

УДК 533.9

КАНОНИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ПРОФИЛИ ДАВЛЕНИЯ ПЛАЗМЫ В ТОКАМАКЕ

© 2023 г. А. Н. Чудновский*

НИИ “Курчатовский институт”, Москва, Россия

*e-mail: Chudnovskiy_AN@nrcki.ru

Поступила в редакцию 20.12.2022 г.

После доработки 24.04.2023 г.

Принята к публикации 28.04.2023 г.

Утверждение о том, что так называемый канонический профиль давления плазмы хорошо согласуется с экспериментальными данными, служит побудительной основой для построения аналитической модели самоорганизации плазмы в токамаке. Выполнено сравнение профилей нормированного электронного давления плазмы, полученных из международной базы экспериментальных данных, собранной с различных токамаков, с каноническими профилями двух видов. Сравнение показывает заметное отличие экспериментальных профилей давления от этих канонических профилей.

Ключевые слова: плазма, канонический профиль давления, токамак

DOI: 10.31857/S0367292122601576, EDN: VXFNNP

ВВЕДЕНИЕ

Понятие канонических профилей параметров плазмы в токамаке связано со сходством друг с другом нормированных профилей параметров плазмы, полученных в разных условиях эксперимента. В качестве параметров могут выступать температура, плотность тока или давление плазмы. Понятие канонических профилей имеет продолжительную историю. Обычно ее начало связывают с работой Б. Коппи 1980 г. о принципе согласованности профилей параметров плазмы [1]. В работе [2] обсуждается существование “предельного” профиля давления плазмы, который не может быть превышен ни увеличением плотности плазмы, ни изменением профиля вкладываемой мощности нагрева. В работе [3] представлены результаты детальных экспериментов по ЭЦР-нагреву плазмы с различными уровнями мощности и различными положениями энергоклада. Сохранение канонических профилей давления и тока плазмы связывается с соответствующим изменением электронного переноса. Отмечается, что коэффициент электронного переноса может зависеть от градиента давления. Принцип согласованности профилей параметров плазмы и связанных с ними процессов самоорганизации плазмы обсуждается в современных работах [4, 5]. Продолжается развитие транспортных моделей для температуры электронов и ионов, основанных на канонических профилях и с введением более

плоских, так называемых “квазиканонических” профилей [6, 7].

В работах [8, 9] предложены оптимальные профили давления и плотности тока и сделано утверждение о том, что сравнение с экспериментом показывает, что оптимальный профиль давления достаточно хорошо согласуется с экспериментальными данными. В работе [10] проводится развитие идей, предложенных в [8, 9], оптимальные профили получают название канонических.

В настоящей работе проводится сравнение канонических профилей работ [8–10] с экспериментальными профилями, содержащимися в международной профильной базе данных PDB [11]. Выбор экспериментальной базы данных PDB обусловлен ее доступностью и наличием описания ее содержания [11]. Сравнение проведено с использованием данных о плазме в токамаках с круглым сечением, поскольку канонические профили в работах [8, 9] получены именно для плазмы с круглым сечением.

В работах [12, 13], дано описание адиабатически-редуцированной МГД-модели нелинейной динамики плазмы и представлены результаты формирования и поддержания самосогласованных профилей давления плазмы, полученных с использованием этой модели. Такое физическое обоснование формирования и поддержания самосогласованных профилей давления плазмы является приоритетным по сравнению с априорным постулированием существования таких про-

филей. В работе [13], в частности, представлен результат моделирования профилей давления плазмы для условий токамака Т-10 с различными значениями граничного коэффициента запаса устойчивости. Обсуждение этого результата представлено в Приложении для того, чтобы в нем можно было воспользоваться формулами из основного текста работы.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Оптимальный профиль давления работ [8, 9] $p(r)$, нормированный на значение $p_0 = p(0)$, представляется соотношением

$$p_{norm} = \frac{p(r)}{p_0} = \frac{1}{(1 + \rho^2)^2}, \quad (1)$$

где

$$\rho^2 = \frac{r^2}{a_*^2}, \quad (2)$$

$$a_*^2 = \frac{q_0}{q_{cyl}} a^2, \quad (3)$$

q – коэффициент запаса устойчивости, $q_0 = q(0)$,

$$q_{cyl} = \frac{5B_T a^2}{I_p(\text{МА})R}, \quad (4)$$

B_T – тороидальное поле, I_p – ток плазмы в МА, a – малый радиус плазменного шнура, R – большой радиус. Таким образом, нормированный оптимальный профиль давления работ [8, 9] p_{kad} представляется в виде:

$$p_{kad} = \frac{p(r)}{p_0} = \frac{1}{\left(1 + \frac{q_{cyl} r^2}{q_0 a^2}\right)^2}. \quad (5)$$

Как следует из соотношений (4) работ [8, 9] нормированный профиль плотности тока $j_{kad} = \frac{j(r)}{j_0}$ и профиль коэффициента запаса устойчивости q_{kad} определяются соотношениями

$$j_{kad} = \frac{j(r)}{j_0} = \frac{1}{\left(1 + \frac{q_{cyl} r^2}{q_0 a^2}\right)^2}, \quad (6)$$

$$q_{kad} = q_0 + q_{cyl} \frac{r^2}{a^2} \quad (7)$$

Плотность тока в модели работ [8, 9] не ограничивается радиусом плазмы a , а распространяется до бесконечности. При этом коэффициент запаса устойчивости на границе $q_{kad}(a) > q_{cyl}$.

В работе [10] оптимальный профиль нормированного давления, представленный соотношением (1), называется каноническим. Однако нормированный радиус ρ в [10] определяется другими соотношениями

$$\rho^2 = \frac{r^2}{a_j^2}, \quad (8)$$

$$a_j^2 = \frac{q_0}{q_{cyl} - q_0} a^2. \quad (9)$$

При этом канонический профиль давления представляется в виде

$$p_{dns} = \frac{p(r)}{p_0} = \frac{1}{\left(1 + \frac{q_{cyl} - q_0}{q_0} \frac{r^2}{a^2}\right)^2}. \quad (10)$$

Как следует из соотношений (15) и (17) работы [10] нормированный профиль плотности тока $j_{dns} = \frac{j(r)}{j_0}$ и профиль коэффициента запаса устойчивости q_{dns} определяются соотношениями

$$j_{dns} = \frac{j(r)}{j_0} = \frac{1}{\left(1 + \frac{q_{cyl} - q_0}{q_0} \frac{r^2}{a^2}\right)^2}, \quad (11)$$

$$q_{dns} = q_0 + (q_{cyl} - q_0) \frac{r^2}{a^2}. \quad (12)$$

Плотность тока в модели работы [10] ограничивается радиусом плазмы a , $j_{dns}(r > a) = 0$. При этом коэффициент запаса устойчивости на границе $q_{dns}(a) = q_{cyl}$.

На рис. 1 представлены канонические профили давления (5) и (10) при значениях q_{cyl} равных 2 и 4. Форма канонических профилей зависит от значений q_0 и q_{cyl} . Значение q_0 полагалось равным 1 в соответствии с работами [8, 9]. Таким образом, для каждого значения q_{cyl} имеется свой канонический профиль давления.

В работах [8, 9] делается утверждение: “сравнение с экспериментом показывает, что профиль (1) достаточно хорошо согласуется с экспериментальными данными”. Это утверждение является побудительной основой для построения аналитической модели самоорганизации плазмы в токамаке. Интересно провести такое сравнение канонических профилей давления p_{kad} (5) и p_{dns} (10) с экспериментальными профилями. Известна международная профильная база данных (PDB), собранных с различных токамаков [11]. Однако именно профили давления не пред-

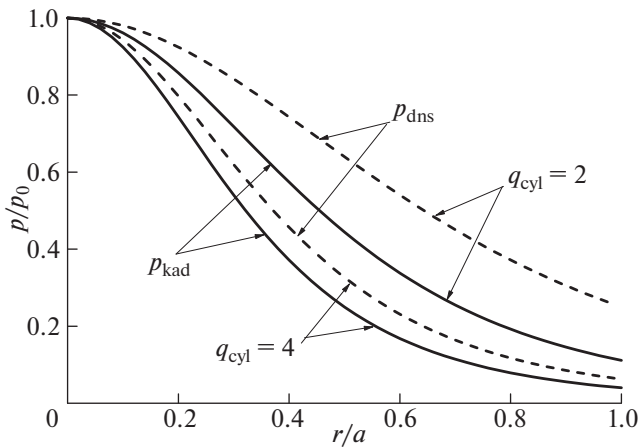


Рис. 1. Канонические профили давления работ [8, 9] – сплошные линии из работы [10] – пунктирные линии при $q_0 = 1$, $q_{cyl} = 2$ и $q_{cyl} = 4$.

ставлены в этой базе данных. Для сравнения в качестве профиля давления будет использоваться электронное давление – произведение электронной плотности n_e на электронную температуру T_e

$$p = n_e T_e. \quad (13)$$

Полученные значения давления нормируются на величину давления в центре плазменного шнура. Использование выражения для полного давления $p = n_e T_e + n_i T_i$ оказывается затруднительным, поскольку в PDB для многих установок, и в частности для T-10, отсутствуют данные об ионной плотности n_i . Сравнение будет проводиться только с данными с токамаков T-10, TEXTOR, Tore Supra, TFTR с круглым сечением плазменного шнура, поскольку именно для плазмы с таким сечением получены канонические профили (5) и (10).

PDB содержит информацию о 20 разрядах T-10 по двум временным точкам. Одна точка с омическим нагревом и вторая в конце ЭЦР-нагрева. Исходные профили плотности и температуры электронов плазмы для первого в базе данных импульса T-10 № 47379 с $q_{cyl} = 2.25$ показаны на рис. 2. Электронная температура в центре плазменного шнура $T_e(0)$ составила 1.25 кэВ на омической стадии и 3.24 кэВ в конце ЭЦР-нагрева. Плотность плазмы в центре шнура $n_e(0)$ составила $5.1 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ на омической стадии и $4.65 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ в конце ЭЦР-нагрева. На рис. 3 представлены профили плотности и температуры электронов плазмы, нормированные на соответствующие значения при $r = 0$. Эти профили имеют существенно отличающуюся форму при омическом и ЭЦР-нагреве. Нормированные профили давления, полученные с использованием профилей плотности и температуры по соотношению (13),

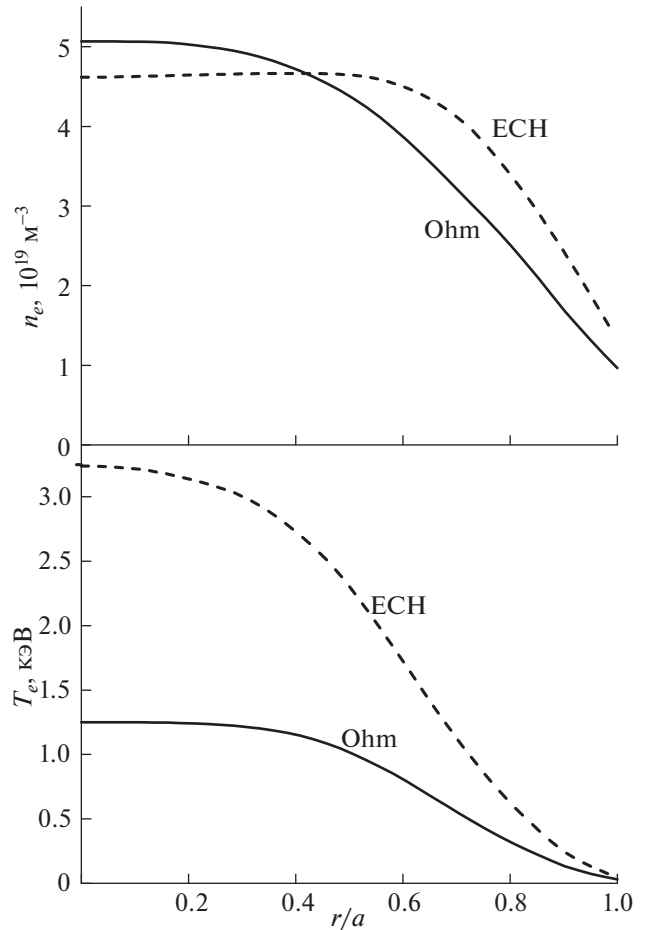


Рис. 2. Профили электронной плотности (вверху) и температуры (внизу) для омической стадии – сплошные линии, для ЭЦР-нагрева – пунктирные линии в импульсе T-10 № 47379.

представлены на рис. 4. Экспериментальные профили нормированного давления в импульсе T-10 № 47379 в омической стадии и при ЭЦР-нагреве оказываются близкими друг к другу, несмотря на различие формы составляющих их профилей плотности и температуры в разных режимах. На рис. 4 также показаны канонические профили p_{kad} (5) и p_{dns} (10). Экспериментальные профили нормированного давления заметно отличаются от обоих канонических профилей.

Сравнение профилей давления в остальных импульсах T-10 с каноническими потребовало бы представление 19 рисунков. Вместо этого табличные значения давления в зависимости от координаты $\frac{r}{a}$ соотносятся с координатой $\sqrt{\frac{q_{cyl} r}{q_0 a}}$ для сравнения с профилем p_{kad} (5) и с координатой $\sqrt{\frac{q_{cyl} - q_0}{q_0} \frac{r}{a}}$ для сравнения с профилем p_{dns} (10). От-

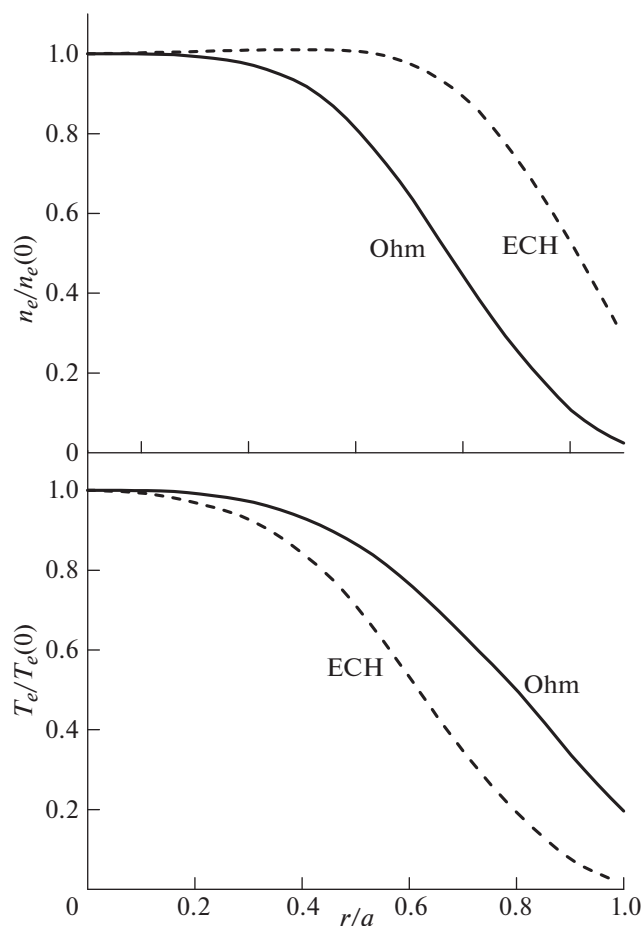


Рис. 3. Нормированные профили электронной плотности (вверху) и температуры (внизу) для омической стадии – сплошные линии, для ЭЦР-нагрева – пунктирные линии в импульсе T-10 № 47379.

метим, что подобная перенормировка радиальной координаты для сравнения с профилем (5) использована на рис. 1 работы [8]. В отношении профилей T-10 перенормировка координаты проводилась в предположении $q_0 = 1$, используемом в работах [8–10].

На рис. 5 представлено сравнение 20-ти омических профилей нормированного давления p/p_0 T-10 из базы данных PDB с каноническим профилем p_{kad} (5).

Сравнение 20-ти профилей нормированного давления T-10 на стадии ЭЦР-нагрева с каноническим профилем p_{kad} (5) представлено на рис. 6.

На рис. 7 представлено сравнение 20-ти омических профилей нормированного давления T-10 из базы данных PDB с каноническим профилем p_{dns} (10).

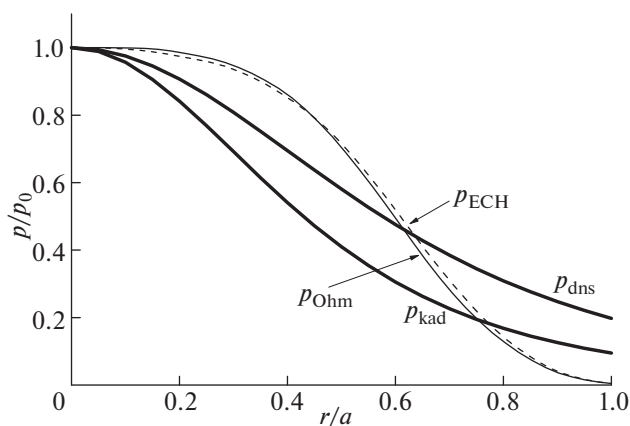


Рис. 4. Сравнение нормированных профилей давления в импульсе T-10 № 47379 с каноническими профилями p_{kad} (5) и p_{dns} (10). Канонические профили показаны сплошными жирными линиями, экспериментальные – сплошной тонкой для омической стадии и пунктирной – для стадии ЭЦР-нагрева.

Результаты сравнения, показанные на рис. 4–7, демонстрируют заметное отличие экспериментальных профилей нормированного давления T-10 от канонических профилей p_{kad} (5) и p_{dns} (10).

Сравнение экспериментальных профилей нормированного давления, полученных на других токамаках с круглым сечением, с каноническими профилями представлено ниже.

В отличие от данных T-10, содержащих по каждому импульсу профили только для двух моментов времени, данные с других установок содержат профили для десятков моментов времени – TEXTOR и сотен – Tore Supra и TFTR. Для сравнения экспериментальных профилей с каноническими выбирались профили в моменты времени ближайшие к временам, указанным в нульмерных данных (0-D файлы [11]). Так из данных TEXTOR по трем представленным импульсам отобраны 4 профиля. Перенормировка координаты $\frac{r}{a}$ к координате $\sqrt{\frac{q_{cyl}}{q_0}} \frac{r}{a}$ проводилась с использованием измеренного значения q_0 . Сравнение этих профилей нормированного давления TEXTOR с каноническим профилем p_{kad} (5) представлено на рис. 8.

Результаты, показанные на рис. 8, демонстрируют отличие экспериментальных профилей нормированного давления TEXTOR от канонического профиля p_{kad} (5).

Данные Tore Supra содержат по несколько сотен временных точек по каждому импульсу в базе данных PDB. Для сравнения экспериментальных профилей с каноническими, также, как и для TEXTOR, выбирались профили в моменты вре-

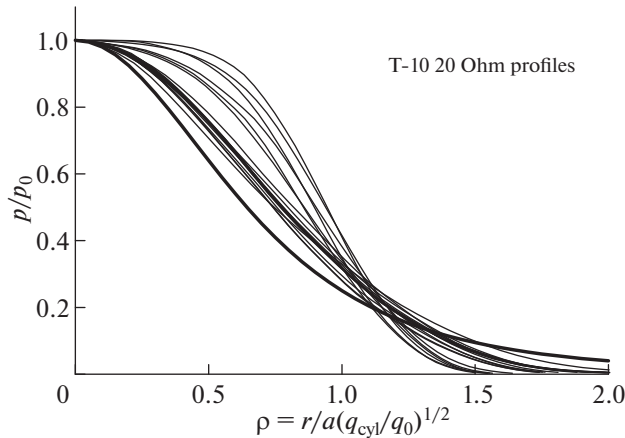


Рис. 5. Сравнение 20-ти омических нормированных профилей давления Т-10 из базы данных PDB (тонкие линии) с каноническим профилем p_{kad} (5) (жирная линия).

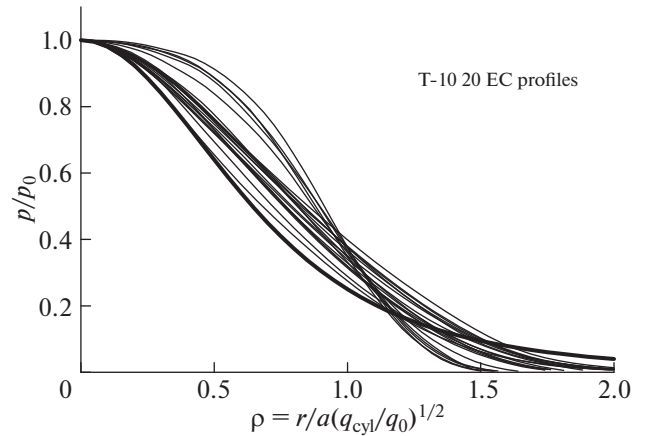


Рис. 6. Сравнение 20-ти нормированных профилей давления Т-10 на стадии ЭЦР-нагрева из базы данных PDB (тонкие линии) с каноническим профилем p_{kad} (5) (жирная линия).

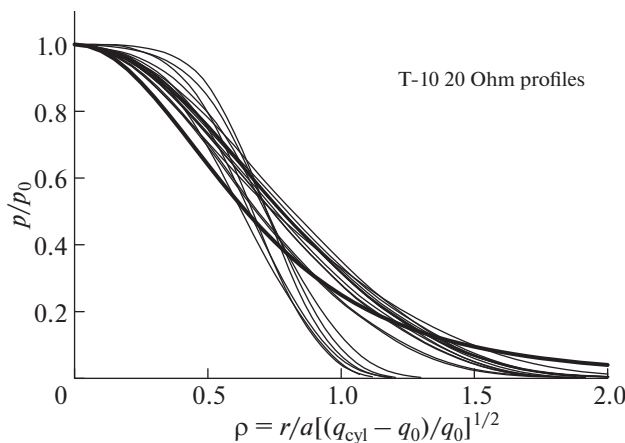


Рис. 7. Сравнение 20-ти омических нормированных профилей давления Т-10 из базы данных PDB (тонкие линии) с каноническим профилем p_{dns} (10) (жирная линия).

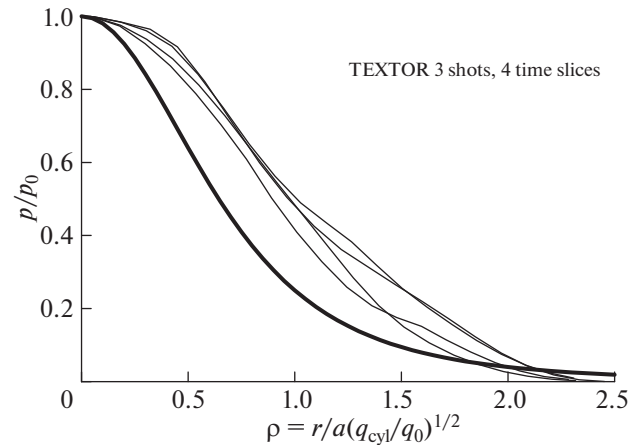


Рис. 8. Сравнение четырех нормированных профилей давления TEXTOR из базы данных PDB (тонкие линии) с каноническим профилем p_{kad} (5) (жирная линия).

мени ближайšie к временам, указанным в нульмерных данных (0-D файлы [11]). Перенормировка координаты $\frac{r}{a}$ к координатам $\sqrt{\frac{q_{cyl}}{q_0}} \frac{r}{a}$ и

$\sqrt{\frac{q_{cyl} - q_0}{q_0}} \frac{r}{a}$ проводилась, также как и для TEXTOR, с использованием измеренного значения q_0 . Сравнение этих профилей нормированного давления с каноническим профилем p_{kad} (5) представлено на рис. 9.

Экспериментальные профили нормированного давления Tore Supra отличаются от канонического профиля p_{kad} (5).

Экспериментальные профили нормированного давления Tore Supra отличаются также и от канонического профиля p_{dns} (10) (см. рис. 10).

После детального рассмотрения данных Т-10 и профилей давления в отдельных временных точках TEXTOR и Tore Supra обратимся к данным TFTR. База данных PDB содержит информацию о 107 импульсах TFTR. По каждому импульсу представлены профили параметров плазмы в сотнях временных точек. Для анализа отобраны 4 импульса с разными типичными для TFTR характеристиками удержания: импульс 89168 в омическом режиме, 105314 в L-моду, 76770 – так называемый Super Shot, 84011 – импульс с обрат-

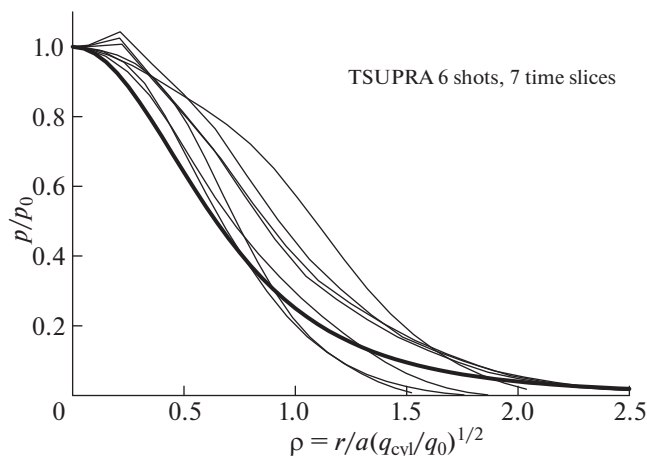


Рис. 9. Сравнение семи нормированных профилей давления Tore Supra из базы данных PDB (тонкие линии) с каноническим профилем p_{kad} (5) (жирная линия).

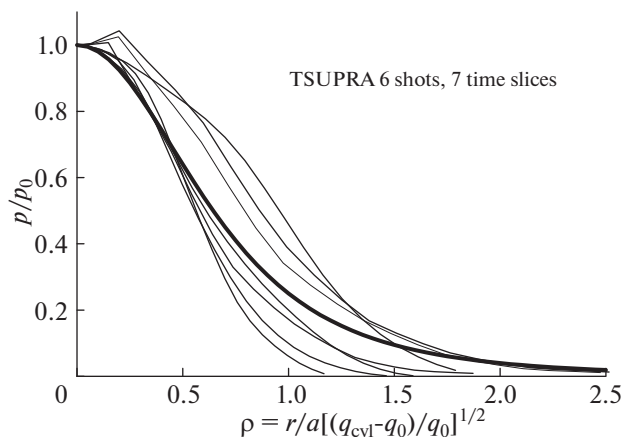


Рис. 10. Сравнение семи нормированных профилей давления Tore Supra из базы данных PDB (тонкие линии) с каноническим профилем p_{dns} (10) (жирная линия).

ным широм (с немонотонным профилем коэффициента запаса устойчивости). Для сравнения экспериментальных профилей с каноническими, также как для TEXTOR и Tore Supra, выбирались профили в моменты времени ближайšie к временам, указанным в нульмерных данных (0-D файлы [11]). Отметим, что именно эти времена названы “временами интереса” (time of interest) в файлах-комментариях, сопровождающих данные TFTR.

Данные TFTR, также, как и TEXTOR и Tore Supra, содержат профили коэффициента запаса устойчивости $q(r)$. Если для TEXTOR и Tore Supra использовалось только значение q_0 для перенор-

мировки координаты $\frac{r}{a}$ к координатам $\sqrt{\frac{q_{cyl}}{q_0}} \frac{r}{a}$ и

$\sqrt{\frac{q_{cyl} - q_0}{q_0}} \frac{r}{a}$, то профиль q на TFTR используется для обсуждения связи между профилями $q(r)$ и $p(r)$. Эта связь канонических профилей

$$p(r)/p_0 = [q(r)/q_0]^{-2} \quad (14)$$

следует из соотношений (4) работ [8, 9] и соотношений (15) и (17) работы [10]. Эта связь также следует из сравнения соотношения (5) с (7) и соотношения (10) с (12).

Сравнение экспериментальных профилей коэффициента запаса устойчивости и нормированного электронного давления для импульса 89168 TFTR в омическом режиме с каноническими показано на рис. 11.

Экспериментальный профиль нормированного давления p_{TFTR} в омическом импульсе 89168 за-

метно отличается от канонических профилей p_{kad} [8] и p_{dns} [10], в то время как экспериментальный профиль коэффициента запаса устойчивости q_{TFTR} лежит между каноническими профилями q_{kad} [8, 9] и q_{dns} [10]. Сходство профиля q_{TFTR} и профилей q_{kad} , q_{dns} и отличие, с другой стороны, профиля p_{TFTR} от профилей p_{kad} , p_{dns} служит основанием для сомнения в правильности связи (14).

Сравнение экспериментальных профилей коэффициента запаса устойчивости и нормированного электронного давления для импульса L-моды 105314 TFTR с каноническими показано на рис. 12.

Если экспериментальный профиль коэффициента запаса устойчивости q_{TFTR} близок по форме к каноническим профилям q_{kad} [8, 9] и q_{dns} [10], то профиль нормированного давления p_{TFTR} заметно отличается от канонических профилей p_{kad} [8, 9] и p_{dns} [10]. Профиль нормированного давления p_{TFTR} имеет немонотонный характер, в отличие от профиля коэффициента запаса устойчивости q_{TFTR} . Таким образом, экспериментальные данные по форме профилей p_{TFTR} и q_{TFTR} находятся в противоречии со связью (14) для канонических профилей давления и коэффициента запаса устойчивости.

Сравнение экспериментальных профилей коэффициента запаса устойчивости и нормированного электронного давления для импульса с характеристикой Super Shot 76770 TFTR с каноническими показано на рис. 13.

Экспериментальные профили коэффициента запаса устойчивости q_{TFTR} и давления p_{TFTR} в им-

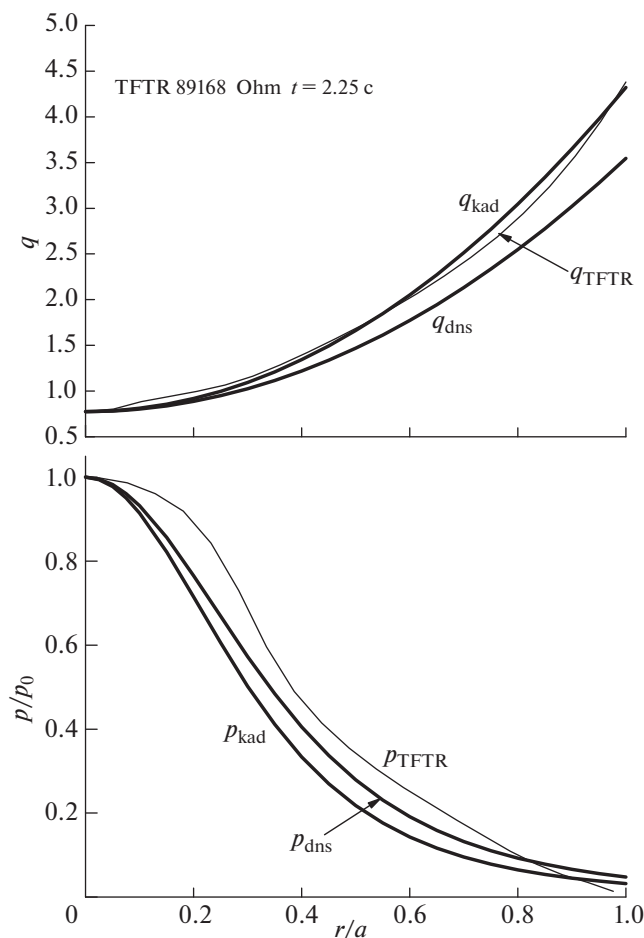


Рис. 11. Сравнение экспериментальных профилей коэффициента запаса устойчивости и нормированного давления в омическом импульсе 89168 TFTR (тонкие линии) с каноническими профилями (жирные линии).

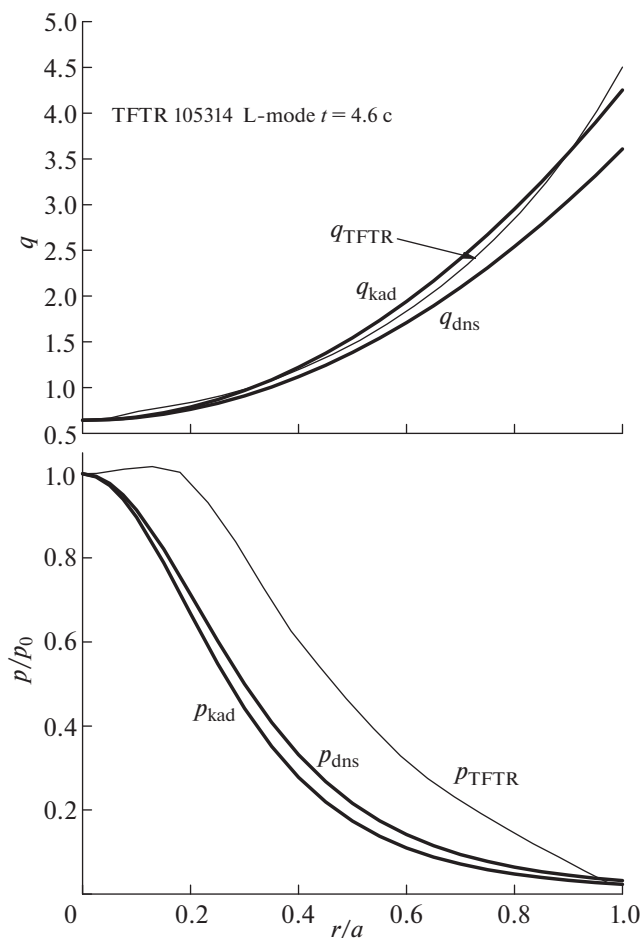


Рис. 12. Сравнение экспериментальных профилей коэффициента запаса устойчивости и нормированного давления в импульсе L-моды 105314 TFTR (тонкие линии) с каноническими профилями (жирные линии).

пульсе Super Shot 76770 отличаются от канонических профилей. Экспериментальный профиль давления p_{TFTR} лежит ниже канонических профилей p_{kad} [8, 9] и p_{dns} [10] и, таким образом, является более обостренным, в отличие от всех рассмотренных ранее случаев, в которых экспериментальный профиль давления оказывался более пологим в окрестности $r = 0$, чем канонический.

Немонотонный экспериментальный профиль коэффициента запаса устойчивости в импульсе с обратным широм естественным образом должен отличаться от исходно предполагаемого монотонного канонического профиля. Но для относительной полноты рассмотрения данных TFTR с различными характеристиками удержания на рис. 14 представлено сравнение экспериментальных профилей коэффициента запаса устойчивости и нормированного электронного давления с

каноническими для импульса с обратным широм 84011.

Как и предполагалось, экспериментальные профили существенно отличаются от канонических. Несмотря на немонотонность профиля коэффициента запаса устойчивости q_{TFTR} , профиль нормированного электронного давления p_{TFTR} оказывается не только монотонным, но и довольно сильно обостренным, что свидетельствует об отсутствии связи (14) между профилями p и q .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнено сравнение экспериментальных нормированных профилей электронного давления плазмы для разрядов с токамаков с круглым сечением T-10, TEXTOR, Tore Supra, TFTR с каноническими профилями [8–10]. Электронное давление рассчитано как произведение темпера-

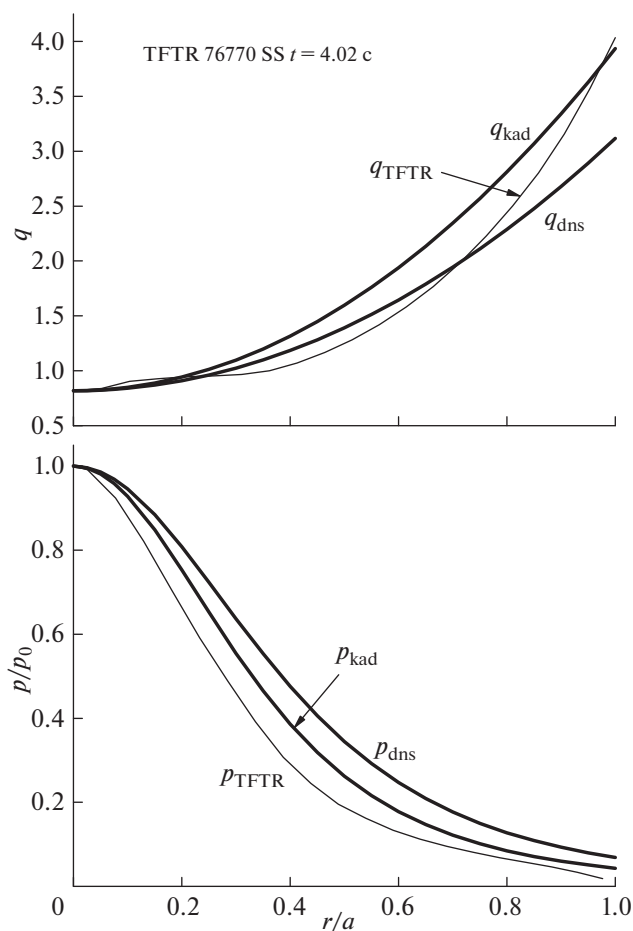


Рис. 13. Сравнение экспериментальных профилей коэффициента запаса устойчивости и нормированного давления в импульсе Super Shot 76770 TFTR (тонкие линии) с каноническими профилями (жирные линии).

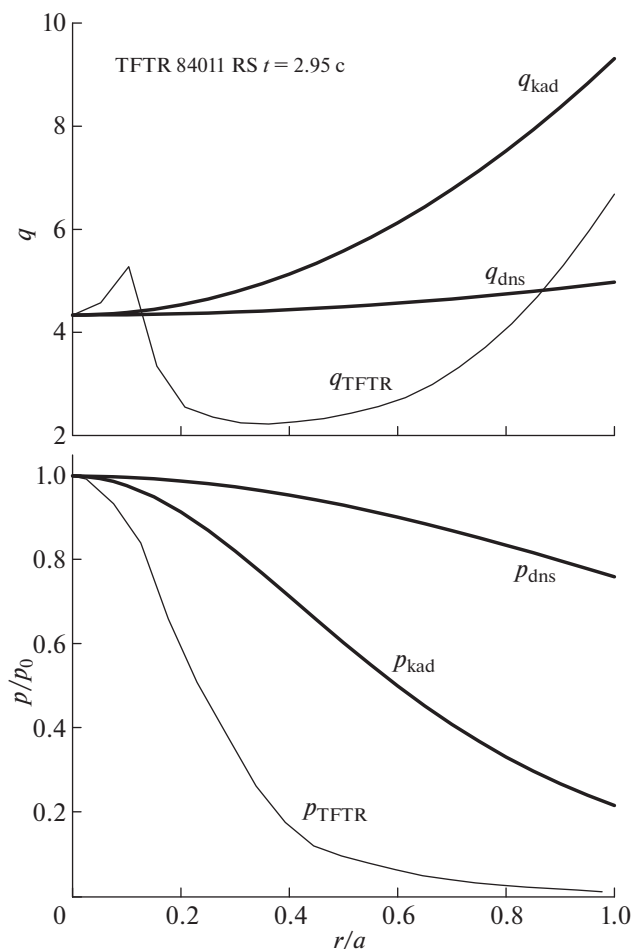


Рис. 14. Сравнение экспериментальных профилей коэффициента запаса устойчивости и нормированного давления в импульсе с обратным широм 84011 TFTR (тонкие линии) с каноническими профилями (жирные линии).

туры и плотности, профили которых содержатся в международной базе данных [11]. Полученные значения давления нормируются на величину давления в центре плазменного шнура. Сравнение показывает заметное отличие экспериментальных нормированных профилей электронного давления плазмы от канонических. Кроме того, установлено, что между экспериментальными профилями давления и профилями коэффициента запаса устойчивости отсутствует связь, предполагаемая в работах [8–10]. Выявленное отличие экспериментальных нормированных профилей давления из международной базы данных [11] от канонических профилей не соответствует утверждению в работах [8, 9] о хорошей согласованности канонического профиля давления плазмы с экспериментальными данными.

Автор благодарен Ю.Н. Днестровскому за поддержку работы.

ПРИЛОЖЕНИЕ

О РЕЗУЛЬТАТАХ РАБОТЫ (13), БЛИЗКИХ К ТЕМЕ СРАВНЕНИЯ КАНОНИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ПРОФИЛЕЙ ДАВЛЕНИЯ

В работе [13] на рис. 7 представлены результаты расчета профилей нормированного давления плазмы с использованием адиабатически-редуцированной МГД-модели нелинейной динамики плазмы. Рассмотрим рис. 7б, на котором представлены рассчитанные нормированные профили давления для трех импульсов токамака Т-10 с различными значениями коэффициент запаса устойчивости на границе плазменного шнура $q_L = q_{\text{cyl}}$: 8.5, 4 и 3 (Отметим, ошибочное наименование горизонтальной оси – ρ , см. Должен быть нормированный радиус $\hat{\rho}$, определенный выше в (13) как $\hat{\rho} = r/\sqrt{I_p R/B_0}$).

Таблица 1. Значения нормированного давления плазмы p/p_0 , p_{dns} и p_{kad} в зависимости от значения нормированного радиуса плазмы $\hat{\rho}$

$\hat{\rho}$	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
p/p_0 из Рис. 7б	0.76	0.38	0.17	0.07	0.03
p_{dns}	0.72	0.34	0.15	0.07	0.03
p_{kad}	0.69	0.31	0.13	0.06	0.03

В расчетах достигнуто практически полное совпадение профилей с разными значениями q_L . Такое совпадение не согласуется со связью (14) для канонических профилей давления и коэффициента запаса устойчивости. В соответствии с (14) профили нормированного давления с разными значениями q_L должны различаться. Интересно сравнить профили, представленные на рис. 7б с каноническими профилями p_{kad} (5) и p_{dns} (10). Данные для такого сравнения представлены в табл. 1.

Данные p/p_0 из рис. 7б получены “оцифровкой” сплошной кривой для разряда #22888 с $q_L = 8.5$, данные для p_{dns} рассчитаны для $q_L = 8.5$.

Сравнение показывает, что профиль p/p_0 из рис. 7б близок к профилю p_{dns} и заметно отличается от профиля p_{kad} . Кроме расчетных профилей на рис. 7б квадратами представлен экспериментальный нормированный профиль давления в разряде #22888 с $q_L = 8.5$. Экспериментальный нормированный профиль близок к расчетным. Следовательно, экспериментальный профиль давления в разряде #22888 так же, как и расчетные, отличается от профиля p_{kad} .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Coppi B.* // Comments Plasma Phys. Control. Fusion. 1980. V. 5. P. 261.
2. *Esipchuk Yu.V., Razumova K.A.* // Plasma Phys. Control. Fusion. 1986. V. 28. P. 1253.
3. *Аликаев В.В., Багдасаров А.А., Васин Н.В., Днестровский Ю.Н., Есипчук Ю.В., Кислов А.Я., Ноткин Г.Е., Разумова К.А., Стрелков В.С., Тарасян К.Н.* // Физика плазмы. 1988. Т. 14. С. 1027.
4. *Razumova K.A., Andreev V.F., Eliseev L.G., Kantor M.Y., Kasyanova N.V., Lysenko S.E., Melnikov A.V.* // Plasma Phys. Control. Fusion. 2021. V. 63. P. 055003.
5. *Razumova K.A., Kasyanova N.V., Andreev V.F., Lysenko S.E.* // Plasma Phys. Control. Fusion. 2022. V. 64. P. 125007.
6. *Dnestrovskij Yu.N., Danilov A.V., Dnestrovskij A.Yu., Lysenko S.E., Melnikov A.V., Nemets A.R., Nurgaliev M.R., Subbotin G.F., Solovov N.A., Sychugov D.Yu., Cherkasov S.V.* // Plasma Phys. Control. Fusion. 2021. V. 63. P. 055012.
7. *Днестровский Ю.Н., Данилов А.В., Днестровский А.Ю., Лысенко С.Е., Мельников А.В., Немец А.Р., Нургалиев М.Р., Субботин Г.Ф., Соловьев Н.А., Сычугов Д.Ю., Черкасов С.В.* // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2022. Т. 45. С. 9.
8. *Кадомицев Б.Б.* // Изв. вузов. Радиофизика. 1986. Т. 29. С. 1032.
9. *Кадомицев Б.Б.* // Физика плазмы. 1987. Т. 13. С. 771.
10. *Днестровский Ю.Н., Днестровский А.Ю., Лысенко С.Е.* // Физика плазмы. 2005. Т. 31. С. 579.
11. The ITER 1D Modelling Working Group: *Boucher D., Connor J.W., Houlberg W.A., Turner M.F., Bracco G., Chudnovskiy A., Cordey J.G., Greenwald M.J., Hoang G.T., Hogewij G.M.D., Kaye S.M., Kinsey J.E., Mikkelsen D.R., Ongena J., Schissel D.R., Shirai H., Stober J., Stubberfield P.M., Waltz R.E., Weiland J.* // Nucl. Fusion. 2000. V. 40. № 12. P. 1955.
12. *Днестровский А.Ю., Пастухов В.П., Чудин Н.В.* // Физика плазмы. 2017. Т. 43. С. 325.
13. *Пастухов В.П.* // Физика плазмы. 2021. Т. 47. С. 808.