———— ТОКАМАКИ ——

УДК 621.039.611, 533.932

СРАВНЕНИЕ ЭЦР-НАГРЕВА ПЛАЗМЫ В ТОКАМАКЕ Т-10 НА ПЕРВОЙ И ВТОРОЙ ГАРМОНИКЕ

© 2020 г. Ю. Н. Днестровский^{*a*,*}, А. В. Данилов^{*a*}, А. Ю. Днестровский^{*a*}, Л. А. Ключников^{*a*}, С. Е. Лысенко^{*a*,**}, А. В. Мельников^{*a*, *b*}, А. Р. Немец^{*a*}, М. Р. Нургалиев^{*a*}, Г. Ф. Субботин^{*a*}, Н. А. Соловьев^{*a*}, А. В. Сушков^{*a*}, Д. Ю. Сычугов^{*c*}, С. В. Черкасов^{*a*}

^а Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", Москва, Россия ^b Национальный ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

^с Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*e-mail: Dnestrovskiy_YN@nrcki.ru **e-mail: Lysenko_SE@nrcki.ru Поступила в редакцию 11.10.2019 г. После доработки 19.12.2019 г. Принята к публикации 19.12.2019 г.

На токамаке T-10 результаты нагрева плазмы на первой и второй гармониках электронно-циклотронной частоты заметно различаются. Однако многопараметричность задачи делает оценку качества нагрева "на глаз" невозможной. В настоящей работе анализ нагрева на обеих гармониках проводится с помощью двух транспортных моделей, построенных для моделирования каждого случая в отдельности. Для нагрева на второй гармонике решается, в частности, обратная задача определения профиля вложенной мощности по профилю экспериментальной температуры электронов. На этом пути удается определить как профиль поглощенной мощности, так и долю поглощенной мощности по отношению к вложенной мощности. Показано, что при малой плотности плазмы доля поглощенной мощности невелика, что, по-видимому, является следствием малого поглощения волн при одном проходе через плазму. При нагреве на второй гармонике профиль поглощенной мощности оказывается гораздо более плоским, чем это ожидается по расчетам лучевых траекторий ЭЦРволн. Многопроходность поглощения волн со случайным отражением от гофрированных стенок приводит к таким профилям поглощения. При большой плотности плазмы поглощенная мощность близка к вложенной мощности. Однако и в этом случае результаты нагрева на второй гармонике оказываются хуже, чем на первой гармонике, из-за уплощенного профиля поглощенной мощности.

Ключевые слова: токамак, электронно-циклотронный нагрев, численное моделирование **DOI:** 10.31857/S0367292120050030

1. ВВЕДЕНИЕ

В течение 25 лет для моделирования температуры электронов и ионов и плотности плазмы на разных установках мы использовали Стандартную модель канонических профилей (S) [1, 2]. Как-то так случилось, что моделирование температуры электронов на установке Т-10 выпало из нашего внимания. При моделировании плотности на Т-10 мы использовали экспериментальную температуру электронов. Однако, рано или поздно, мы должны были обратиться к этой проблеме. Это случилось в 2017 г. К этому времени у нас накопилась достаточно большая база экспериментальных данных по профилям плотности плазмы и температуры электронов. С импульсами из этой базы мы проведем в настоящей работе сравнение нагрева электронов на первой и второй электронно-циклотронной (ЭЦ) гармонике.

Сначала немного истории. В течение семидесятых и восьмидесятых годов XX века на установке Т-10 для СВЧ-нагрева электронов использовалась первая гармоника. К 1987 году было установлено 11 гиротронов. Мощность каждого отдельного гиротрона составляла около 180– 200 кВт, так что суммарная мощность комплекса гиротронов достигала 2 МВт. Основные эксперименты были проведены в режиме с параметрами: ток разряда I = 0.19-0.21 МА, магнитное поле $B_T = 2.8-2.9$ Тл, радиус лимитера a = 0.32 м, $q_a \approx 5$. Величина средней плотности (при нормировке на радиус лимитера) изменялась в диапазоне $\overline{n} = (2 4.6) \times 10^{19}$ м⁻³. В рекордных импульсах температура электронов достигала 9.5 кэВ [3, 4].

Однако использование первой гармоники ограничивало дальнейшее повышение плотности, поэтому в конце восьмидесятых годов было принято решение о переходе на нагрев на второй гармонике ЭЦ-частоты. В начале девяностых годов были установлены новые гиротроны, и с тех пор эксперименты по нагреву плазмы и генерации тока на T-10 проводились на второй гармонике.

С тех пор прошло много лет, многое забыто, поэтому интересно и полезно сравнить старые результаты, полученные с нагревом на первой гармонике, с современными результатами, полученными на второй гармонике. Подробно результаты экспериментов и расчетов обсуждаются в последующих разделах.

Вообще говоря, могут существовать две причины для появления расхождений в эффективности нагрева на первой и второй гармониках. Вопервых, в плазме при нагреве на второй гармонике почему-то может образоваться увеличенный перенос энергии по электронному каналу. Вовторых, плазма может оставаться по величине переноса прежней, но вклад мощности от гиротронов на второй гармонике может оказаться совсем не похожим на то, что мы ожидаем. Известно, что ЭЦР-нагрев сопровождается такими эффектами, как выброс плотности, уменьшение абсолютной величины потенциала плазмы, развитие различных типов колебаний, падение глобального времени жизни плазмы [5, 6]. Однако вряд ли эти эффекты явно зависят от частоты гиротронов.

Для описания импульсов с нагревом на второй гармонике, в предположении увеличенного переноса энергии, была разработана Модифицированная модель канонических профилей (*M*) [5]. Неявно предполагалось, что затухание волн однопроходное, а причиной невысокой температуры электронов являются высокие значения коэффициентов переноса. Применение Модифицированной модели к широкому набору импульсов установки Т-10 показало, что эта модель разумно описывает перенос в импульсах с нагревом на второй гармонике. Однако коэффициенты переноса, соответствующие этой модели, оказались много больше аналогичных коэффициентов в Стандартной модели.

Для анализа второй возможности мы исследуем обратную задачу для Стандартной модели. В такой постановке считается, что профиль температуры электронов задан (для каждого импульса — это экспериментальный профиль), а искомым является профиль вложенной мощности. Обратная задача некорректна. Чтобы сделать ее корректной, нужно задать класс допустимых функций, в котором следует искать ее решение.

Будем считать поглощение СВЧ-волн на второй гармонике многопроходным. Поскольку стенка камеры гофрирована, то направление распространения пучка волн после отражения от стенки непредсказуемо. По-видимому, при каждом отражении от металлической стенки поглощается лишь малая доля мощности пучка волн. Это означает, что пучок может проходить через плазму десятки раз, и при каждом проходе часть его мощности будет поглощаться в плазме на непредсказуемом радиусе. Поэтому для приближенного описания профиля поглощенной мощности естественно принять плоский по радиусу профиль.

Если это так, то в качестве класса допустимых функций в первом приближении естественно принять класс однородных (плоских) по радиусу функций со свободной амплитудой, отражающей величину мощности, поглощенной плазмой. Для этого введем понятие "эффективности нагрева", равной отношению

$$\eta = Q_{ab} / Q_{EC}, \tag{1}$$

где Q_{EC} и Q_{ab} – введенная и поглощенная плазмой мощности. Будем считать, что эффективность нагрева η является искомым параметром, и будем его подбирать так, чтобы расчетный ("оптимальный") профиль электронной температуры был по возможности близок к экспериментальному профилю. Как модель, так и сам оптимальный профиль будем обозначать через S_{FEC} (Standard Model with Flat EC power).

Решение обратной задачи не единственно, поскольку можно выбрать и другой класс допустимых функций. Примеры этого будут приведены в последующих разделах. Важно только, чтобы отклонение оптимального решения $T_e^{opt}(\rho)$ от экспериментального $T_e^{\exp}(\rho)$ (величина $d2T_e$) было невелико. Чем меньше $d2T_e$, тем больше вероятность того, что мы нашли хорошее приближение для профиля поглощенной мощности. В математике так найденное решение обратной задачи обычно называют квазирешением.

В последующих главах проводится более детальный анализ процессов переноса в импульсах с нагревом на первой и второй гармонике. Введенные транспортные модели (S, M и S_{FEC}) используются в качестве инструментов исследования.

2. ПОТОКИ ТЕПЛА И ТРАНСПОРТНЫЕ МОДЕЛИ

Напомним основные соотношения для упомянутых транспортных моделей [1, 2, 5]. Поток тепла в электронном канале q_e имеет вид

$$q_{e} = -k_{e}^{PC}T_{e}\left(\frac{T_{e}'}{T_{e}} - \frac{T_{c}'}{T_{c}}\right)H\left(-\left[\frac{T_{e}'}{T_{e}} - \frac{T_{c}'}{T_{c}}\right]\right) - k_{e}^{0}T_{e}', \quad (2)$$

где $T_c = T_c(\rho)$ – канонический профиль температуры. Здесь H(z) – функция Хевисайда (H(z) = 1

при $z \ge 0$, H(z) = 0 при z < 0). Последний член в (2) играет важную роль, например, при нецентральном СВЧ-нагреве, когда поток тепла в центральной области плазмы мал и профиль температуры электронов близок к каноническому профилю. Принято, что т.н. коэффициент жесткости для

электронной температуры k_{ρ}^{PC} равен

$$k_e^{PC} = n\chi_e^{PC} = C_e \frac{1}{M} \left(\frac{a}{R}\right)^{0.75} q_{cyl} q \left(\rho = \frac{\rho_{max}}{2}\right) \times \left(T_e \left(\rho = \frac{\rho_{max}}{4}\right)\right)^{h_e} \left(\frac{3}{R}\right)^{1/4} \left(\frac{\overline{n}}{B_0}\right) = \text{const}(\rho).$$
(3)

Кроме того, играет важную роль граничное условие в точке $\rho = 0$ для канонического профиля функции $\mu(\rho) = 1/q(\rho)$. Для Стандартной модели и омического режима в Модифицированной модели

$$h_e = 0.5, \quad \mu_c(0) = 1.$$
 (4)

Для режима с СВЧ-нагревом в Модифицированной модели

$$h_e = 1.8 - 2, \quad \mu_c(0) = 0.6.$$
 (5)

Первое условие в (5) означает, что в модели M удержание энергии катастрофически быстро ухудшается с ростом температуры. Второе условие (5) фактически означает, что профили температуры электронов при нагреве на второй гармонике, вообще говоря, являются более широкими, чем профили температуры при нагреве на первой гармонике в аналогичных условиях. В последующих разделах для анализа используются импульсы, для которых $q_a < 5.5$. Поток тепла от электронов к ионам в рассматриваемых импульсах невелик (порядка 50–150 кВт), поэтому мы его учитываем в расчетах, но не обсуждаем.

3. НАГРЕВ НА ПЕРВОЙ ГАРМОНИКЕ. РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ 1988 ГОДА

Эксперименты с СВЧ-нагревом плазмы на первой гармонике проводились на установке T-10 в 1980-х годах. Самые известные эксперименты с 11-ю гиротронами относятся к 1987—1988 гг. Основные результаты этих экспериментов были опубликованы в [3, 4]. В настоящей работе мы будем опираться на эти статьи, поскольку там были приведены достаточно подробные данные.

При нагреве на первой гармонике радиус лимитера составлял a = 0.32 м, а экспериментальная средняя плотность \overline{n} нормировалась на 0.4 м. В настоящей работе эту среднюю плотность мы перенормируем на радиус a, т.е. на 0.32 м, что дает множитель 1.25.

Для оценки точности модели введем среднеквадратичную (RMS) величину отклонения рассчитанного профиля электронной температуры от экспериментальной температуры $d2T_e$

$$d2T_e = \left(\int_{0}^{0.7} d\rho \frac{(T_e - T_e^{\exp})^2}{(T_e^{\exp})^2} / \int_{0}^{0.7} d\rho\right)^{1/2}.$$
 (6)

Для краткости величину $d2T_e$ будем называть ошибкой моделирования. Верхний предел в интеграле (6), равный 0.7, определяется малыми значениями температуры в области $\rho > 0.7$. Если поставить верхний предел равным единице, то интегральная ошибка будет определяться в основном ошибками в области 0.7 < ρ < 1, так как

 T_e^{\exp} здесь мала, а она стоит в знаменателе подынтегрального выражения.

3.1. Импульс № 45439 с умеренной плотностью

В этом импульсе параметры плазмы следующие: плотность в момент ЭЦР-нагрева составляет $\overline{n} = 2.8 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$, ток I = 0.2 MA, магнитное поле $B_T = 2.8 \text{ Tл}$, $q_a = 5.1$, вложенная мощность $Q_{EC} = 0.63 \text{ MBT}$.

На рис. 1 показан профиль экспериментальной температуры электронов $T_e^{\exp}(\rho)$ (пунктир) и профили температуры $T_e(\rho)$, рассчитанные по Стандартной (*S*) и Модифицированной (*M*) моделям канонических профилей. Здесь же приведен профиль вложенной мощности P_{EC} , близкий к экспериментальному. Видно, что Стандартная модель дает температуру, более близкую к экспериментальной температуре, чем Модифицированная модель.

3.2. Импульс № 45750

На рис. 2а показана эволюция параметров плазмы во времени для этого импульса. Через $T_{e}(0)$ обозначена центральная температура электронов, через n(0) – центральная плотность плазмы, через \overline{n} — средняя (хордовая) плотность плазмы. Поскольку стенки камеры перед этим импульсом были карбонизированы, то во время СВЧ-нагрева плотность, после небольшого спада, нарастает. Профиль экспериментальной температуры для этого импульса в работе [3] приведен только для момента $\Delta t = 60$ мс, когда максимальная температура почти стационарна и близка к значению 6 кэВ, а плотность равна $\bar{n} = 2.53 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$. В более ранний момент ($\Delta t =$ = 20 мс), когда температура электронов максимальна и близка к 10 кэВ, хордовая плотность равна $\overline{n} = 2.03 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

3.2.1. Момент времени $\Delta t = 20$ мс, когда плотность невелика и равна $\bar{n} = 2.03 \times 10^{19}$ м⁻³. На



Рис. 1. ЭЦР-нагрев на первой гармонике. Профили экспериментальной электронной температуры T_e^{\exp} и вложенной мощности P_{EC} в импульсе № 45439 при $\overline{n} = 2.8 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ (штриховые линии), а также профили электронной температуры T_e , рассчитанные по Стандартной (*S*) и Модифицированной (*M*) моделям канонических профилей (сплошные линии).

рис. 2б показаны профили температуры электронов, рассчитанные по Стандартной и Модифицированной моделям, при хордовой плотности $\overline{n} = 2.03$. Серый кружок соответствует экспериментальной центральной температуре электронов $T_e^{\exp}(0) = 9.5$ кэВ, принятой в [3] с учетом возможных экспериментальных ошибок. Штриховой линией показан профиль вложенной мощности P_{EC} , близкий к представленному в работе [3]. На рис. 2в показаны профили эффективных коэффициентов теплопроводности χ_e , рассчитанные по моделям S и M.

3.2.2. Момент времени $\Delta t = 60$ мс, когда плотность достигла значения $\bar{n} = 2.53 \times 10^{19}$ м⁻³. Рис. 2г относится именно к этому моменту времени. На нем представлены результаты расчетов температуры электронов по моделям *S* и *M* при пикированном профиле P_{EC} и мощности $Q_{EC} = 1.9$ MBT, а также экспериментальный профиль электронной температуры. Как и в предыдущем случае, использование Стандартной модели дает температуру, близкую к эксперименту, Модифицированная модель дает температуру в два раза меньшую.

Таким образом, все рассмотренные импульсы с нагревом на первой гармонике могут быть разумно описаны Стандартной моделью с RMS ошибками порядка 10–12%. Модифицированная модель дает по температуре электронов сильно заниженные результаты (в рассмотренных импульсах в 1.9–2.5 раза).

4. НАГРЕВ НА ВТОРОЙ ГАРМОНИКЕ

Сравним попарно применение разных транспортных моделей к импульсам T-10, используя модель S [1, 2], модель M, описанную в [5], и модель S_{FEC} с плоским профилем вложенной мощности. Напомним, что в импульсах с нагревом на второй гармонике малый радиус составляет a = 0.3 м.

4.2. Импульс № 73197 с малой плотностью

В этом импульсе I = 0.23 MA, $B_T = 2.2$ Тл. При ЭЦ-нагреве плотность плазмы слабо изменяется в диапазоне $\overline{n} = (1.2-1.5) \times 10^{19}$ м⁻³. Здесь включаются две группы гиротронов: один гиротрон – центральный (0.5 MBt) и 2 гиротрона – нецентральные, с вкладом мощности вокруг точки $\rho = a/2$ и с суммарной мощностью 1.7 MBt.

На рис. За показаны результаты использования двух моделей, *S* и *M*, для анализа рассматриваемого импульса. Близкий к эксперименту результат дает модель *M* с отклонением $d2T_e = 7\%$. Стандартная модель *S* дает сильно завышенный результат для температуры электронов.

Теперь рассмотрим третью транспортную модель S_{FEC} для моделирования того же импульса № 73197 (рис. 3б). Возьмем Стандартную модель, но с двумя различными профилями поглощенной мощности Q_{ab} . Первый профиль — это тот, который изображен на рис. 3а. Для него температура электронов, приведенная на рис. 3б и отмеченная буквой *S*, совпадает с температурой электронов на рис. 3а, отмеченной той же буквой.

Во втором случае будем считать поглощение многопроходным и примем для него плоский профиль P_{EC} (рис. 36). Рассмотрим для Стандартной модели обратную задачу, описанную во Введении. Проведенные расчеты показали, что оптимальное значение η равно 0.21 ($Q_{ab} = 0.47$ MBT), а оптимальный профиль температуры T_e также нарисован на рис. 36. Он близок к экспериментальному профилю с отклонением $d2T_e = 11\%$.

Таким образом, проведенный эксперимент для импульса № 73197 можно интерпретировать двояко. Либо изменились характеристики удержания энергии в плазме по сравнению с теми, которые описывались Стандартной моделью переноса энергии, и следует пользоваться Модифицированной моделью переноса (рис. 3а). Либо вложенная энергия поглощается лишь при многопроходном затухании, и тогда низкая электронная температура определяется плоским профилем поглощенной мощности и малой эффективностью нагрева (рис. 3б).



Рис. 2. а) – Эволюция параметров плазмы для импульса № 45750. Через $T_e(0)$ обозначена центральная температура электронов, через n(0) – центральная плотность плазмы, через \overline{n} – средняя (хордовая) плотность плазмы, нормированная на 40 см; 6) – Экспериментальный профиль вложенной мощности P_{EC} и профили электронной температуры T_e , рассчитанные по Стандартной (*S*) и Модифицированной (*M*) моделям для импульса № 45750 при $\Delta t = 20$ мс, малой плотности $\overline{n} = 2.03$ и введенной мощности нагрева $Q_{EC} = 1.9$ МВт. Серый кружок соответствует экспериментальной центральной температуре электронов $T_e^{exp} = 9.5$ кэВ; в) – профили эффективного коэффициента теплопроводности χ_e при расчете по Стандартной (*S*) и Модифицированной (*M*) моделям; г) – экспериментальные профили электронной температуры T_e^{exp} и введенной мощности P_{EC} (штриховые линии), а также профили электронной температуры T_e (сплошные линии), рассчитанные по Стандартной (*S*) и Модифицированной (*M*) моделям для импульса № 45750 при $\Delta t = 60$ мс ($\overline{n} = 2.53 \times 10^{19}$ м⁻³, $Q_{EC} = 1.9$ МВт.).

4.2. Импульс № 66022 с большой плотностью <u>n</u> = 4.1 × 10¹⁹ м⁻³

Нагрев плазмы в этом случае производится двумя гиротронами с центральным вкладом мощности, составляющей в сумме $Q_{EC} = 1.1$ МВт. Рис. 4а представляет две модели, каждая из которых дает разумный результат для электронной температуры, близкий к эксперименту.

В первом случае в качестве модели переноса выбрана модель S_{FEC} в предположении многопроходного поглощения луча гиротронов и плоского вклада СВЧ-мощности P_{EC} . При поиске оптимального профиля температуры электронов расчеты показывают, что поглощается вся мощ-

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ том 46 № 5 2020

ность: $Q_{ab} = Q_{EC}$ ($\eta = 1$). Профиль вклада мощности и оптимальный профиль температуры отмечены на рис. 4а символом S_{FEC} . Во втором случае в качестве модели переноса выбрана модель M, а профиль вклада СВЧ-мощности пикирован в центре. На рис. 4а для этого случая расчетная температура электронов T_e и выбранный профиль вклада мощности P_{EC} отмечены буквами M.

Поведение эффективных коэффициентов теплопроводности для двух выбранных моделей показано на рис. 46. Видно, что в центральной области плазмы коэффициенты теплопроводности различаются почти в 10 раз. Из рис. 4а видно, что ДНЕСТРОВСКИЙ и др.



Рис. 3. Вторая гармоника. Импульс № 73197 при малой плотности $\bar{n} = 1.17 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ и вложенной мощности $Q_{EC} = 2.2 \text{ MBT. a}) - Экспериментальный профиль электронной температуры <math>T_e^{\exp}$ (толстая штриховая линия). Профили электронной температуры T_e , рассчитанные по Стандартной (*S*) и Модифицированной (*M*) моделям (сплошные линии). Профили поглощенной мощности P_{EC} для двух групп гиротронов: центральной (0.5 MBT) и нецентральной (1.7 MBT), тонкие штриховые линии; б) – профили электронной температуры T_e , рассчитанные по Стандартной мощности P_{EC} для двух групп гиротронов: центральной (0.5 MBT) и нецентральной (1.7 MBT), тонкие штриховые линии; б) – профили электронной температуры T_e , рассчитанные по Стандартной модели и при пикированном (*S*) и плоском (S_{FEC}) профиле поглощенной мощности P_{EC} . В модели S_{FEC} полная поглощенная мощность оказалась равной $Q_{ab} = 0.47$ MBT, а эффективность нагрева $\eta = 0.21$.



Рис. 4. Импульс № 66022. а) — Модель S_{FEC} с плоским профилем вложенной мощности P_{EC} и модель M с пикированным профилем P_{EC} . Профили электронной температуры T_e , подсчитанные по обеим моделям, близки к экспериментальному; б) — профили эффективных коэффициентов теплопроводности χ_e для обеих моделей.

модель S_{FEC} дает несколько более плоский профиль температуры электронов в центре плазмы, чем экспериментальный профиль. По-видимому, выбор плоского профиля для вложенной мощности P_{EC} слишком груб.

Для уточнения модели расширим класс допустимых функций и будем считать, что часть вложенной мощности поглощается в окрестности центра плазмы, например, при первом проходе через плазму. На рис. 5а приведены результаты расчетов при таком предположении. Принято, что 1 МВт СВЧ мощности вкладывается с плоским профилем, а мощность 0.1 МВт вкладывается пикировано, в центре шнура. Через P_{EC1} и P_{EC2} обозначены плоский и слабо пикированный полные профили вклада мощности, для которых Q_{EC} одинаковы и равны 1.1 МВт. Из рисунка видно, что перераспределения 10% вложенной мощности достаточно, чтобы результат по температуре электронов стал лучше соответствовать эксперименту. На рис. 56 показаны эффективные коэффициенты теплопроводности для рассматриваемого случая. Видно, что они мало изменяются





Рис. 5. Импульс № 66022. а) — Расчеты по модели S_{FEC} с двумя близкими профилями вложенной мощности P_{EC1} и P_{EC2} . Соответствующие расчетные профили электронной температуры T_{e1} и T_{e2} (штрихпунктирная и сплошная линии) и экспериментальный профиль T_e^{exp} . Перераспределение 10% мощности заметно улучшает аппроксимацию эксперимента: ошибка $d2T_e$ (P_{EC1}) = 7.4%, $d2T_e$ (P_{EC2}) = 5.3%; б) — эффективные коэффициенты теплопроводности χ_e для двух разных профилей вложенной мощности P_{EC1} и P_{EC2} .

при переходе от плоского к слабо пикированному распределению $P_{EC}(\rho)$.

4.3. Импульсы с вложенной мощностью $Q_{EC}=0.75~MBm$

Рассмотрим в этом разделе моделирование импульсов с умеренной и большой плотностью от $\overline{n} = 1.7$ до $\overline{n} = 3.7 \times 10^{19}$ м⁻³.

На рис. 6 показаны результаты моделирования импульса № 71155 с параметрами $B_T = 2.49$ Тл, I = 0.22 МА, в момент, когда плотность плазмы равна $\bar{n} = 1.72$ (в 10¹⁹ м⁻³). Использовалось две



Рис. 6. Анализ импульса № 71155 (B = 2.49 Тл, I = 0.22 МА, $\bar{n} = 1.72 \times 10^{19}$ м⁻³) по моделям S_{FEC} и M. Расчеты по модели S_{FEC} дают: $Q_{ab} = 0.34$ МВт, $\eta = 0.45$, $d2T_e = 13\%$; по модели M: $Q_{ab} = Q_{EC}$, $\eta = 1$, $d2T_e = 21\%$.

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ том 46 № 5 2020

модели: S_{FEC} и *M*. В модели S_{FEC} произведен поиск оптимального профиля температуры, по возможности ближайшего к эксперименту. Поглощенная мощность при этом составила 0.34 МВт, а коэффициент эффективности нагрева $\eta = 0.45$. В модели *M* величина $\eta = 1$. Для отклонения расчетной температуры от экспериментальной температуры электронов имеем $d2T_e(S_{FEC}) = 13\%$, $d2T_e(M) = 21\%$.

На следующем рис. 7 представлены результаты моделирования импульса № 71157, близкого по параметрам к предыдущему, но со слегка большей плотностью $\bar{n} = 2.14$ при $B_T = 2.44$ Тл и



Рис. 7. Анализ импульса № 71157 (B = 2.44 Тл, I = 0.22 МА, $\overline{n} = 2.14 \times 10^{19}$ м⁻³) по моделям S_{FEC} и M. По модели S_{FEC} : $Q_{ab} = 0.47$ МВт, $\eta = 0.63$, $d2T_e = 8\%$; по модели M: $Q_{ab}=Q_{EC}$, $\eta = 1$, $d2T_e = 18\%$.



Рис. 8. а) – Анализ импульса № 71709 (B = 2.4 Тл, I = 0.22 МА, $\overline{n} = 3.7 \times 10^{19}$ м⁻³, $Q_{EC} = 0.75$ МВт) по моделям S_{FEC} и *М*. По модели S_{FEC} : $Q_{ab} = 0.75$ МВт, $\eta = 1$, $d2T_e = 7\%$; по модели *M*: $Q_{ab} = Q_{EC}$, $\eta = 1$, $d2T_e = 17\%$; б) – профили плотности на омической (OH) и ЭЦРН стадиях разряда.

I = 0.22 МА. Используются те же две модели, что и на рис. 6: S_{FEC} и *M*. Поглощенная мощность Q_{ab} здесь составляет 0.47 МВт, $\eta = 0.63$, $d2T_e(S_{FEC}) =$ = 8%, $d2T_e(M) = 18\%$.

Рисунок 8а представляет результаты моделирования импульса № 71709 с плотностью $\bar{n} = 3.7$ и с теми же остальными параметрами, что и в импульсе № 71157. Здесь также использованы модели S_{FEC} и M. В результате моделирования имеем: $Q_{ab}(S_{FEC}) = Q_{EC}$, $\eta = 1$, $d2T_e(S_{FEC}) = 7\%$, $d2T_e(M) = 17\%$. На рис. 86 показаны профили плотности для омической и ЭЦР-стадий импульса № 71709. Видно, что после включения ЭЦР средняя плотность уменьшается (известный эффект откачки плотности), но профиль плотности остается монотонным.

4.4. Импульсы с вложенной мощностью $Q_{EC} = 0.915 \ MBm$

Рассмотрим в этом разделе моделирование импульсов с умеренной и большой плотностью от $\overline{n} = 1.7$ до $\overline{n} = 4.7 \times 10^{19}$ м⁻³. На рис. 9 показаны результаты моделирования импульса № 33957 с параметрами $B_T = 2.5$ Тл, I = 0.22 МА, в момент, когда плотность плазмы равна $\overline{n} = 1.7 \times 10^{19}$ м⁻³. Использовались две модели. Первая — это модель S_{FEC} с расширенным классом допустимых функций, содержащим сумму плоской P_{FEC} и пикированной P_{FECp} функции. В модели S_{FEC} был проведен поиск оптимального профиля температуры. Здесь поиск (в классе допустимых функций) производился по двум параметрам: η и отношению $\xi = Q_{peak}/Q_{flat}$, где Q_{peak} и Q_{flat} — мощности, соответствующие пикированной и плоской части профиля поглощенной мощности. Расчеты показали, что полная поглощенная мощность $Q_{ab} = Q_{peak} + Q_{flat}$ составила 0.48 MBт, коэффициент эффективности нагрева $\eta = 0.53$, а отношение $\xi = 0.05/0.43 \approx 0.1$. Для отклонения расчетной (оптимальной) температуры от экспериментальной температуры электронов имеем $d2T_e(S_{FEC}) = = 7.3\%$.

Вторая модель — это модель M с пикированным профилем вложенной мощности. В этой модели $\eta = 1, d2T_e(M) = 16\%$.

На рис. 10 показаны результаты расчетов по двум моделям для импульса № 33965 с большой



Рис. 9. Расчет оптимального профиля T_e в импульсе № 33957 с умеренной плотностью $\overline{n} = 1.7 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$. В модели S_{FEC} использована сумма плоского P_{flat} и пикированного P_{peak} профиля P_{EC} , в модели M – пикированный профиль P_{EC} . Толстая штриховая линия – экспериментальный профиль температуры T_e^{exp} .



Рис. 10. Расчет оптимального профиля T_e в импульсе № 33965 с большой плотностью $\overline{n} = 4.7 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$. Через P_{ECM} и P_{FEC} обозначены профили поглощенной мощности при использовании *M* и S_{FEC} моделей.

плотностью $\overline{n} = 4.7$ при тех же значениях магнитного поля и тока, что и для импульса № 33957. Для модели S_{FEC} поиск оптимального решения производился в том же классе функций, что и для импульса № 33957. Однако, как мы видели на примере анализа импульса № 71709, при достаточно большой плотности плазмы поглощается вся вложенная мощность ($\eta = 1$), поэтому свободным остается лишь один параметр ξ . Расчеты показали, что и для импульса № 33965 оптимальное решение соответствует значению $\xi \approx 0.1$, что соответствует значениям $Q_{peak} \approx 0.09$ МВт и $Q_{flat} \approx$ ≈ 0.82 МВт. Напомним, что вложенная мощность равна $Q_{EC} = 0.915$ МВт.

4.5. Импульс с малым током I = 0.15 МА

Рассмотрим импульс № 72304 с током I = 0.15 MA, относительно большим значением $q_a = 5.16$, небольшой плотностью $\overline{n} = 2.25$ и мощностью нагрева $Q_{EC} = 0.85$ MBт. На рис. 11 показаны результаты расчетов по двум моделям S_{FEC} и M для этого импульса. Для модели S_{FEC} в качестве класса допустимых функций мы используем функции, однородные по сечению плазмы. В результате моделирования имеем: $Q_{ab}(S_{FEC}) = 0.65$ MBT, $\eta = 0.76$, $d2T_e(S_{FEC}) = 20\%$, $d2T_e(M) = 12\%$.

5. ОБСУЖДЕНИЕ

5.1. Зависимость эффективности нагрева и оптической толщины от плотности плазмы

Проведенные расчеты позволяют оценить зависимость эффективности поглощения СВЧволн от плотности плазмы. На рис. 12а представ-

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ том 46 № 5 2020



Рис. 11. Анализ импульса № 72304 с малым током I = 0.15 МА, небольшой плотностью $\overline{n} = 2.25 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ и мощностью нагрева $Q_{EC} = 0.85$ МВт. Через P_{EC} обозначены профили поглощенной мощности при использовании M и S_{FEC} моделей.

лены значения коэффициента η в зависимости от средней плотности плазмы. Видно, что при нагреве на первой гармонике поглощается вся введенная мощность и $\eta = 1$. Для нагрева на второй гармонике с ростом плотности величина η постепенно возрастает и достигает значений порядка

единицы при плотности $\overline{n} \approx 3 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

Рисунок 12а построен на основе решения обратной задачи для Стандартной транспортной модели. Возможен и другой подход к задаче о поглощении мощности. Анализ уравнений для поглошения и излучения электромагнитных волн показывает, что поглощенная мощность зависит от оптической толщины плазмы, которая пропорциональна произведению плотности плазмы на температуру электронов (электронному давлению), $p_e \sim \sim nT_e$, имеющему размерность 10^{19} м^{-3} кэВ (формула (2.89) в [7] и формула (V) в [8]). На рис. 126 для рассмотренных импульсов показаны экспериментальные значения этого произведения в центре плазменного шнура, $p_{e0} = n_0 T_{e0}$, в зависимости (как и на рис. 12а) от средней плотности плазмы *n*. Красными кружками отмечены импульсы с нагревом на первой гармонике, синими квадратами – на второй. Горизонтальная прямая при $p_{e0} = n_0 T_{e0} = 10$ разделяет импульсы с нагревом на второй гармонике на две группы. Сравнивая рис. 126 с рис. 12а, мы видим, что те импульсы, которые лежат выше этой прямой, поглощают всю вводимую в плазму мощность, для них $\eta = 1$. Импульсы, лежащие ниже прямой, поглощают лишь часть мощности, для них $\eta < 1$. Остальная часть мощности поглощается стенкой. Рисунок 12а показывает абсолютные значения поглощенной мощности при известной величине



Рис. 12. а) – Эффективность СВЧ-нагрева $\eta = Q_{ab}/Q_{EC}$ в зависимости от средней плотности плазмы на первой (кружки) и второй (квадраты) гармониках. Здесь Q_{ab} – поглощенная мощность, Q_{EC} – введенная ЭЦ-мощность. Цифрами обозначены номера импульсов и величины Q_{EC} ; б) – зависимость оптической толщины, пропорциональной произведению $n_0 T_{e0}$ (электронному давлению), от средней плотности плазмы \overline{n} для импульсов с нагревом на первой (пустые кружки) и на второй гармонике (квадраты). Горизонтальная линия $n_0 T_{e0} = 10$ разделяет импульсы с полным (выше) и неполным (ниже) поглощением введенной мощности. Здесь n_0 и T_{e0} – экспериментальные значения центральной плотности и температуры. Цифрами обозначены номера импульсов и введенная мощность.

введенной мощности. Рисунок 126 не дает таких значений, он получен на основе совсем других соображений. Но разделение импульсов с нагревом на второй гармонике на две совпадающие группы подтверждает разумность анализа поглощения волн с помощью транспортных моделей. Импульсы с нагревом на первой гармонике лежат выше прямой $n_0 T_{e0} = 10$. В этих импульсах поглощается вся вводимая мощность.

Рисунки 12а и 12б позволяют сделать следующее заключение. При плотности плазмы $\overline{n} < 3 \times$ $\times 10^{19} \, {
m m}^{-3}$ нагрев на первой гармонике радикально отличается от нагрева на второй гармонике. При малых плотностях $\bar{n} < 2 \times 10^{19}$ м⁻³, при нагреве на первой гармонике значения p_{e0} и T_{e0} в 3-4 раза превышают значения, полученные при нагреве на второй гармонике. Граница отсечки обыкновенной волны при поле $B_T = 2.5$ Тл определяется локальным условием $n_{a}\rho < 6 \times 10^{19}$ м⁻³. Это значит, что при плотностях $\overline{n} > 4 \times 10^{19}$ м⁻³ для первой гармоники наступает отсечка, и нагрев на первой гармонике становится невозможным. В узкой промежуточной области, когда $3 \times 10^{19} \, {
m m}^{-3} <$ \overline{n} < < 4 × 10¹⁹ м⁻³, результаты экспериментов с нагревом на первой и второй гармониках могут оказаться близкими. Такую близость можно усмотреть на рис. 126 между импульсами №№ 45439 и 71709, у которых средние плотности различаются на 30%, мощности – на 20%, а параметры *p*_{e0} – всего на 10%.

Для оценки оптической толщины плазмы Г в случае поперечного распространения обыкновенной волны на первой гармонике за исходные данные мы принимаем результаты работ [7, 8] и [10]. Следуя [7, 8], получаем

$$\Gamma = |\Delta r| (\operatorname{Im}(N_{\perp})(\omega/c) = 0.65.$$
(7)

Здесь $|\Delta r| = 18$ см — ширина зоны поглощения, определяемая из условия — $6R_0/\mu < \Delta r < 0$,

Im
$$N_{\perp} = -i \frac{\omega_0^2}{4\omega_B^2} \frac{8\sqrt{\pi |\mu\delta|^{3/2}}}{15} e^{-|\mu\delta|}, \omega$$
 – частота волны,
 $\delta = 1 - n \frac{\omega_B}{\omega} = \frac{\Delta r}{R}, n$ – номер гармоники. Согласно

[10],

Γ

$$\Gamma = \frac{\pi}{4} \gamma (1 - \gamma)^{1/2} \frac{\omega}{c} \frac{R_0}{\mu} = 0.48.$$
 (8)

Здесь
$$\gamma = \left(\frac{\omega_0}{\omega_B}\right)^2$$
, $\omega_0^2 = \frac{4\pi n_e e^2}{m_e}$, $\omega_B = \frac{eB}{m_e c}$, $\mu = \frac{m_e c^2}{T}$

Видно, что, несмотря на различные подходы к расчетам оптической толщины, результаты (7) и (8) различаются лишь на 30%. Коэффициент поглощения энергии ЭЦР-волны за один проход, η_E , при условии (7), равен $\eta_E = 1 - \exp(-2\Gamma) = 0.73$. Таким образом, на первой гармонике за один проход поглощается заметная доля энергии волны.

Оценка оптической толщины для второй гармоники необыкновенной волны в работах [7] и [10] обратно пропорциональна плотности плазмы. Это противоречит выводу нашей статьи об

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ том 46 № 5 2020

увеличении поглощения волн при увеличении плотности плазмы (см. рис. 12а). Наша статья, по существу, содержит только обработку эксперимента. Она не содержит обсуждения диэлектрических свойств плазмы. Поэтому это противоречие есть противоречие между теорией и экспериментом.

5.2. Альтернатива

Сначала подведем итоги расчетов. В табл. 1 собраны основные параметры рассмотренных импульсов. Видно, что импульсы с нагревом на первой гармонике имеют почти постоянные значения тока $I \sim 0.2$ МА и параметра $q_a \sim 5.2$. Для импульсов с нагревом на второй гармонике эти параметры также почти постоянны, за исключением последнего импульса № 72304, в котором имеется небольшой ток $I \sim 0.15$ МА и относительно высокое значение $q_a \sim 5.16$. Такой выбор импульсов определен относительно надежными измерениями профилей плотности и температуры в этом диапазоне параметров.

Результаты расчетов, описанных в предыдущих разделах, собраны в табл. 2. Для облегчения чтения статьи мы сначала подробно опишем обозначения табл. 2, повторяя некоторые сделанные выше определения. Здесь через S обозначена Стандартная модель канонических профилей, через S_{FEC} – Стандартная модель с плоским или почти плоским профилем вложенной мощности СВЧнагрева, через М – Модифицированная модель канонических профилей, через T_{e0} и T_{ex0} – центральные расчетные и экспериментальные значения температуры электронов, через $d2T_e$ – квадратичное (RMS) отклонение расчетной температуры электронов от экспериментальной температуры (6). Использованные в расчетах профили вложенной мощности Р_{ЕС} имеют следующие краткие обозначения: mix – смешанный (центральный + нецентральный) нагрев, Flat – плоский профиль поглощенной мощности, On – центральный (onaxis) нагрев, Flat + On – плоский профиль с добавлением пикированного профиля малой мощности. Через η обозначено отношение поглощенной и вложенной мощности $\eta = Q_{ab}/Q_{EC}$.

Возможность нагрева на первой гармонике сильно ограничена по величине плотности плазмы. Этот факт служил основным аргументом для перехода от нагрева на первой гармонике к нагреву на второй гармонике. Однако при плотностях порядка $\bar{n} \sim (2-2.5) \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ в импульсах с нагревом на первой гармонике температура электронов значительно выше ($T_{e0} \sim (6-9)$ кэВ), чем в импульсах с нагревом на второй гармонике ($T_{e0} \sim (2-3)$ кэВ). Из табл. 2 видно, что Стандартная модель *S* всегда правильно описывает эксперименты с

Таблица 1. Основные параметры импульсов

№ имп.	<i>a</i> , m	<i>I</i> , MA	<i>В_Т</i> , Тл	\overline{n} , 10^{19} m ⁻³	q_{a}	<i>Q_{ЕС}</i> , МВт						
Первая гармоника												
45439	0.32	0.2	2.8	2.8	5.1	0.63						
45750a	0.32	0.2	2.8	2.03	5.2	1.9						
45750b	0.32	0.2	2.8	2.53	5.2	1.9						
Вторая гармоника												
33957	0.3	0.2	2.5	1.7	3.9	0.915						
33965	0.3	0.21	2.5	4.7	3.25	0.914						
66022	0.3	0.2	2.4	4.1	3.8	1.1						
71155	0.3	0.22	2.49	1.72	3.5	0.75						
71157	0.3	0.22	2.44	2.14	3.45	0.75						
71709	0.3	0.22	2.44	3.7	3.4	0.75						
72304	0.3	0.15	2.45	2.25	5.16	0.85						
73197	0.3	0.23	2.2	1.17	3.0	2.2						

нагревом на первой гармонике, а Модифицированная модель M — эксперименты с нагревом на второй гармонике. Важно, что модель S_{FEC} также описывает эксперименты с нагревом на второй гармонике. В результате мы приходим к следующим выводам.

(а) В импульсах с нагревом на первой гармонике и пикированном вводе вложенной мощности Стандартная модель дает по температуре электронов результаты, близкие к эксперименту. Для этих же импульсов с пикированным вводом вложенной мощности Модифицированная модель дает температуру электронов, заметно меньшую экспериментальной температуры (в приведенных примерах до трех раз).

(б) В импульсах с нагревом на второй гармонике и пикированном вводе вложенной мощности Стандартная модель дает температуру электронов, значительно превышающую экспериментальную температуру. Для этих же импульсов при пикированном вводе мощности Модифицированная модель разумно описывает эксперимент. Для этих же импульсов Стандартная модель дает результаты, близкие к эксперименту, при более или менее плоском распределении вложенной мощности и возможно пониженном коэффициенте эффективности нагрева η . Коэффициент эффективности возрастает при увеличении плотности плазмы и при плотности, большей 2.5 × × 10¹⁹ м⁻³, становится близким к единице.

Таким образом, для интерпретации полученных результатов появляется альтернатива.

ДНЕСТРОВСКИЙ и др.

№ имп.	Q_{EC} , MBT	Q_{ab}, MBT	P_{EC} , MBT · m ⁻³	Model	η	d2Te, %	<i>T_{e0}</i> , кэВ	<i>T_{ex0}, кэВ</i>	T_{e0}/T_{ex0}			
Первая гармоника												
45439	0.63	0.63	On	S	1	11	3.15	3.3	0.95			
			On	M	1	42	1.97	3.3	0.6			
45750	1.9	1.9	On	S	1	—	9	9.5	0.95			
	1.9	1.9	On	S	1	11	6.12	5.8	1.05			
			On	М	1	55	2.7	5.8	0.47			
Вторая гармоника												
33957	0.91	0.48	Flat + On	S_{FEC}	0.53	7.3	3.4	3.7	0.92			
	0.91	0.91	On	М	1	16	3.6	3.7	0.96			
33965	0.91	0.91	Flat	S_{FEC}	1	7	1.9	2.0	0.95			
	0.91	0.91	On	M	1	15	2.1	2.0	1.05			
66022	1.1	1.1	Flat	S_{FEC}	1	7.4	1.76	2.08	0.85			
			Flat + On	S_{FEC}	1	5	1.98	2.08	0.95			
			On	М	1	7	2.2	2.08	1.05			
71155	0.75	0.34	Flat	S_{FEC}	0.45	13	2.57	2.3	1.12			
	0.75	0.75	On	М	1	21	2.6	2.3	1.13			
71157	0.75	0.47	Flat	S_{FEC}	0.63	8	2.34	2.11	1.11			
	0.75	0.75	On	М	1	18	2.37	2.11	1.12			
71709	0.75	0.75	Flat	S_{FEC}	1	7	1.83	1.9	0.96			
	0.75	0.75	On	М	1	17	2.05	1.9	1.08			
72304	0.85	0.65	Flat	S_{FEC}	0.76	20	2.26	2.36	0.95			
	0.85	0.85	On	М	1	12	2.17	2.36	0.92			
73197	2.2	2.2	Mix	S	1	150	8.6	3.4	2.5			
			Mix	М	1	7	3.0	3.4	0.88			
		0.47	Flat	S_{FEC}	0.21	11	3.5	3.4	1.03			

Таблица 2. Сравнение эксперимента и моделирования нагрева на первой и второй гармонике

Либо при переходе от нагрева на первой гармонике к нагреву на второй гармонике профиль поглощенной мощности остается неизменным, а плазма изменяет свои свойства переноса энергии. И тогда возникает вопрос о причинах такого изменения свойств плазмы. В этом случае для описания нагрева на первой гармонике надо пользоваться Стандартной моделью, а на второй гармонике — Модифицированной моделью.

Либо свойства плазмы по переносу энергии остаются неизменными, а наши представления о пикированном профиле поглощенной мощности на второй гармонике ошибочны, и в реальности этот профиль размазан по всему (или по части) сечения плазмы. Эта возможность заведомо реализуется, если поглощение СВЧ-волн не однопроходное. Авторы придерживаются второй возможности.

Почему в этом случае Модифицированная модель все-таки является предиктивной при нагреве на второй гармонике? Потому, что в ней трудности, связанные с профилем поглощенной мощности, учтены неявно, через увеличение коэффициентов переноса и изменение формы канонических профилей.

Как поступать в эксперименте для повышения эффективности нагрева на второй гармонике? Ответ на этот вопрос дают эксперименты на установке DIII-D [9] и рис. 126. Помимо CBЧ-нагрева, нужно иметь другой способ нагрева электронов плазмы, например, с помощью пучка горячих нейтралов. При повышении температуры электронов оптическая толщина плазмы по отношению к CBЧ-волнам увеличивается, и параметр η возрастает. В новых экспериментах на DIII-D так и поступили [11].

6. ЗАМЕЧАНИЕ

Посмотрим внимательнее на постановку задач для транспортных моделей, использованных для анализа СВЧ-нагрева импульсов. Для моделей типа S и M ставится прямая задача: задана модель, профиль плотности и источник (профиль вложенной мощности P_{EC}), требуется найти профиль электронной температуры и сравнить его с экспериментальным профилем температуры.

Для модели, обозначенной через S_{FEC} , ситуация другая. Здесь ставится обратная задача, в которой заданы модель (типа S), полная вложенная мощность Q_{EC}, экспериментальные профили плотности и температуры электронов в какой-то момент времени, когда плазма близка к стационару, а требуется определить профиль вложенной СВЧ-мощности P_{EC}. Такая задача, вообще говоря, некорректна. Для того чтобы сделать задачу корректной, нужно определить достаточно небольшой класс функций, в котором следует искать решение. (Решение, определенное в этом классе, обычно называют "квазирешением"). В выборе класса ответ обычно подсказывается "физической интуицией". В нашем случае мы "угадываем", что многопроходное поглощение СВЧволн приводит к профилям, близким к однородным по пространству. Выбирая в качестве исходного однородный профиль, мы приходим к однопараметрическому классу функций, в котором амплитуда профиля (параметр **η**) является свободным параметром. Таким образом, обратная задача сводится к вариационной, где функционалом, который надо минимизировать, является функционал квадратичного отклонения d2T_e pacчетного профиля температуры от заданного экспериментального профиля.

Однако рис. 12а показывает, что при нагреве на второй гармонике такой алгоритм решения обратной задачи реализуется лишь при небольшой плотности плазмы. При плотности, большей, чем $\overline{n} \sim 3 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$, поглощается вся мощность, и параметр n перестает быть своболным и становится равным 1. Такой пример продемонстрирован при анализе импульса № 66022. В этом случае мы расширяем класс допустимых функций, представляя его в виде суммы однородной и пикированной функции, описывающей профиль поглощенной мощности, сохраняя полную вложенную мощность Q_{EC} . В этом классе и найдено квазирешение T_{e2} , изображенное на рис. 5, для которого $Q_{EC1} = 0.1$ MBT, а $Q_{EC2} = 1$ MBT. Малое значение $d2T_{e}$, равное 5%, подтверждает, что найденное квазирешение разумно аппроксимирует эксперимент. Подобное расширение класса допустимых функций было проведено и для импульсов №№ 33957 и 33965.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью двух транспортных моделей канонических профилей проведен анализ увеличения температуры электронов при нагреве на первой и второй гармониках электронно-циклотронной частоты. В эксперименте (при близких параметрах плазмы и мошности СВЧ-нагрева) температура электронов при нагреве на первой гармонике заметно выше температуры при нагреве на второй гармонике. Проведенный анализ показал, что главной причиной такого противоречия является широкий (почти не пикированный) профиль поглощенной мощности, вызванный в основном неоднопроходным поглощением СВЧ-волн на второй гармонике. При небольшой плотности плазмы результаты нагрева на второй гармонике дополнительно ухудшаются неполным поглощением введенной СВЧ-мощности. Эти результаты могут быть улучшены при дополнительном нагреве электронов плазмы, например, с помощью пучков горячих нейтралов.

Авторы благодарят Н.А. Кирневу, А.Я. Кислова и И.С. Пименова за обсуждение результатов, а также рецензента за ценные замечания.

Эксперименты на T-10 поддержаны Росатомом. Моделирование переноса поддержано РНФ, проект 19-12-00312. Решение обратных задач поддержано грантом РФФИ 20-07-00391.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Dnestrovskij Yu.N., Connor J.W., Cherkasov S.V., Danilov A.V., Dnestrovskij A.Yu., Lysenko S.E., Roach C.M., Walsh M. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2007. V. 49. P. 1477.
- 2. *Dnestrovskij Yu.N.* Self Organization of Hot Plasmas. Springer International Publishing, Switzerland, 2015.
- Аликаев В.В., Багдасаров А.А., Васин Н.Л., 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.
- Alikaev V., Bagdasarov A., Berezovskii E., Berlizov A., Borshchagovskii A., Vasin N., Vershkov V., Gorelov Yu., Grashin S., Dremin M., Esipchuk Yu., Efremov S., Notkin G., Nabatov A., Pimenov A., Popovichev S., Popov I., Poznyak V., Razumova K., Roy I., Rodichkin I., Stepanenko M., Strelkov V., Sokolov Yu., Sitar E., Solntsev A., Tarakanov A., Tarasan K., Titishov K., Trukhin V., Phlyagin V., Chankin A., Chistyakov V., Chicherov V., Shishkin B., Yaramyshev G., Zaveryaev V., Il'in V., Kis-lov A., Karzhavin Yu., Markelov V., Maximov Yu., Medvedev A. // Plasma Phys. Control. Fusion. 1987. V. 29. P. 1285.
- Днестровский Ю.Н., Вершков В.А., Данилов А.В., Днестровский А.Ю., Лысенко С.Е., Мельников А.В., Субботин Г.Ф., Сычугов Д.Ю., Черкасов С.В., Шелухин Д.А. // Физика плазмы. 2019. Т. 45. С. 226.

400

- Melnikov A.V., Krupnik L.I., Ascasibar E., Cappa A., Chmyga A.A., Deshko G.N., Drabinskij M.A., Eliseev L.G., Hidalgo C., Khabanov P.O., Khrebtov S.M., Kharchev N.K., Komarov A.D., Kozachek A.S., Lysenko S.E., Molinero A., de Pablos J.L., Ufimtsev M.V., Zenin V.N. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2018. V. 60. P. 084008.
- 7. *Голант В.Е., Федоров В.И.* Высокочастотные методы нагрева плазмы в тороидальных термоядерных установках. М.: Энергоатомиздат, 1986.
- 8. Днестровский Ю.Н., Костомаров Д.П., Скрыдлов Н.В. // ЖТФ. 1963. Т. 33. С. 922.
- Prater R., Austin M.E., Bernabei S., Burrell K.H., Callis R.W., Cary W.P., De Grassie J.S., Fuchs C., Green-field C.M., Gorelov Y., Harvey R.W., Hosea J.C., Isayama A., Jayakumar J., La Haye R.J., Lao L.L., Legg R.A., Lin-Liu Y.R., Lohr J., Luce T.C., Makowski M.A., Petty C.C., Pinsker R.I., Ponce D., Pronko S.G., Raftopoulos S., Strait E.J., Wong K.-L. // 18th IAEA Fusion Energy Conf., Sorrento, Italy, 2000. IAEA-CN-77/EX8/1.
- Звонков А.В., Тимофеев А.В. // Физика плазмы. 1980. Т. 6. С. 1219.
- Petty C.C. and the DIII-D Team // Nucl. Fusion. 2019. V. 59. P. 112002.