $I_{\text{halo tor}}$ (равенство $I_{\text{halo tor}}$ и I_p соответствует моменту размыкания магнитных поверхностей) при срыве плазмы вверх

В табл. 2 приведены характерные значения гало-тока при срыве. Максимального значения гало-ток достигает примерно в момент полного размыкания магнитных поверхностей, когда весь тороидальный ток I_p переносится тороидальным компонентом гало-тока $I_{\text{halo tor}}$. Максимальные значения полоидального компонента гало-тока для рассматриваемых случаев срыва тока плазмы составляют соответственно 265,8 и 292,1 кА.

Т а б л и ц а 2. Характерные значения параметров при VDE вверх

Параметр	Разряд	
	омический	с ДНП
Момент образования гало-тока, мс	173,9	277,7
Момент размыкания магнитных поверхностей, мс	180,9	285,4
Максимум тороидального компонента гало-тока, кА	631,0	682,7
Максимум полоидального компонента гало-тока, кА	265,8	292,1
Максимум тока в вакуумной камере, кА	722,8	801,4
Экстремум тока в витках пассивной стабилизации, кА	-90,3	-88,4
Максимум тока в обмотке управления плазмой по вертикали, кА	30,6	35,8
Экстремум тока в левой пластине под дивертором, кА	10,9	-13,3
Экстремум тока в правой пластине под дивертором, кА	12,1	13,7

Из сравнения рис. 3 и 4 видно, что нарастание гало-тока ведёт к замедлению движения плазмы по вертикали и снижению скорости уменьшения площади поперечного сечения плазменного шнура, включая область гало. Из-за высокого значения тороидального магнитного поля полоидальный компонент гало-тока может создавать существенные механические нагрузки в районе точки касания плазмой вакуумной камеры (ВК). Оценки электромагнитных нагрузок от полоидального компонента гало-тока выполнены для момента, соответствующего максимальным значениям гало-тока. При срыве из омического сценария максимальный гало-ток, равный 265,8 кА, наблюдается на 178,3 мс, тогда как при срыве в сценарии с ДНП максимальная величина полоидального гало-тока равна 292,1 кА и достигается на 282,6 мс. При этом значения усилий для указанных сценариев срыва отличаются незначительно. Суммарная нагрузка на элементы вакуумной камеры при срыве из сценария ДНП достигает ~1,40 МН, половина этой нагрузки приходится на наклонную часть ВК, прилегающую к её внутреннему обводу и горизонтальной верхней части ВК. Полное размыкание магнитных поверхностей наступает на 180,9 мс при омическом нагреве и, соответственно, на 285,4 мс в режиме с ДНП.

На рис. 5 показана динамика тока в ВК, в пластинах под диверторным устройством I_{div} и тока в витках пассивной стабилизации I_{ps} . Видно, что при затухании тока в плазме после теплового срыва часть его тороидального компонента перебрасывается на проводящие в тороидальном направлении элементы ВК и элементы пассивной стабилизации, расположенные внутри камеры, что дополнительно увеличивает ме-

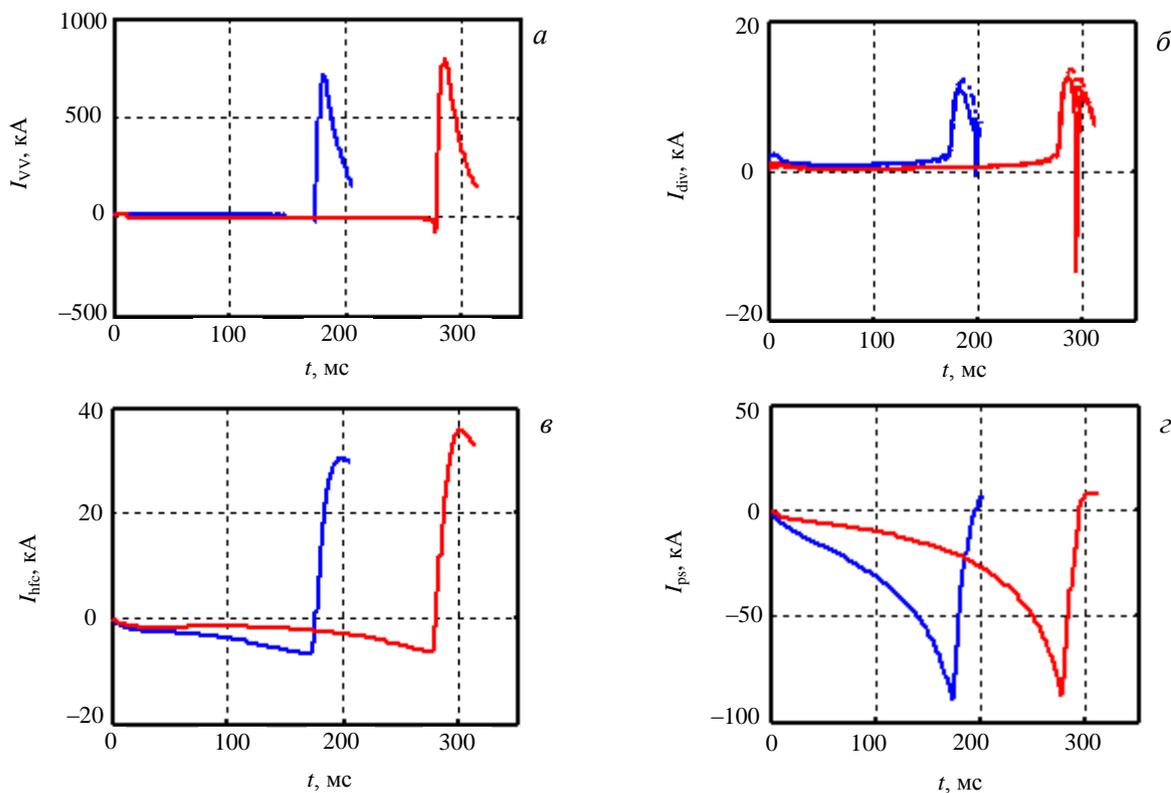


Рис. 5. Динамика токов на вакуумной камере I_{VV} (а) и в пластинах I_{div} (б), расположенных под диверторным устройством, ток через виток в «быстрой» обмотке управления плазмой по вертикали I_{hfc} (в), ток в витках пассивной стабилизации I_{ps} (г)

ханическую нагрузку на неё. Отметим, что ток в пластинах пассивной стабилизации I_{ps} и ток I_{hfc} через витки в «быстрой» обмотке управления плазмы по вертикали НФС начинают падать с момента начала движения плазмы по вертикали. После появления гало-тока наблюдается резкий рост тока в пассивных пластинах и в витках «быстрой» обмотки.

Характерные конфигурации плазмы в основные моменты развития срыва вверх в режиме с ДНП представлены на рис. 6. В момент возникновения гало-тока ширина гало-области пренебрежимо мала и растёт примерно до момента максимальных значений гало-тока. Далее площадь сечения области гало меняется незначительно. При дальнейшем развитии срыва происходит достаточно быстрое сокращение области плазмы, и в тот момент, когда тороидальный ток полностью переходит в тороидальный компонент гало-тока, наблюдается размыкание последней замкнутой магнитной поверхности. После чего весь плазменный ток течёт в гало-области при конфигурации с полностью разомкнутыми магнитными поверхностями. Аналогичная картина эволюции конфигурации плазмы наблюдается при срыве плазмы вверх в омическом разряде.

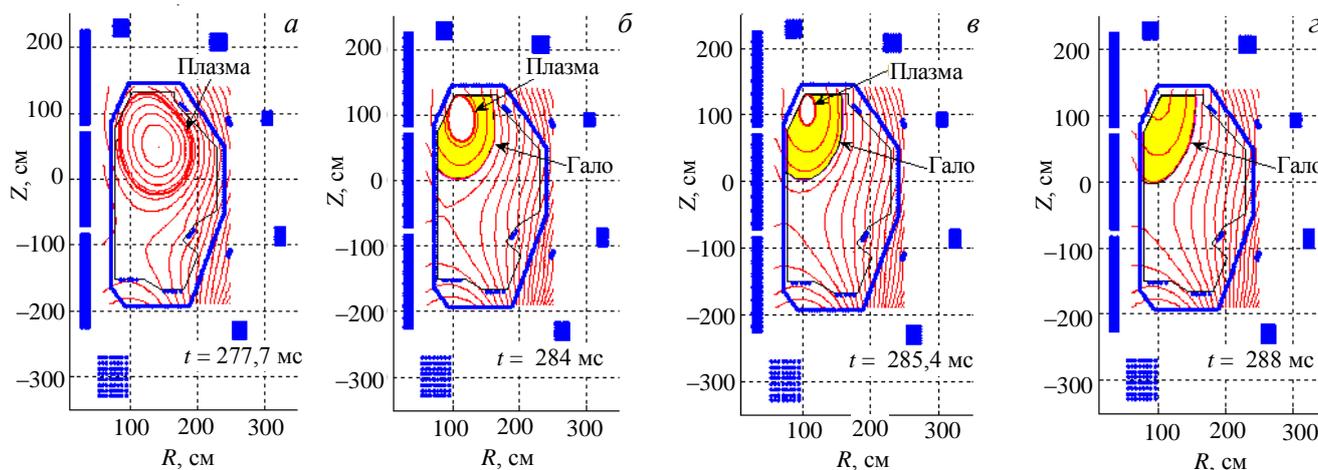


Рис. 6. Эволюция конфигурации в процессе срыва плазмы вверх в режиме с ДНП на моменты: *a* — возникновения гало-тока; *б* — максимума величины гало-тока; *в* — размыкания последней замкнутой магнитной поверхности; *г* — гало-область с полностью разомкнутыми магнитными поверхностями в процессе срыва в режиме с ДНП

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ НАГРУЗКИ НА ВНУТРИКАМЕРНЫЕ ПРОВОДЯЩИЕ СТРУКТУРЫ ПРИ СРЫВЕ ПЛАЗМЫ ВВЕРХ

Потеря устойчивости плазмы в процессе разряда имеет ряд негативных последствий, влияющих на эксплуатационные свойства конструкции токамака. Эти последствия связаны, в первую очередь, с возникновением механических нагрузок в элементах конструкции токамака в процессе развития срывов. На рис. 7 показана эволюция механических нагрузок на верхний (*a*) и нижний (*б*) витки пассивной стабилизации при срывах из омического сценария (синий) и из сценария с ДНП (красный). Максимальные и минимальные

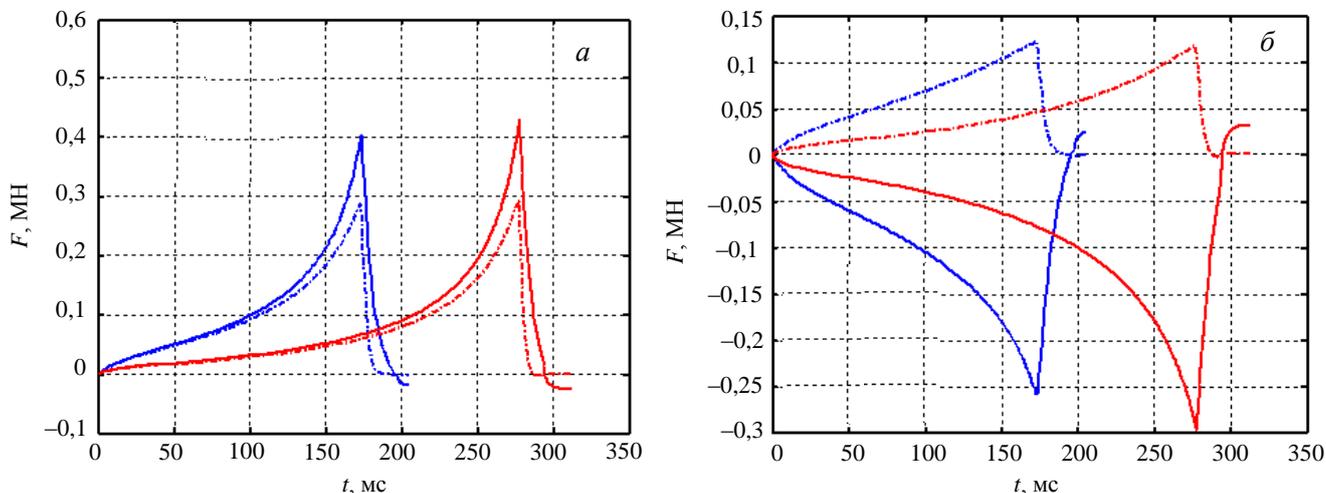


Рис. 7. Динамика нагрузок на верхний (*a*) и нижний (*б*) витки пассивной стабилизации: омический сценарий — синие линии; с ДНП — красные; сплошные — F_r ; штрихпунктирные — F_z

значения горизонтальной и вертикальной составляющих сил, приложенных к верхней и нижней пластинам пассивной стабилизации, представлены в табл. 3. Следует отметить незначительное отличие диапазонов изменения силовых нагрузок для срывов в омическом случае и в режиме с ДНП. Некоторое увеличение горизонтальной составляющей силы F_r при срыве в режиме с ДНП объясняется большими значениями β_p и, соответственно, вертикального поля B_z , необходимого для удержания плазмы по горизонтали на стадии плато тока перед наступлением явления срыва тока плазмы.

Т а б л и ц а 3. Нагрузки на витки пассивной стабилизации при VDE вверх

Параметр	Разряд	
	омический	с ДНП
Верхний виток пассивной стабилизации		
Максимум горизонтального компонента силы $F_{r, \max}$, МН	0,41	0,43
Минимум горизонтального компонента силы $F_{r, \min}$, МН	-0,02	-0,03
Максимум вертикального компонента силы $F_{z, \max}$, МН	0,29	0,29
Минимум вертикального компонента силы $F_{z, \min}$, МН	0	0
Нижний виток пассивной стабилизации		
Максимум горизонтального компонента силы $F_{r, \max}$, МН	0,03	0,03
Минимум горизонтального компонента силы $F_{r, \min}$, МН	-0,26	-0,30
Максимум вертикального компонента силы $F_{z, \max}$, МН	0,12	0,12
Минимум вертикального компонента силы $F_{z, \min}$, МН	0	0

На рис. 8 показана динамика электромагнитных нагрузок на левую (а) и правую (б) пластины, расположенные под диверторным устройством. Максимальные и минимальные значения горизонтальной и вертикальной составляющих сил, приложенных к левой и правой пластинам, лежащим под диверторным устройством, представлены в табл. 4. Видно, что динамика усилий на пластины и максимальные нагрузки оказываются достаточно близкими для омического случая и для режима с ДНП.

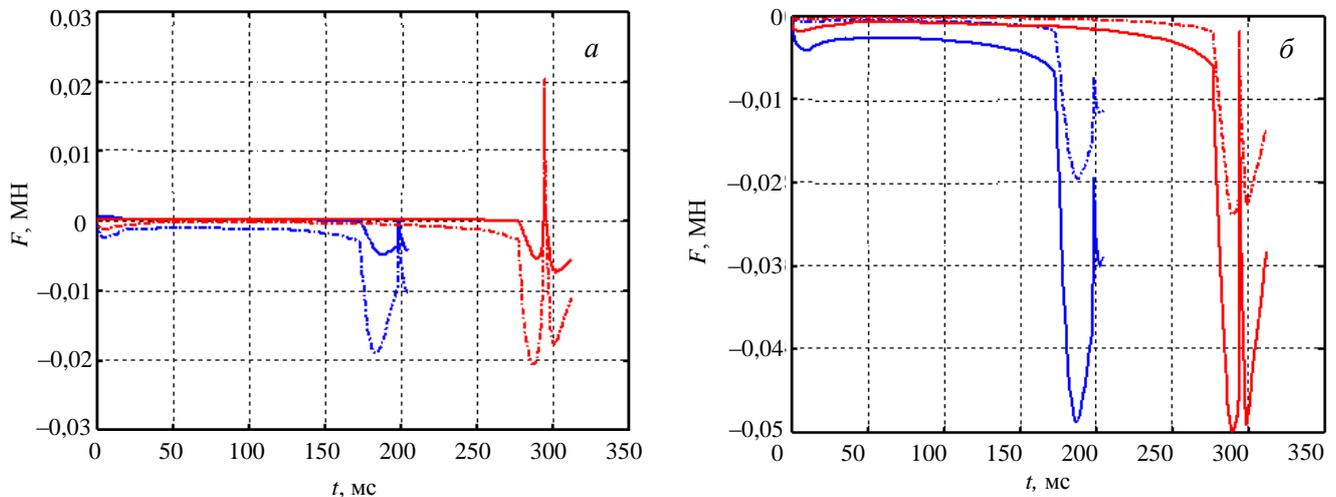


Рис. 8. Динамика нагрузок на левую (а) и правую (б) пластины, расположенные под диверторным устройством: омический сценарий — синие линии; с ДНП — красные; сплошные — F_r ; штрихпунктирные — F_z

Т а б л и ц а 4. Нагрузки на пластины под диверторным устройством при срыве плазмы вверх

Параметр	Разряд	
	омический	с ДНП
Левая пластина		
Максимум горизонтального компонента силы $F_{r, \max}$, МН	0	0,006
Минимум горизонтального компонента силы $F_{r, \min}$, МН	-0,005	-0,007
Максимум вертикального компонента силы $F_{z, \max}$, МН	0	0,020
Минимум вертикального компонента силы $F_{z, \min}$, МН	-0,019	-0,021
Правая пластина		
Максимум горизонтального компонента силы $F_{r, \max}$, МН	0	0
Минимум горизонтального компонента силы $F_{r, \min}$, МН	-0,049	-0,050
Максимум вертикального компонента силы $F_{z, \max}$, МН	0	0
Минимум вертикального компонента силы $F_{z, \min}$, МН	-0,020	-0,024

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ НАГРУЗКИ НА ВАКУУМНУЮ КАМЕРУ ПРИ VDE ВВЕРХ

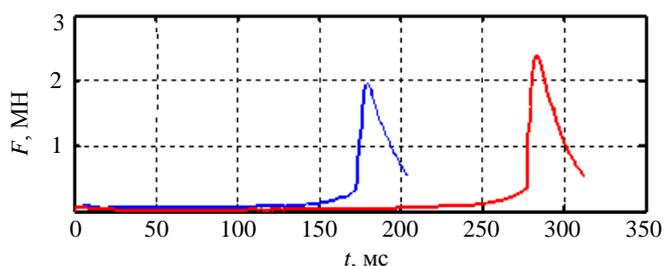


Рис. 9. Динамика суммарных усилий на ВК во время срыва: омический сценарий — синий цвет, с ДНП — красный

На рис. 9 представлена динамика суммарных усилий на ВК во время срыва плазмы вверх. Максимальный ток на ВК для омического случая 721,8 кА, который достигается в момент времени 180,9 мс, тогда как максимум суммарных усилий на вакуумной камере имеет место на 179,9 мс и составляет 1,96 МН. Для режима с ДНП величина максимального тока 801,4 кА в момент времени 285,2 мс. Усилие на ВК максимально при $t = 284,0$ мс и равняется 2,41 МН. Таким образом, максимальное усилие наступает примерно на 1 мс ранее момента достижения максимальной величины суммарного тока в вакуумной камере. Отметим, что нагрузка в случае с ДНП примерно на 20% выше, чем в случае срыва в режиме омического разряда.

На рис. 10 показано распределение усилий на ВК в момент максимальной величины этих усилий для омического сценария (а) и при ДНП (б). Минимальные нагрузки наблюдаются в нижней части вакуумной камеры и в нижней половине её внутреннего обвода, тогда как максимальные усилия концентрируются на внешнем обводе вакуумной камеры. На рис. 11 показано мгновенное распределение тока и нагрузок в элементах вакуумной камеры на момент, когда достигаются максимальные усилия на вакуумную камеру для анализируемых срывов.

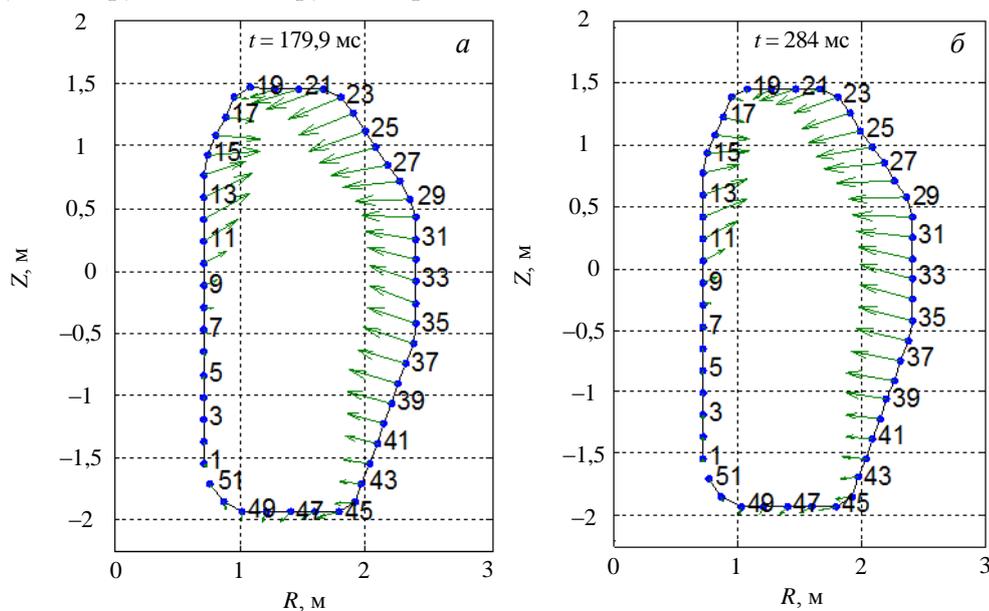


Рис. 10. Распределение усилий на ВК в момент максимального тока в вакуумной камере для омического сценария (а) и при ДНП (б)

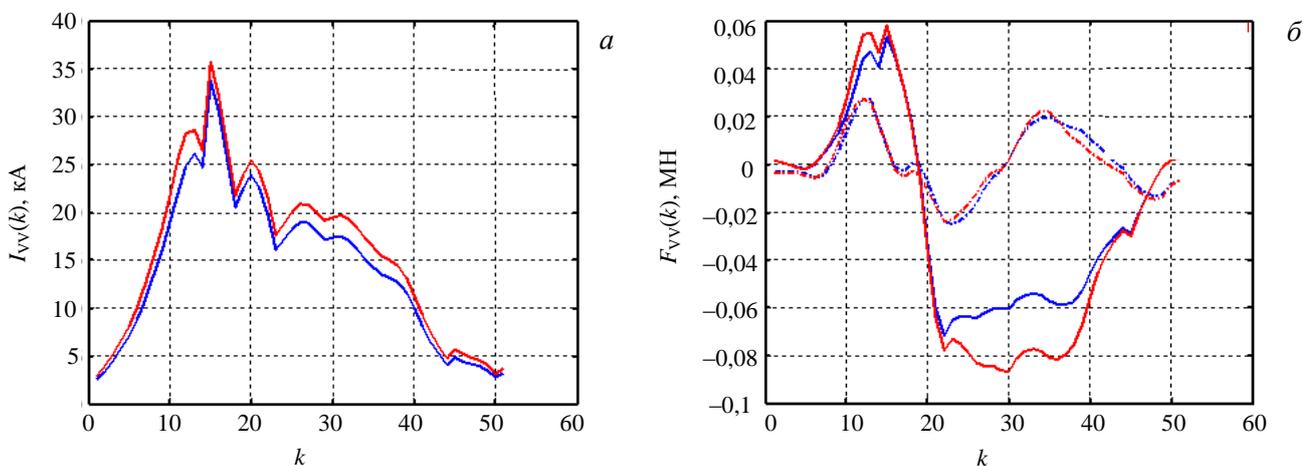


Рис. 11. Распределение тока и силовых нагрузок в элементах вакуумной камеры на момент, когда достигается максимум суммарной нагрузки на ВК: для омического разряда — 179,9 мс; с ДНП — 284,0 мс

Распределение тока и силовых нагрузок относится к моменту времени 179,9 мс для омического разряда и, соответственно, к 284,0 мс для срыва в режиме с ДНП. Нумерация элементов ВК по горизонтальной оси выполнена в соответствии с рис. 10. Минимальные усилия локализованы в нижней части ВК. Максимальная величина усилий на элемент ВК не превышает 0,1 МН.

АНАЛИЗ VDE ВНИЗ В ТОКАМАКЕ T-15

Срыв плазменного шнура вниз в случае диверторной конфигурации плазмы с X-точкой внизу считается более опасным с точки зрения нагрузок на элементы пассивной структуры токамака от полоидального компонента гало-тока [9]. Причиной возникновения VDE вниз в плазме токамака T-15 может служить её принудительное смещение вниз перед срывом на $\sim 1,5$ см. В частности, одной из таких причин может рассматриваться кратковременный сбой в работе системы магнитного управления, когда в течение 8—10 мс в контур управления плазмой по вертикали подаётся напряжение ~ 100 В для создания соответствующего горизонтального магнитного поля. После такого «затравочного» смещения плазмы наступает самопроизвольная фаза развития срыва.

На рис. 12 показана эволюция положения магнитной оси (Z_{mag} , R_{mag}) в процессе срыва плазмы вниз для омического разряда (синий) и разряда с ДНП (красный). В отличие от срыва вверх переход к лимитерной конфигурации наступает за несколько мс до теплового срыва, в момент касания плазмой диверторного устройства. Когда запас устойчивости на её границе q_a достигает критического значения q^* , как и в случае VDE вверх, наступает тепловой срыв. На рис. 13 виден характерный кратковременный подъём тока плазмы, обусловленный снижением внутренней индуктивности I_i плазмы, следующим за МГД-перераспределением профиля тока. При этом генерация гало-тока наступает после теплового срыва. Эволюция тороидального и полоидального компонентов гало-тока показана на рис. 13. В случае срыва плазмы вниз из омического сценария разряда тепловой срыв наступает в момент времени 128,4 мс и, соответственно, в 148,0 мс при срыве в режиме с ДНП, для которого наблюдается задержка 20 мс с наступлением теплового срыва. Это связано с более высокими значениями начальной температуры плазмы и проводимости плазмы, что соответствует более медленному затуханию плазменного тока.

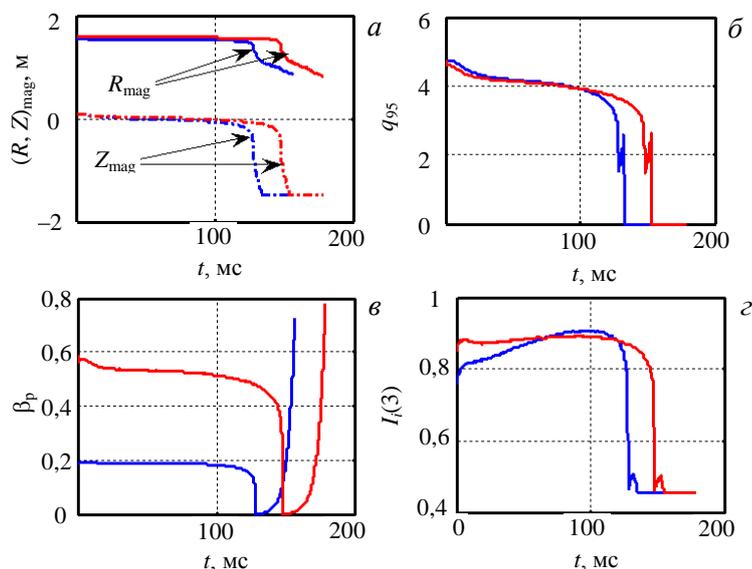


Рис. 12. Эволюция положения магнитной оси (Z_{mag} , R_{mag}) (а), запаса устойчивости на границе шнура q_{95} (б), полоидальной β_p (в) и внутренней индуктивности $I_i(3)$ (г) в процессе срыва плазмы вниз

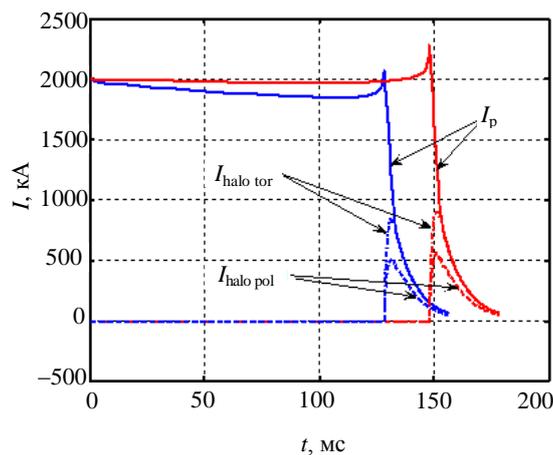


Рис. 13. Эволюция тока плазмы I_p и компонентов гало-тока $I_{\text{halo tor}}$ (равенство $I_{\text{halo tor}}$ и I_p соответствует моменту размыкания магнитных поверхностей) при срыве плазмы вниз

В табл. 5 приведены характерные значения гало-тока при срыве плазмы вниз. Максимальные значения полоидальной составляющей гало-тока для рассматриваемых случаев срыва плазмы вниз составляют соответственно 501,0 и 552,7 кА, а тороидальной составляющей — 884,6 и 923,9 кА.

Т а б л и ц а 5. Характерные значения параметров при срыве плазмы вниз

Параметр	Разряд	
	омический	с ДНП
Момент образования гало-тока, мс	128,4	148,0
Момент размыкания магнитных поверхностей, мс	132,6	152,7
Максимум тороидального компонента гало-тока, кА	884,6	923,9
Максимум полоидального компонента гало-тока, кА	501,0	552,7
Максимум тока в вакуумной камере, кА	734,5	801,7
Экстремум тока в витках пассивной стабилизации, кА	101,1	113,7
Экстремум тока в обмотке управления плазмой по вертикали, кА	-38,1	32,7
Экстремум тока в левой пластине под дивертором, кА	-152,6	-161,1
Экстремум тока в правой пластине под дивертором, кА	-63,8	-71,6

Для предотвращения срывов плазмы вниз за время порядка альфвеновского было предложено в токамаке Т-15 установить стальные пластины под диверторным устройством (ДУ). Такое решение позволяет снизить вероятность развития срывов вниз за время масштаба альфвеновского, не приводя к потерям полоидального потока на стадии ввода тока плазмы. Однако наличие сплошных стальных пластин требует тщательного учёта механических нагрузок, возникающих на этих пластинах в процессе срыва. Оценки электромагнитных нагрузок от полоидальной составляющей гало-тока выполнены для момента максимального значения гало-тока. В случае срыва из омического сценария максимальный гало-ток, равный 501,0 кА, наблюдается на 131,2 мс, тогда как при срыве в сценарии с ДНП максимальная величина полоидального гало-тока равна 552,7 кА и достигается на 152,7 мс. Максимальное значение гало-тока при срыве вниз почти в 1,5 раза превышает соответствующие данные при срыве вверх. Суммарная нагрузка на ВК и пластины под ДУ составляет ~2,11 МН. Наибольшее усилие отмечается при срыве из сценария с ДНП, приходится на элемент внутреннего обвода ВК, и его величина составляет ~1,7 МН. Нагрузка от гало-тока на правую пластину под ДУ оказывается незначительной. Существенных отличий в усилиях при срыве плазмы вниз из сценариев с омическим нагревом и ДНП не наблюдается.

Полное размыкание магнитных поверхностей наступает на 132,6 мс при омическом нагреве и, соответственно, на 152,7 мс в режиме с ДНП.

На рис. 14 показана динамика I_{VV} в ВК, в пластинах под диверторным устройством I_{div} и в витках пассивной стабилизации I_{ps} . Видно, что при затухании тока в плазме после теплового срыва зна-

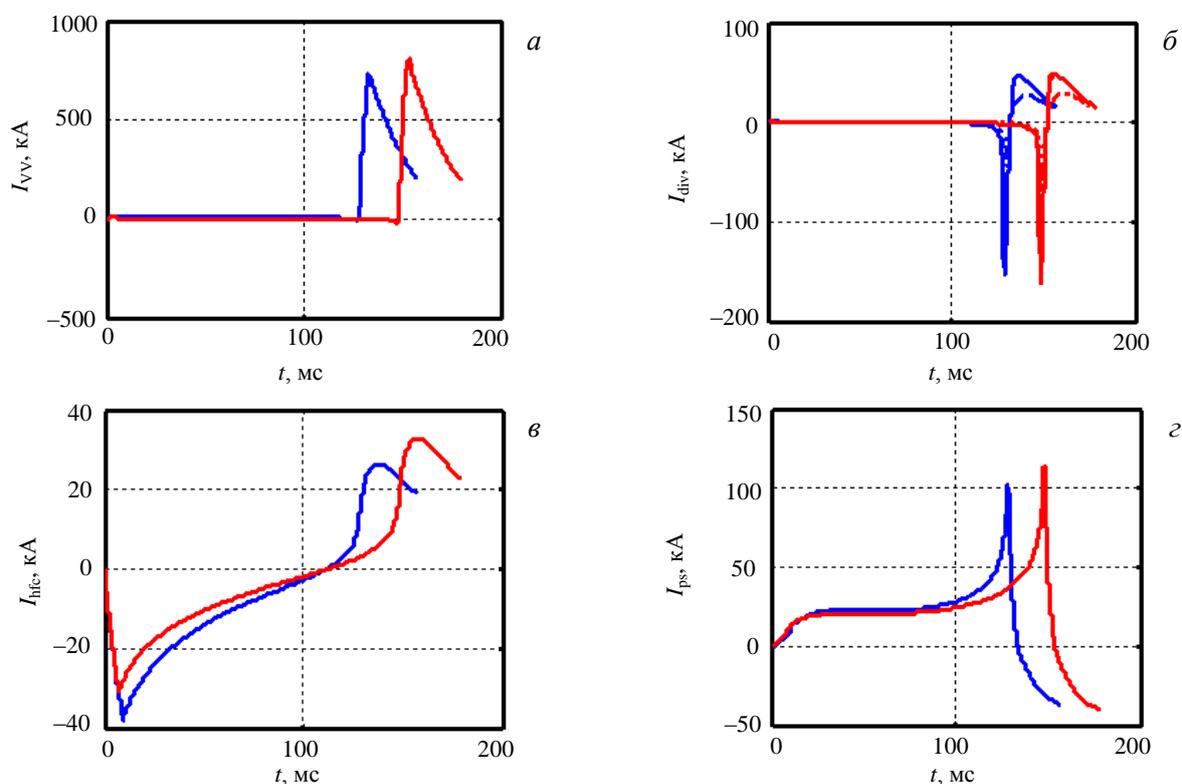


Рис. 14. Динамика токов на вакуумной камере I_{VV} (а) и в пластинах I_{div} (б), расположенных под диверторным устройством, ток через виток в «быстрой» обмотке управления плазмой по вертикали I_{hfc} (в), ток в витках пассивной стабилизации при срыве плазмы вниз I_{ps} (г)

чительная часть его тороидального компонента перебрасывается на проводящие элементы ВК и элементы пассивной стабилизации, расположенные внутри ВК, что увеличивает механическую нагрузку на камеру. Отметим, что ток в пластинах пассивной стабилизации I_{ps} и ток I_{hfc} через витки в «быстрой» обмотке управления плазмы по вертикали начинают расти с момента начала движения плазмы по вертикали. После появления гало-тока наблюдается падение тока в пассивных пластинах и в витках «быстрой» обмотки. На рис. 15 представлен ряд конфигураций плазмы в ключевые моменты развития срыва плазмы вниз из сценария с ДНП. После возникновения гало-тока ширина гало-области начинает расти и достигает максимального размера на момент максимума величины гало-тока. Оценки электромагнитных нагрузок от полоидального компонента гало-тока выполнены при максимальных значениях гало-тока.

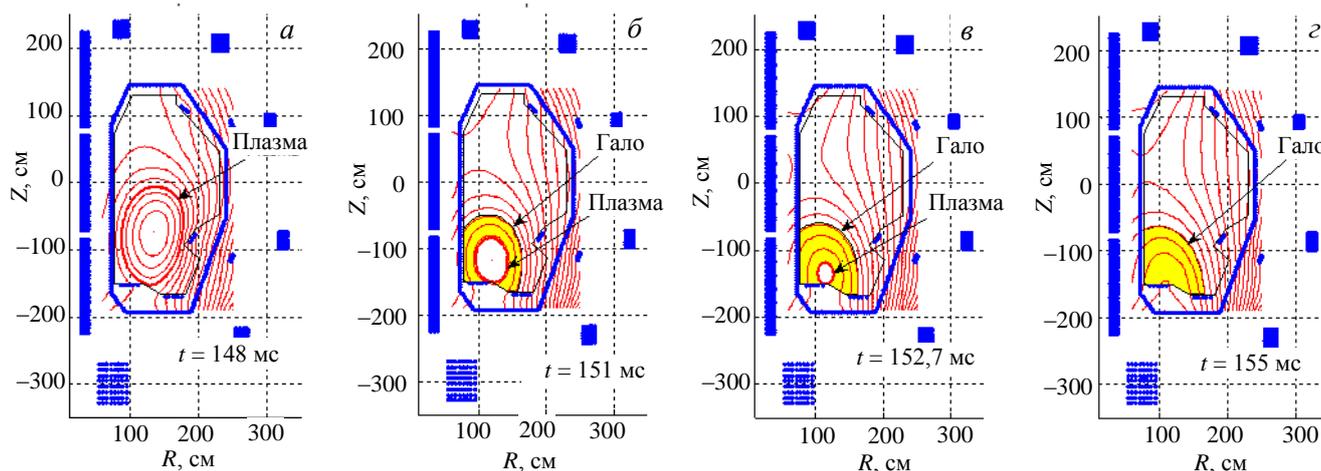


Рис. 15. Эволюция конфигурации в процессе срыва плазмы вниз в режиме с ДНП на моменты: *a* — возникновения гало-тока; *б* — максимума величины гало-тока; *в* — размыкание последней замкнутой магнитной поверхности; *г* — гало-область с полностью разомкнутыми магнитными поверхностями

При дальнейшем развитии срыва наблюдается достаточно быстрое сокращение области плазмы, тогда как площадь сечения гало-области меняется незначительно. В момент, когда тороидальный ток начинает переноситься соответствующим компонентом гало-тока, наблюдается размыкание последней замкнутой магнитной поверхности. Далее ток уже продолжает течь в гало-области при конфигурации с полностью разомкнутыми магнитными поверхностями.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ НАГРУЗКИ НА ВНУТРИКАМЕРНЫЕ ПРОВОДЯЩИЕ СТРУКТУРЫ ПРИ СРЫВЕ ВНИЗ

Потеря устойчивости плазмы в процессе разряда имеет ряд негативных последствий, связанных с развитием механических нагрузок в элементах конструкции токамака в процессе срывов. На рис. 16 показана динамика механических нагрузок на верхний (*a*) и нижний (*б*) витки пассивной стабилизации при срыве вниз: омический сценарий — синие линии; с ДНП — красные; сплошные — F_r ; штрихпунктирные — F_z

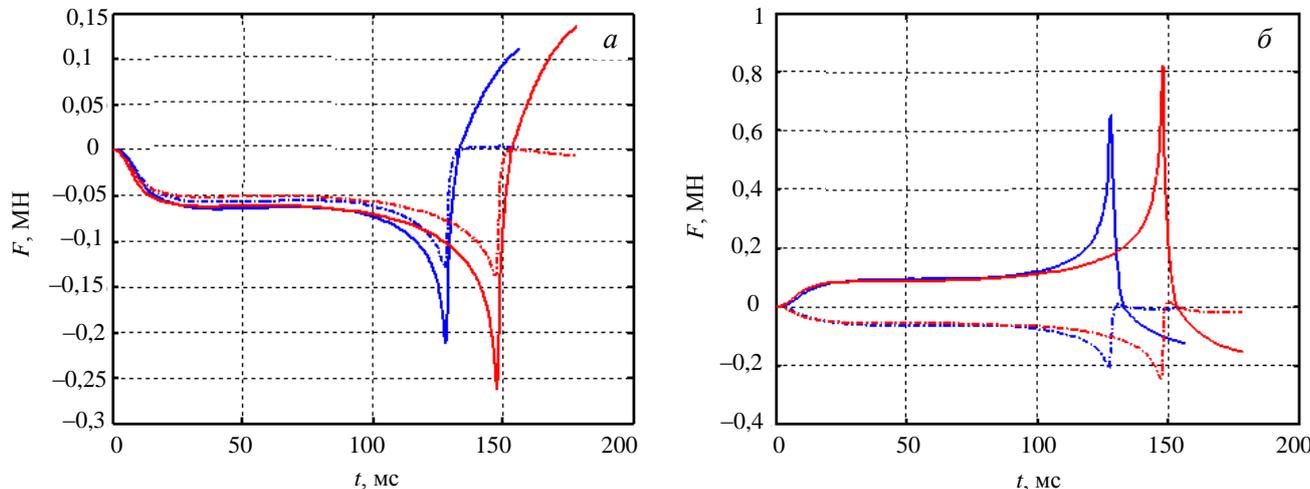


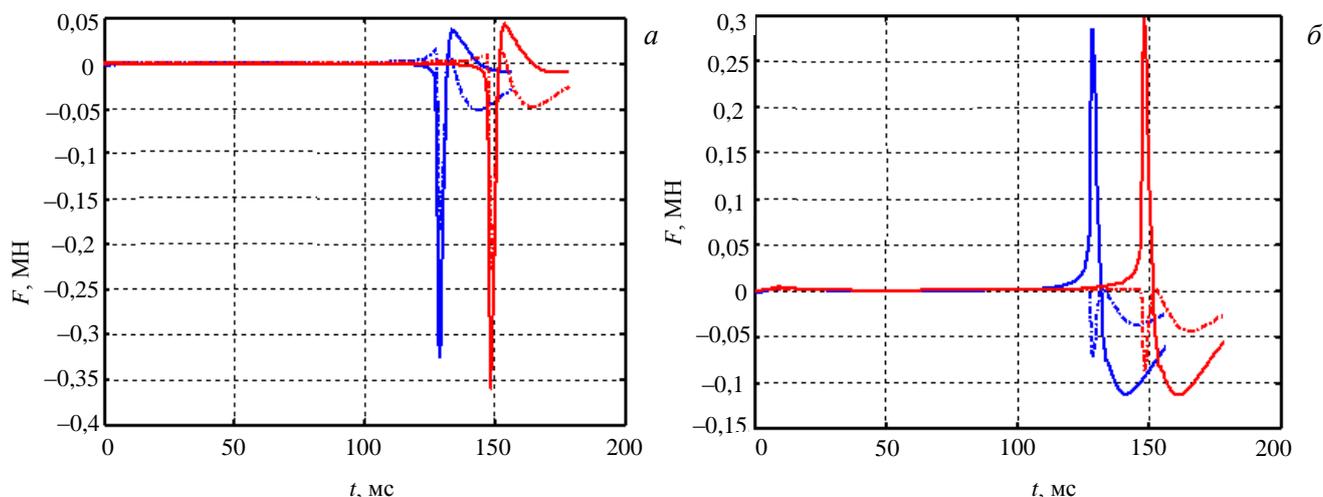
Рис. 16. Динамика нагрузок на верхний (*a*) и нижний (*б*) витки пассивной стабилизации при срыве вниз: омический сценарий — синие линии; с ДНП — красные; сплошные — F_r ; штрихпунктирные — F_z

ции. Соответствующие данные для омического сценария обозначены синим цветом, с ДНП — красным. Максимальные и минимальные значения горизонтального и вертикального компонентов сил, приложенных к верхней и нижней пластинам пассивной стабилизации, представлены в табл. 6. Как и при VDE вверх, в случае с ДНП наблюдаются несколько большие нагрузки радиальной составляющей на пластины пассивной стабилизации из-за большей величины начального равновесного вертикального поля B_z .

Т а б л и ц а 6. Нагрузки на витки пассивной стабилизации при срыве плазмы вниз

Параметр	Разряд	
	омический	с ДНП
Верхний виток пассивной стабилизации		
Максимум горизонтального компонента силы F_r, max , МН	0,11	0,14
Минимум горизонтального компонента силы F_r, min , МН	-0,21	-0,26
Максимум вертикального компонента силы F_z, max , МН	0	0
Минимум вертикального компонента силы F_z, min , МН	-0,13	-0,14
Нижний виток пассивной стабилизации		
Максимум горизонтального компонента силы F_r, max , МН	0,65	0,82
Минимум горизонтального компонента силы F_r, min , МН	-0,12	-0,15
Максимум вертикального компонента силы F_z, max , МН	0,01	0,02
Минимум вертикального компонента силы F_z, min , МН	-0,21	-0,25

На рис. 17 показана динамика электромагнитных нагрузок на левую (а) и правую (б) пластины, расположенные под диверторным устройством. Максимальные и минимальные значения для компонентов сил, приложенных к левой и правой пластинам, даны в табл. 7. Картина развития усилий на пластины, а вместе с ней и диапазон изменения нагрузок оказываются достаточно близкими как для омического случая, так и для режима с ДНП.

Рис. 17. Динамика нагрузок на левую (а) и правую (б) пластины, расположенные под диверторным устройством при срыве плазмы вниз: омический сценарий — синие линии; с ДНП — красные; сплошные — F_r ; штрихпунктирные — F_z

Т а б л и ц а 7. Нагрузки на пластины под диверторным устройством при срыве вниз

Параметр	Разряд	
	омический	с ДНП
Левая пластина		
Максимум горизонтального компонента силы F_r, max , МН	0,04	0,04
Минимум горизонтального компонента силы F_r, min , МН	-0,33	-0,36
Максимум вертикального компонента силы F_z, max , МН	0,02	0,02
Минимум вертикального компонента силы F_z, min , МН	-0,18	-0,23
Правая пластина		
Максимум горизонтального компонента силы F_r, max , МН	0,28	0,30
Минимум горизонтального компонента силы F_r, min , МН	-0,11	-0,11
Максимум вертикального компонента силы F_z, max , МН	0	0
Минимум вертикального компонента силы F_z, min , МН	-0,07	-0,09

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ НАГРУЗКИ НА ВАКУУМНУЮ КАМЕРУ ПРИ VDE ВНИЗ

На рис. 18 представлена динамика суммарных усилий на ВК в процессе срыва плазмы вверх для омического режима и при ДНП. Максимальный ток на ВК для омического случая составляет 734,5 кА и достигается в момент времени 133,6 мс, тогда как максимум суммарных усилий на вакуумной камере имеет место на 129,4 мс и составляет ~2,7 МН. Для режима с ДНП величина максимального тока составляет 801,7 кА в момент времени 153,7 мс. Усилие на ВК максимально в момент времени 148,7 мс и равняется 3,19 МН. Таким образом, максимальное усилие наступает примерно на 4—5 мс раньше момента достижения максимальной величины суммарного тока в вакуумной камере. Отметим, что нагрузка в случае с ДНП примерно на 15% выше, чем в случае срыва из омического разряда.

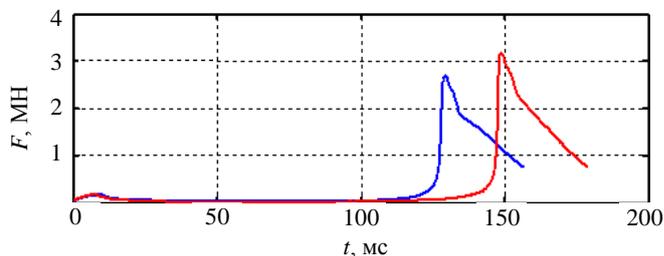


Рис. 18. Динамика суммарных усилий на ВК в процессе срыва плазмы вниз: омический сценарий — синяя линия; с ДНП — красная

На рис. 19 показано распределение усилий на ВК в момент максимальной величины суммарных нагрузок на ВК для омического сценария (а) и при ДНП (б). Максимальные усилия наблюдаются в нижней трети внутреннего обвода ВК. На рис. 20 показано мгновенное распределение тока и нагрузок в элементах ВК в момент, когда достигаются максимальные усилия на вакуумную камеру для анализируемых

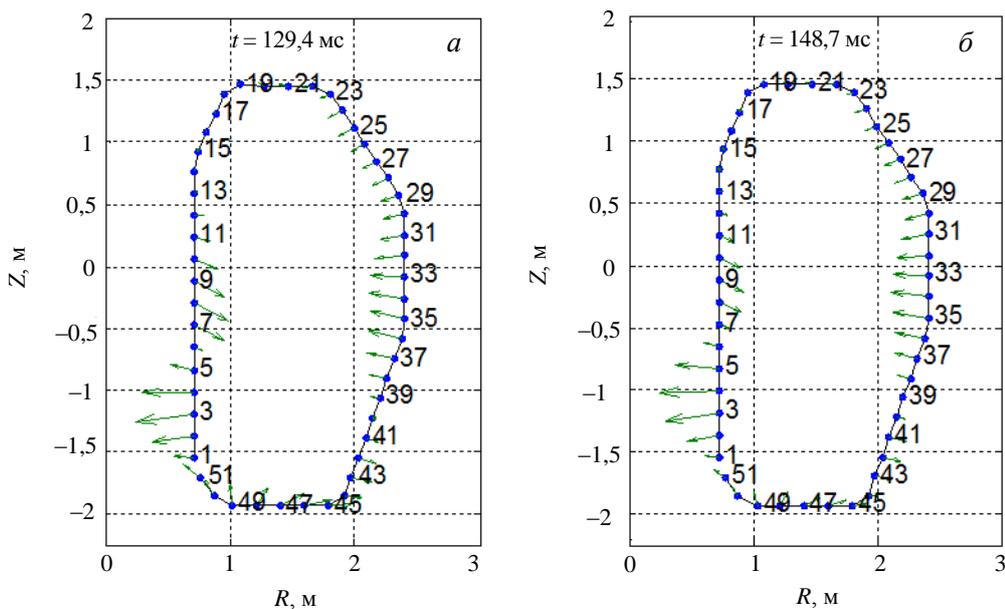


Рис. 19. Распределение усилий на ВК в момент максимума суммарных сил на элементы ВК для омического сценария (а) и при ДНП (б)

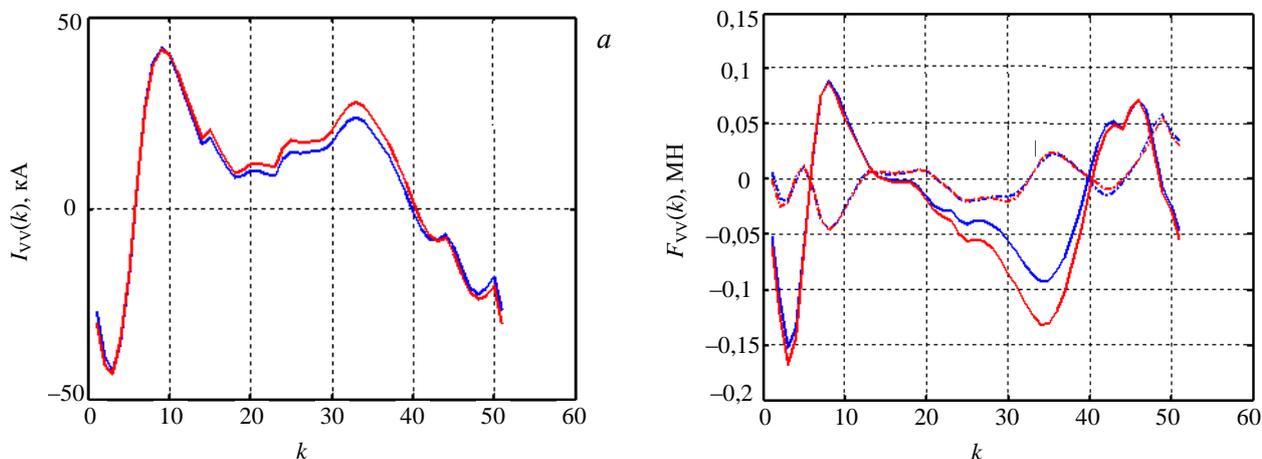


Рис. 20. Распределение тока и силовых нагрузок в элементах вакуумной камеры на момент, когда достигается максимум суммарной нагрузки на ВК: для омического разряда — 129,4 мс; ДНП — 148,7 мс

срывов. Распределение усилий относится к моменту максимальной величины суммарной нагрузки на элементы ВК: на 129,4 мс для омического разряда и на 148,7 мс для срыва из режима с ДНП. Нумерация элементов ВК по горизонтальной оси выполнена в соответствии с рис. 19. Интересно отметить, что минимальные усилия наблюдаются вблизи верхней части ВК и примыкающего к ней внутреннего обвода ВК, что является следствием минимальных значений локальных величин тока. Максимальные усилия локализованы в нижней трети внутреннего обвода ВК и превышают 0,15 МН на элемент ВК.

ВЫВОДЫ

В работе представлены результаты моделирования «горячих» VDE в плазме токамака Т-15 вверх и вниз. Случай самопроизвольного VDE при выключенной системе управления плазмой приводит к срыву плазмы вверх. Возникновение VDE вниз может происходить из-за сбоя системы магнитного управления и возникновения горизонтального магнитного поля, ведущего к «затравочному» смещению плазмы вниз. Рассмотрены срывы плазмы вверх и вниз в сценариях как с омическим нагревом, так и с дополнительным нагревом плазмы.

При срыве вверх максимальные значения полоидального и тороидального компонентов гало-тока составляли ~290 и ~680 кА соответственно и примерно на 10% отличаются в случае омического нагрева и режима с ДНП. Максимальные горизонтальная и вертикальная нагрузки на верхнюю пластину пассивной стабилизации на превышают соответственно ~0,45 и ~0,30 МН, тогда как аналогичные данные для нижней пластины составляют ~0,30 и ~0,12 МН. Горизонтальные усилия на левой пластине под диверторным устройством не превышают 0,007 МН, вертикальные усилия 0,021 МН. Для правой пластины соответствующие нагрузки составляют 0,050 и 0,024 МН. Максимальная величина тока на ВК при срыве вверх для режима с ДНП примерно 800 кА и суммарная нагрузка на ВК ~2,4 МН, что примерно на 15% выше, чем при срыве из сценария омического разряда. Согласно оценке электромагнитных нагрузок от полоидального компонента гало-тока наибольшее усилие приходится на верхнюю четверть внутреннего обвода ВК и составляет ~0,6 МН.

При срыве плазмы вниз из сценария с ДНП максимальные значения полоидального и тороидального компонентов гало-тока составляют соответственно ~552,7 и ~923,9 кА и не более чем на 10% превышают соответствующие значения для случая сценария омического нагрева. Максимальные значения горизонтальной и вертикальной нагрузок на верхнюю пластину пассивной стабилизации на превышают соответственно ~0,26 и ~0,14 МН, тогда как аналогичные данные для нижней пластины составляют ~0,82 и ~0,25 МН. Горизонтальные усилия на левой пластине под ДУ не превышают ~0,36 МН, вертикальной нагрузки ~0,23 МН. Для правой пластины соответствующие нагрузки составляют ~0,30 и ~0,09 МН. При срыве вверх для режима с ДНП максимальная величина тока на ВК достигает ~800 кА, суммарная нагрузка на ВК ~3,19 МН, что на ~20% выше, чем при срыве в сценарии омического разряда. Согласно оценке электромагнитных нагрузок от полоидального компонента гало-тока наибольшее усилие приходится на нижнюю треть внутреннего обвода ВК и составляет ~1,7 МН.

Наиболее опасные нагрузки на верхней пластине пассивной стабилизации при срыве вверх (~0,45 МН, $F_z \sim 0,30$ МН) и на нижней пластине при срыве плазмы вниз (~0,82 и ~0,25 МН). Максимальные нагрузки на пластины под ДУ наблюдаются при срыве плазмы вниз.

Наиболее опасными нагрузками от полоидального компонента гало-тока являются срывы вниз, их величина более чем в 2 раза превышает усилия, возникающие при срыве вверх.

Работа поддержана грантом РФФИ № 11-07-00567-а.

REFERENCES

1. **Azizov E.A. et al.** Status of project of engineering-physical tokamak. — In: 23rd IAEA Fusion Energy Conf. Daejeon, Republic of Korea, 11—16 October 2010, FTP/P6-01.
2. **Gruber O., Lackner K. et al.** Vertical displacement events and halo currents. — Plasma Phys. Control. Fusion, 1993, vol. 35, p. B191.

3. **Sugihara M., Lukash V.E., Khayrutdinov R.R., Neyatani Y.** Edge safety factor at the onset of plasma disruption during VDEs in JT-60U. — *Plasma Phys. Contr. Fusion*, 2004, vol. 46, pp. 1581—1589.
4. **Khayrutdinov R.R., Lukash V.E.** — *J. Comput. Phys.*, 1993, vol. 109, p. 193.
5. **Lukash V.E., Khayrutdinov R.R.** Numerical simulation of halo-currents in tokamak. — *Fizika plazmy (Plasma Physics)*, 1996, vol. 22, № 2, pp. 99—104 (in Russian).
6. **Strait E.J. et al.** — *Nuclear Fusion*, 1991, vol. 31, p. 527.
7. **Sayer R.O., Peng Y.-K.M., Jardin S.C. et al.** TSC plasma halo simulation of a DIII-D vertical displacement episode. — *Nucl. Fusion*, 1993, vol. 33, p. 969.
8. **Lukash V.E.** Evolution analysis of halo area width during plasma current disruption in tokamak. — *VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion)*, 2007, issue 2, pp. 41—48 (in Russian).
9. **Sugihara M. et al.** Disruption scenarios, their mitigation and operation window in ITER. — *Nucl. Fusion*, 2007, vol. 47, pp. 337—352.

AUTHORS

Dokuka V.N. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; v.dokuka@mail.ru

Lukash V.E. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; Lukash_VE@nrcki.ru

Khayrutdinov R.R. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; khayrutd@mail.ru

Received 3 September 2012
Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Thermonuclear Fusion, 2012, issue 4, pp. 43—57.