

УДК 533.9: 519.688

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ПЛАЗМЫ В ТОКАМАКЕ КТМ

*Д.Ю. Сычугов (МГУ им. М.В. Ломоносова, факультет ВМиК, Москва, Россия),  
Г.В. Шаповалов, А.Д. Садыков, Б.Ж. Чектыбаев, О.Н. Шумайлова (Институт атомной энергии  
НЯЦ РК, г. Курчатов, Казахстан)*

Обсуждаются расчёты развития вертикальной неустойчивости в токамаке КТМ, выполненные по кодам PET и TOKSTAB, получено хорошее соответствие результатов вычислений. С помощью кода TOKSTAB изучается влияние элементов конструкции токамака на пассивную стабилизацию вертикальной неустойчивости плазменного шнура.

**Ключевые слова:** Проект токамака КТМ, вертикальная неустойчивость плазмы, пассивная стабилизация, библиотека программ «Виртуальный токамак»

THE NUMERICAL SIMULATION OF VERTICAL INSTABILITY OF PLASMA IN TOKAMAK KTM. D.Yu. SYCHUGOV, G.V. SHAPOVALOV, A.D. SADYKOV, B.Zh. CHEKTYBAEV, O.N. SHUMAILOVA. The results of calculations of the vertical instability of plasma in KTM using two different numerical codes PET and TOKSTAB are discussed. Good agreement of results is found. Also the influence of the structural elements of tokamak KTM on passive vertical instability of plasma was analyzed.

**Key words:** The project of Tokamak KTM, the vertical instability of plasma, passive stabilization, the library of standard codes The Virtual tokamak.

### ВВЕДЕНИЕ

Токамак КТМ строится в Республике Казахстан в рамках национального проекта по развитию технологий управляемого термоядерного синтеза. Его характеристики приведены в работах [1], фотографию уже смонтированной установки можно найти в [2]. Установка спроектирована в ФГУП НИИЭФА им. Д.В. Ефремова, её основные узлы изготовлены там же. Первый плазменный разряд на КТМ был получен 5 сентября 2010 г. [3], в настоящее время на КТМ осуществляется подготовка к запуску в омическом штатном режиме. В комплекс подготовительных работ входит также и более детальная проработка сценария разряда.

Общеизвестно, что надёжность моделирования повышается при подключении разных кодов. В нашей предыдущей работе [2] было проведено сравнение расчётов равновесия, выполненных по кодам DINA [4] и TOKAMEQ [5—7]. Помимо сравнения, исследовалось влияние элементов конструкции и токов в полоидальных катушках на характеристики плазменного шнура. Оказалось, что расчёты, проведённые по двум кодам, хорошо согласуются, что говорит о достаточной надёжности моделирования.

В настоящей работе проведено сопоставление результатов расчётов развития вертикальной неустойчивости в токамаке КТМ, проведённых по кодам PET [8, 9] и TOKSTAB [10], а также изучено влияние элементов конструкции токамака на подавление вертикальной неустойчивости плазмы. Оказалось, что расчёты, проведённые по двум кодам, также хорошо согласуются и величины инкрементов неустойчивости не превышают предельных значений, что позволяет включить активные обратные связи (АОС). Помимо сравнения, проводились расчёты, позволяющие оценить вклад отдельных элементов конструкции токамака в подавление вертикальной неустойчивости плазмы.

### РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТОВ

**Краткое описание кодов PET и TOKSTAB.** Код PET [8, 9] разработан в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН и достаточно хорошо известен, подробности можно найти по адресу [http://www.keldysh.ru/Eng/ipme\\_frame.htm](http://www.keldysh.ru/Eng/ipme_frame.htm). Код TOKSTAB [10] — стандартный код для расчёта вертикальной неустойчивости плазмы в токамаке, применявшийся, например, в [10—12]. С помощью ранних версий кодов TOKAMEQ и TOKSTAB впервые было произведено сравнение результатов математиче-

ского моделирования и реального эксперимента на установке токамак и получено их хорошее соответствие [13]. Данные коды являются модулями библиотеки «Виртуальный токамак» [14—15] и открыты для пользователей библиотеки.

**Сравнение результатов вычислений по кодам PET и TOKSTAB.** Для проведения анализа были взяты несколько временных точек из базового омического сценария разряда [1]. При помощи кода TOKAMEQ воспроизводилось МГД-равновесие, которое далее анализировалось с помощью кода TOKSTAB. При вычислениях по коду TOKSTAB учитывались геометрические и физические параметры плазменного шнура, а также геометрия самой установки.

В качестве базовых были взяты операционные точки, соответствующие 195 и 315 мс сценария разряда. Момент времени 195 мс соответствует образованию диверторной конфигурации, 315 мс — фазе вывода тока плазмы на плато. При вычислениях по коду TOKAMEQ была достигнута достаточная степень сходимости геометрических и физических параметров плазменного шнура, полученных при расчётах по двум кодам.

Следующим шагом стало определение инкремента неустойчивости (обратного инкремента неустойчивости  $\tau$ ) полученной плазменной конфигурации с помощью кода TOKSTAB. При этом в качестве пассивных стабилизирующих элементов рассматривались витки пассивной стабилизации (ВПС), вакуумная камера (ВК), элементы конструкции, в частности, дивертор. Их размеры, расположение, форма и материал, из которого они изготавливались, соответствовали техническому проекту [1]. Взаимное расположение данных элементов и сечения плазменного шнура показаны на рис. 1, а, 2, а.

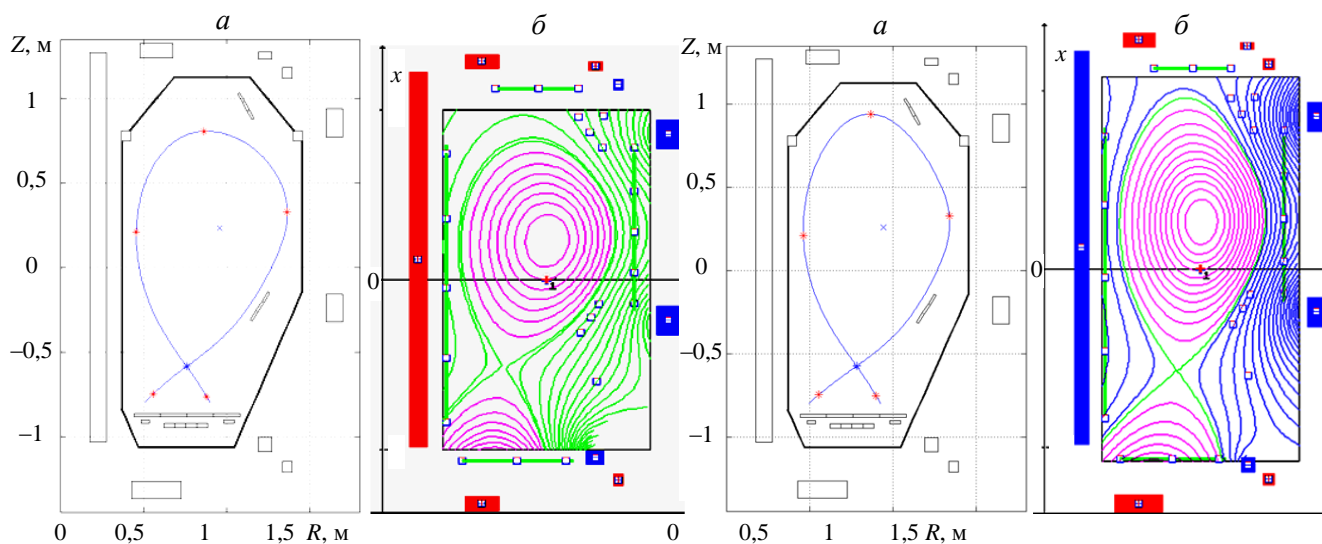


Рис. 1. Конфигурация плазменного шнура в момент времени 195 мс, рассчитанная соответственно по кодам PET (а) и TOKAMEQ (б)

Рис. 2. Конфигурация плазменного шнура в момент времени 315 мс, рассчитанная соответственно по кодам PET (а) и TOKAMEQ (б)

В табл. 1, 2 приведены результаты вычислений конфигурации плазмы в соответствующих временных точках. Здесь приняты следующие обозначения:  $R_0$ ,  $Z_0$  — координаты магнитной оси;  $R_{\min}$ ,  $R_{\max}$ ,  $Z_{\min}$ ,  $Z_{\max}$  — значения координат четырёх крайних точек плазменного шнура;  $I_{pl}$  — ток в плазме на данный момент сценария разряда;  $\beta_p$ ,  $l_i$  — соответственно значения полоидального бета и внутренней индуктивности плазменного шнура;  $\tau$  — характерное время развития вертикальной неустойчивости (обратный инкремент).

Т а б л и ц а 1. Параметры расчётов по кодам PET и TOKSTAB,  $t = 195$  мс

Код	$R_0$ , м	$Z_0$ , м	$R_{\min}$ , м	$R_{\max}$ , м	$Z_{\min}$ , м	$Z_{\max}$ , м	$I_{pl}$ , МА	$\beta_p$	$l_i$	$\tau$ , мс
PET	0,965	0,23	0,46	1,36	-0,58	0,8	0,45	0,17	0,98	287
TOKSTAB	0,955	0,23	0,455	1,35	-0,52	0,81	0,45	0,17	0,995	295

Т а б л и ц а 2. Параметры расчётов по двум кодам PET и TOKSTAB,  $t = 315$  мс

Код	$R_0$ , м	$Z_0$ , м	$R_{\min}$ , м	$R_{\max}$ , м	$Z_{\min}$ , м	$Z_{\max}$ , м	$I_{pl}$ , МА	$\beta_p$	$l_i$	$\tau$ , мс
PET	0,94	0,27	0,46	1,35	-0,57	0,94	0,75	0,15	1	74
TOKSTAB	0,95	0,265	0,46	1,34	-0,56	0,95	0,75	0,15	1	72

Оказалось, что результаты вычислений по кодам PET и TOKSTAB хорошо согласуются. Для моментов времени 195 и 315 мс найденные обратные инкременты неустойчивости по двум кодам совпадают в пределах 3%.

**Влияние элементов конструкции на устойчивость плазменного шнура.** Для изучения влияния различных элементов конструкции установки КТМ на устойчивость плазмы нами были проведены несколько серий вычислений.

Для проведения расчётов использовалась плазменная конфигурация, соответствующая 315-й мс сценария разряда, так как плазма в этот момент времени имеет наибольшее значение инкремента неустойчивости и поэтому является наиболее интересной для изучения.

В токамаке КТМ конструкция диверторного стола (сечение которого показано на рис. 1, а) допускает его смещение по вертикали, поэтому представляется интересным исследовать влияние положения дивертора на время развития неустойчивости. В расчётах были фиксированы размеры прямоугольного сечения диверторного стола по  $r$  и  $z$ , и обозначенные соответственно как  $L$  и  $D$ , а также положение его  $r$ -координаты центра  $R_0$ . Были рассмотрены варианты со смещением  $z$ -координаты центра сечения диверторного стола  $Z_0$ , а также рассмотрен вариант отсутствия дивертора в токамаке. Полученные результаты сведены в табл. 3. Следует отметить, что рассматривались только варианты со смещением диверторного стола вверх, так как в базовом варианте он находится в крайнем нижнем положении.

Т а б л и ц а 3. Влияние дивертора на инкремент неустойчивости

Вариант	$R_0$ , м	$Z_0$ , м	$L$ , м	$D$ , м	$\tau$ , мс
Базовый	0,765	-0,936	0,29	0,026	72,36
Смещение вверх на 2 см*	0,765	-0,916	0,29	0,026	72,37
Смещение вверх на 10 см	0,765	-0,836	0,29	0,026	72,95
При отсутствии дивертора	—	—	—	—	71,48

\* Является предельным верхним положением.

Из приведённых данных табл. 3 видно, что диверторный стол практически не влияет на устойчивость.

Следующая серия вычислений была проведена с целью изучения влияния на устойчивость плазмы элементов конструкций крепления установки (размеров фланцев, имеющих прямоугольное сечение), а также влияния толщины стенки вакуумной камеры. Отметим, что в отличие от положения дивертора данные величины изменены быть не могут и расчёты представляют чисто методический интерес. Результаты вычислений приведены в табл. 4 и 5.

Т а б л и ц а 4. Влияние фланцев на устойчивость плазменного шнура

Вариант	$R_0$ , м	$Z_0$ , м	$L$ , м	$D$ , м	$\tau$ , мс
Базовый	1,429	0,779	0,058	0,053	72,36
Увеличение размеров фланцев на 1 см	1,429	0,779	0,068	0,063	72,844
Уменьшение размеров фланцев на 1 см	1,429	0,779	0,048	0,043	71,745
При отсутствии фланцев	—	—	—	—	70,1

Т а б л и ц а 5. Влияние параметров стенок ВК на устойчивость плазменного шнура

Базовый вариант	Увеличение толщины стенок ВК на 0,1 см	Уменьшение толщины стенок ВК на 0,1 см
$\tau = 72,36$ мс	$\tau = 72,844$ мс	$\tau = 71,745$ мс

Из приведённых таблиц видно, что конструкции креплений и толщина стенок вакуумной камеры оказывают некоторое влияние на устойчивость шнура, в частности, увеличение геометрических размеров фланцев, а также увеличение толщины стенок вакуумной камеры незначительно увеличивают время развития неустойчивости.

Важным элементом конструкции установки КТМ являются витки пассивной стабилизации. С целью изучения их влияния на устойчивость плазмы был проведён ряд вычислений. Были рассмотрены следующие варианты: вакуумная камера без витков пассивной стабилизации, только витки пассивной стабилизации без ВК. Исследовалось также влияние смещения витков пассивной стабилизации. Результаты сведены в табл. 6 и 7. При исследовании влияния смещения витков пассивной стабилизации основным

критерием, влияющим на выбор значения смещения, явилась точность их установки, которая не может быть хуже 1 см. Рассматривались предельные случаи одновременного смещения витков.

Т а б л и ц а 6. Влияние витков пассивной стабилизации (ВПС) на устойчивость плазменного шнура

Базовый вариант	Вакуумная камера без ВПС	Только ВПС без вакуумной камеры
$\tau = 72,36$ мс	$\tau = 1,3$ мс	$\tau = 66,2$ мс

Т а б л и ц а 7. Влияние смещения витков пассивной стабилизации на устойчивость плазменного шнура

Смещение верхних и нижних ВПС по оси $z$ навстречу на 1 см	Смещение верхних и нижних ВПС по оси $z$ в противоположные стороны на 1 см	При удалении верхнего ВПС	При удалении нижнего ВПС
$\tau = 77,28$ мс	$\tau = 67,6$ мс	$\tau = 15,76$ мс	$\tau = 3,93$ мс

Полученные результаты говорят об определяющем влиянии наличия витков пассивной стабилизации внутри вакуумной камеры на устойчивость плазменного шнура. Из табл. 6 видно, что в случае их отсутствия время развития неустойчивости уменьшается в 57 раз, что приводит к быстрому (1,3 мс) уходу плазменного шнура на стенку, при котором не успеет включиться активная обратная связь. Расчёт подавления неустойчивости плазмы одной лишь системой ВПС, без вакуумной камеры, показывает, что происходит уменьшение обратного инкремента неустойчивости примерно на 10%. Это говорит о небольшом, но положительном влиянии вакуумной камеры на устойчивость плазменного шнура. Из табл. 7 видно, что смещение по вертикали ВПС навстречу на 1 см приводит к увеличению обратного инкремента неустойчивости, а в противоположные стороны также на 1 см приводит к его уменьшению примерно на 10%, что говорит о сильном влиянии положения ВПС на величину обратного инкремента. Также видно, что удаление одного из ВПС приводит к существенному уменьшению обратного инкремента неустойчивости, что недопустимо для токамака КТМ.

## ВЫВОДЫ

Проведённые сравнения по двум кодам показали достаточную надёжность проработки базового омического сценария разряда.

Во всех рассмотренных точках сценария разряда время развития неустойчивости достаточно большое для отработки и подавления неустойчивости активными обратными связями.

Анализ влияния элементов конструкции показал, что витки пассивной стабилизации играют главную роль в подавлении вертикальной неустойчивости плазмы в токамаке КТМ. Также было определено, что влияние диверторного стола и других элементов конструкции вакуумной камеры на устойчивость плазменного шнура незначительно.

Работа поддержана грантом РФФИ № 11-07-00567-а и договором между МГУ им. М.В. Ломоносова и Институтом атомной энергии НЯЦ РК.

## REFERENCES

1. **Azizov E.A., Dokuka V.N., Khayrutdinov R.R., Mineev A.B.** Developing and analysis of programmed scenario operation in plasmas of Kasakhstan Tokamak for material testing (KTM). — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2009, issue 4, pp. 37—53 (in Russian).
2. **Sychugov D.Yu., Shapovalov G.V., Volynkina Yu.V., Sadykov A.D., Chektybaev B.Zh., Shipilov D.V., Shumaylova O.N.** The numerical simulation of the omhic discharge scenario in Tokamak. — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2010, issue 1, pp. 38—45 (in Russian).
3. **Chronicle.** — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2010, issue 3, p. 75 (in Russian).
4. **Khayrutdinov R.R., Lukash V.E.** Studies of Plasma Equilibrium and transport in a tokamak fusion device with the Inverse-variable technique. — J. Comput. Physics, 1993, vol. 109, pp. 193—201.
5. **Voznesensky V.A., Gasilov N.A., Dnestrovsky Yu.N., Kuznetsov A.B., Sychugov D.Yu., Tsaun S.V.** TOKAMEQ — code for the calculation of the plasma balance in tokamak. — M.: RRC «Kurchatov institute», 2001 (in Russian).

6. **Sychugov D.Yu.** The code TOKAMEQ for simulation MHD-equilibrium (Module of program library «Virtual Tokamak») — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2008, issue 4, pp. 85—89 (in Russian).
7. **Sychugov D.Yu.** A new version of the TOKAMEQ code for simulation MHD equilibrium configurations with any profile of current density and expanded divertor (Module of program library «Virtual Tokamak») — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2009, issue 3, pp. 60—62 (in Russian).
8. **Galkin S.A., Ivanov A.A., Medvedev S.Yu., Poshekhonov Yu.Yu.** Comparison of tokamak axisymmetric mode growth rates from linear MHD and equilibrium evolution approaches. — Nuclear Fusion, 1997, vol. 37, № 10, p. 1455.
9. **Ivanov A.A., Galkin S.A., Drozdov V.V., Medvedev S.Yu., Poshekhonov Yu.Yu.** Numerical simulation of free boundary tokamak plasma equilibrium evolution with flux conservation and self-consistent plasma surface current. — In: 40th APS DPP Meeting. New Orleans, USA, November 16—20, 1998. — Bull. Am. Phys. Soc., 1998, vol. 43, p. 1749.
10. **Sychugov D.Yu., Amelin V.V., Gasilov N.A.** The code TOKSTAB (Module of program library Virtual Tokamak). — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2010, issue 3, pp. 46—49 (in Russian).
11. **Bondarchuk E.N., Dnestrovskii Yu.N., Leonov V.M., Maksimova I.I., Sychugov D.Yu., Tsaun S.V., Voznesesky V.A.** Vertical MHD stability of the T15-M tokamak plasma. — Plasma Devices and Operations, 2003, vol. 11, № 4, pp. 219—227.
12. **Kakurin A.M., Leonov V.M., Notkin G.E., Khvostenko P.P., Tsaun S.V., Bondarchuk E.N., Vasiliev V.I., Mineev A.B., Maximova I.I., Amelin V.V., Gasilov N.A., Sychugov D.Yu.** Main discharge scenarios for Tokamak T-15M. — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2005, issue 4, p. 53 (in Russian).
13. **Gerasimov S.N., Popov A.M., Sychugov D.Yu.** Comparison of mathematical modeling of equilibrium and MHD plasma stability with the experiment on the installation T-12. — Fizika plazmy (Plasma Physics), 1983, vol. 9, № 4, pp. 688—696 (in Russian).
14. **Zaytsev F.S.** Conception of program library «Virtual Tokamak». <http://leader.ic.msu.ru/~fusion/VT/VT.pdf> (in Russian).
15. **Sychugov D.Yu., Shishkin A.G., Zaytsev F.S., Lukash V.E., Semenov I.B., Khayrutdinov R.R., Zotov I.V., Nefedov V.V.** Program library «Virtual Tokamak». — In book: XI International seminar «Supercomputing and mathematical modeling». Sarov, 5—9 Oct. 2009, pp. 101—102 (in Russian).

#### AUTHORS

**Sychugov D.Yu.** M.V. Lomonosov Moscow State University, Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, Leninskie gory 1-52, 119991 Moscow, Russia; [sychugov@cs.msu.ru](mailto:sychugov@cs.msu.ru).

**Shapovalov G.V.** Institute of Atomic Energy NNC RK, Krasnoarmeyskaya ul.10, 071100 Kurchatov, Kazakhstan; [Shapovalov@nnc.kz](mailto:Shapovalov@nnc.kz).

**Sadykov A.D.** Institute of Atomic Energy NNC RK, Krasnoarmeyskaya ul.10, 071100 Kurchatov, Kazakhstan; [Sadykov\\_A@nnc.kz](mailto:Sadykov_A@nnc.kz).

**Chektybaev B.Zh.** Institute of Atomic Energy NNC RK, Krasnoarmeyskaya ul.10, 071100 Kurchatov, Kazakhstan; [Chektybaev@nnc.kz](mailto:Chektybaev@nnc.kz).

**Shumailova O.N.** Institute of Atomic Energy NNC RK, Krasnoarmeyskaya ul.10, 071100 Kurchatov, Kazakhstan; [Shumailova@nnc.kz](mailto:Shumailova@nnc.kz).

Received 16 June 2011

Problems of Atomic Science and Technology  
Ser. Thermonuclear Fusion, 2011, issue 3, pp. 88—92