

УДК 621.039.647

## КАЛОРИМЕТР-ПРИЁМНИК ИНЖЕКТОРА БЫСТРЫХ АТОМОВ МЕГАВАТТНОГО ДИАПАЗОНА

*В.Х. Амиров<sup>1</sup>, Т.Д. Ахметов<sup>1,2</sup>, А.И. Горбовский<sup>1</sup>, П.П. Дейчули<sup>1</sup>, А.А. Иванов<sup>1</sup>,  
В.А. Капитонов<sup>1</sup>, И.В. Шиховцев<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>*Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия*

<sup>2</sup>*Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*

Калориметр-приёмник (КП) является одним из основных элементов пучкового тракта инжектора атомарного пучка с баллистической фокусировкой. В данной работе рассматривается водоохлаждаемый КП, разработанный для инжектора сфокусированного пучка быстрых атомов дейтерия, мощность пучка более 1 МВт и длительность импульса 2 с [1], установленного на токамаке TCV в Лозанне (Швейцария). В конструкции данного устройства применены приёмные пластины с установленными в них завихрителями потока жидкости для интенсификации теплообмена и коллекторы подачи и слива воды по принципу труба-в-трубе, обеспечивающие ввод движения в вакуум. Эти технические решения позволили достичь хорошей энергоэффективности устройства при сравнительно небольших габаритных размерах и массовом расходе теплоносителя. В статье представлена конструкция основных элементов калориметра, приведены результаты моделирования течения теплоносителя и теплообмена, а также некоторые экспериментальные данные.

**Ключевые слова:** инжекторы пучков быстрых атомов, калориметр, интенсификаторы теплообмена, закрученный поток, термомеханические деформации.

## CALORIMETER RECEIVER OF FAST ATOMS INJECTOR OF MEGAWATT RANGE

*V.Kh. Amirov<sup>1</sup>, T.D. Akhmetov<sup>1,2</sup>, A.I. Gorbovskiy<sup>1</sup>, P.P. Deychuli<sup>1</sup>, A.A. Ivanov<sup>1</sup>,  
V.A. Kapitonov<sup>1</sup>, I.V. Shikhovtsev<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>*Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS, Novosibirsk, Russia*

<sup>2</sup>*Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia*

The receiver calorimeter (RC) is one of the main elements of the beam path of the atom beam injector with ballistic focusing. In this paper, we consider a water-cooled RC developed for an injector for a focused beam of fast deuterium atoms with a beam power of more than 1 MW and a pulse duration of 2 s [1], installed at the TCV tokamak in Lausanne (Switzerland). In the design of this device, receiving plates are used with swirlers of the fluid flow installed in them to intensify heat transfer and collectors for supplying and draining water, according to the pipe-in-pipe principle, providing the introduction of motion into a vacuum. These technical solutions made it possible to achieve good energy efficiency of the device with relatively small overall dimensions and mass flow rate of the coolant. The article presents the design of the main elements of the calorimeter, presents the results of modeling the coolant flow and heat transfer, as well as some experimental data.

**Key words:** fast atom beam injectors, calorimeter, heat transfer intensifiers, swirling flow, thermomechanical deformations.

DOI: 10.21517/0202-3822-2021-44-4-80-91

### ВВЕДЕНИЕ

Инжекция мощных пучков быстрых атомов является одним из эффективных способов нагрева плазмы в термоядерных ловушках с магнитным удержанием и генерации тока в них. Инжектор пучка быстрых атомов состоит из следующих основных систем (не считая систем питания и управления):

— источник ионов, положительных или отрицательных, в зависимости от назначения инжектора и требуемой энергии частиц, обеспечивающий формирование ионного пучка, его фокусировку и ускорение до заданной энергии;

— нейтрализатор, предназначенный для преобразования ионов пучка в атомы;

— поворотный магнит, отделяющий пучок быстрых атомов от остаточных ионов;

— приёмник остаточных ионов;

— калориметр-приёмник нейтрального пучка, необходимый для поглощения энергии пучка в процессе подготовки к рабочему выстрелу в плазменную ловушку, для измерения мощности пучка и его пространственного профиля;

— система откачки, поддерживающая приемлемые вакуумные условия во время работы инжектора.

Калориметр-приёмник является крайним элементом в пучковом тракте перед входным портом плазменной установки. Он служит, на практике, для поглощения мощности пучка в процессе тренировки сеточного узла ионного источника, а также для измерения мощности пучка, его профиля и определе-

ния его пространственного положения относительно оси пучкового тракта. Таким образом, значительная часть выстрелов инжектора (тренировка высоковольтной прочности ИОС, настройка, тестирование) производится не в плазму установки, а в режиме автономной работы.

По способу размещения КП могут располагаться внутри вакуумного объёма инжектора или иметь собственную вакуумную камеру.

По способу перемещения в рабочее положение калориметры бывают раздвижными, поворотными (поворот вокруг фиксированной оси), погружными, неподвижными, которые при необходимости монтируются в пучковом тракте и затем по мере необходимости демонтируются.

Приёмная часть калориметра, как правило, выполнена в виде системы труб или пластин, внутри которых находятся каналы охлаждения. Для охлаждения приёмных элементов калориметра используется в большинстве конструкций вода, хотя возможно применение других жидкостей или газов.

С ростом мощностей инжекторов пучков быстрых атомов растут и требования к КП. С увеличением мощности инжекции возрастает самый важный параметр, который определяет конструкцию КП, — плотность мощности на пластинах КП, которая достигает величин десятков кВт/см<sup>2</sup>. Длительность импульса инжекции в больших исследовательских установках составляет несколько секунд и более, так что условия поглощения пучка калориметром обычно близки к стационарным. Все эти факторы ведут к значительному нагреву принимающих элементов, которые нужно интенсивно охлаждать. Важным является моделирование рабочих процессов КП, протекающих в ходе его эксплуатации. Это позволяет выявить негативные факторы и устранить их на стадии проектирования или смягчить их последствия. Необходимо смоделировать, а потом и организовать течение теплоносителя таким образом, чтобы избежать большого количества местных сопротивлений (резких скачков сечения, поворотов, закруток потока, зон обратного тока), что позволит избежать больших расходов теплоносителя и повышенных нагрузок на систему подачи. При этом важно обеспечить требуемый режим теплообмена между приёмным элементом и теплоносителем. Это позволит избежать местных перегревов и, как следствие, срывов теплосъёма и разрушения элементов приёмного устройства калориметра.

В рассматриваемом случае применяется водяное охлаждение приёмных пластин КП. Наиболее важным показателем режима работы КП является интенсивность теплообмена. Интенсивность теплообмена характеризуется коэффициентом теплоотдачи. Этот параметр является функцией нескольких переменных и сильно зависит от характера течения теплоносителя. Характер течения в реальных условиях нельзя рассматривать как автомодельный случай (задачу). Он сильно зависит от архитектуры водяной магистрали. Главной задачей является всемерное увеличение коэффициента теплоотдачи. Одним из способов увеличения коэффициента теплоотдачи является применение интенсификаторов теплообмена [2]. Интенсификаторы теплообмена позволяют повысить интенсивность теплообмена между стенкой канала и потоком теплоносителя путём воздействия на поток.

## ИНЖЕКТОР НЕЙТРАЛЬНОГО ПУЧКА ТОКАМАКА TCV

Для нагрева плазмы в токамаке TCV (Лозанна, Швейцария) в ИЯФ СО РАН разработан перезарядный инжектор сфокусированного пучка быстрых атомов дейтерия энергией 30 кэВ, мощностью 1 МВт и длительностью 2 с. В ионном источнике этого инжектора для формирования пучка используется многощелевая трёхэлектродная ионно-оптическая система с электродами сферической формы и эмиссионной поверхностью диаметром 250 мм. Фокусное расстояние ионно-оптической системы 4,1 м.

Общий вид перезарядного инжектора мощного сфокусированного пучка быстрых атомов дейтерия для нагрева плазмы в токамаке TCV показан на рис. 1. Ионный источник формирует сфо-

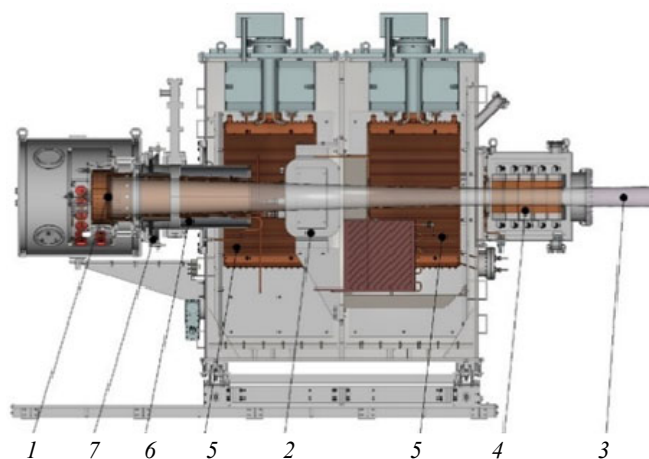


Рис. 1. Общий вид инжектора быстрых атомов: 1 — источник ионов (ВЧ-драйвер; ионно-оптическая система); 2 — поворотный магнит; 3 — пучок быстрых атомов; 4 — калориметр-приёмник; 5 — крионасосы; 6 — нейтрализатор; 7 — юстировочный узел

кусированный пучок ионов дейтерия с током до 45 А и энергией до 30 кэВ. Сформированный пучок ионов далее перезаряжается в атомы в газовой мишени нейтрализатора. Неперезарядившиеся ионы отклоняются магнитом и попадают в водоохлаждаемый приёмник. Откачка инжекторного бака производится четырьмя крионасосами. Для измерения мощности полученного пучка быстрых атомов на выходе инжекторного бака пристыкован раздвижной калориметр. Основные параметры инжектора:

Мощность пучка через порт токамака TCV, МВт . . .	1,00—1,05
Стабильность энергии пучка, % . . .	Лучше чем $\pm 5$
Номинальная энергия пучка, кэВ . . .	$30 \pm 5\%$
Пульсация энергии, % . . .	Меньше чем $\pm 5$
Основной атомный компонент . . .	Дейтерий
Дополнительный атомный компонент . . .	Водород
Длительность нейтрального пучка (без модуляции и развёртки мощности), с . . .	2
Полная фракционная энергия нейтрального пучка (мощность), % . . .	$\geq 65$
Тяжёлые примеси (мощность), % . . .	$< 0,5$ от основного компонента
Диапазон мощности пучка, % . . .	30—100 от номинальной
Диапазон энергии пучка, кэВ . . .	15—35

Для поглощения пучка с заданными параметрами необходим калориметр, который обеспечивает полное перекрытие пучка в нужной зоне и эффективное охлаждение приёмных элементов в процессе работы. Для определения основных параметров (распределение плотности мощности на пластинах калориметра, необходимый расход воды), а также предварительной конструктивной схемы устройства необходимо численно оценить ожидаемую плотность мощности на приёмных пластинах.

**Расчёты плотности мощности на пластинах КП.** Фокусные расстояния ионно-оптической системы инжектора и угловые расходимости поперёк и вдоль щелей сеток были определены экспериментально по результатам измерений ширины и высоты пучка на уровне  $1/e$  на двух расстояниях от ионно-оптической системы на пучковом стенде в ИЯФ [3]. Численные значения этих величин были затем подтверждены оптическими измерениями распределения температуры поверхности плоской вольфрамовой пластины в инжекционном тракте токамака TCV, нагреваемой

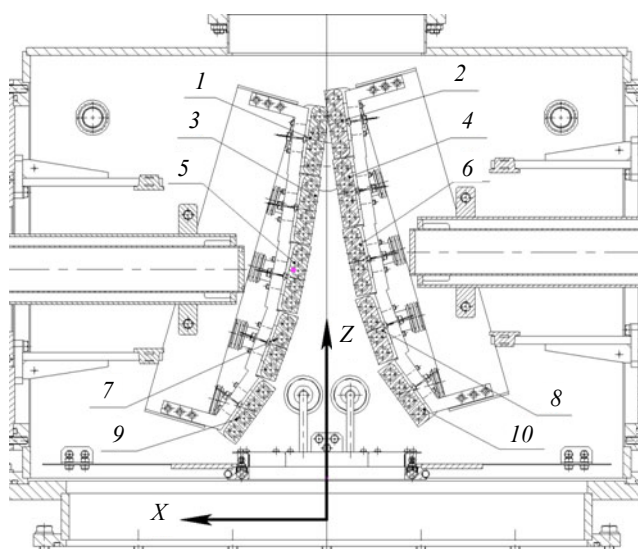


Рис. 2. Сечение калориметра в горизонтальной плоскости. Пластины калориметра расположены вертикально. В нижней части чертежа находится диафрагма калориметра. Нейтральный пучок распространяется вдоль оси  $z$ . Координатная плоскость  $x-z$  горизонтальна в системе токамака, ось  $y$  направлена вертикально вверх. Показаны номера пластин калориметра (1—10)

нейтральным пучком. После нейтрализации ионного пучка, ускоренного сеточной системой инжектора, мощность пучка атомов дейтерия составляет 1,30 МВт. Ионно-оптическая система состоит из круглых электродов диаметром 250 мм с многощелевыми отверстиями. Фокусное расстояние и угловая расходимость поперёк щелей (по горизонтали в системе токамака):  $F_x = 376$  см,  $\alpha_x = 24,4$  мрад, а вдоль щелей (по вертикали)  $F_y = 398$  см,  $\alpha_y = 10,3$  мрад.

Для тепловых расчётов калориметра необходимо определить плотность потока мощности пучка атомов по нормали к поверхности его приёмных пластин, показанных на рис. 2.

Плотность потока мощности пучка имеет максимум на оси и с удалением от неё спадает. С помощью кода [4] рассчитывалась мощность в  $P(x, y, z)$ , проходящая в данной точке через

единицу площади, перпендикулярную оси пучка. Распределение плотности мощности показано на рис. 3.

Максимальное значение плотности мощности непосредственно перед диафрагмой перед калориметром ( $z = 225,4$  см) на оси пучка  $P_{dia} = 11,56$  кВт/см<sup>2</sup>. Плотность мощности на пластине калориметра (задняя левая) в точке  $z = 225,4 + 44,0 = 269,4$  см,  $x = 0,3$  см,  $y = 0$ ,  $P_{cal} = 13,52$  кВт/см<sup>2</sup>. Плотность мощности по нормали к поверхности пластины,  $P_{normal} = P_{cal} \cdot \sin\theta = 13,52 \cdot 0,14 = 1,88$  кВт/см<sup>2</sup>. С учётом погрешности  $\pm 2\%$ , с которой известна начальная мощность нейтрального пучка, получаем оценку погрешности нормальной плотности мощности:  $P_{normal} = 1,88 \pm 0,04$  кВт/см<sup>2</sup>. Аналогичным способом были определены плотности мощности для расчётных точек, соответствующим местам расположения диафрагм. Данные расчётов приведены в табл. 1.

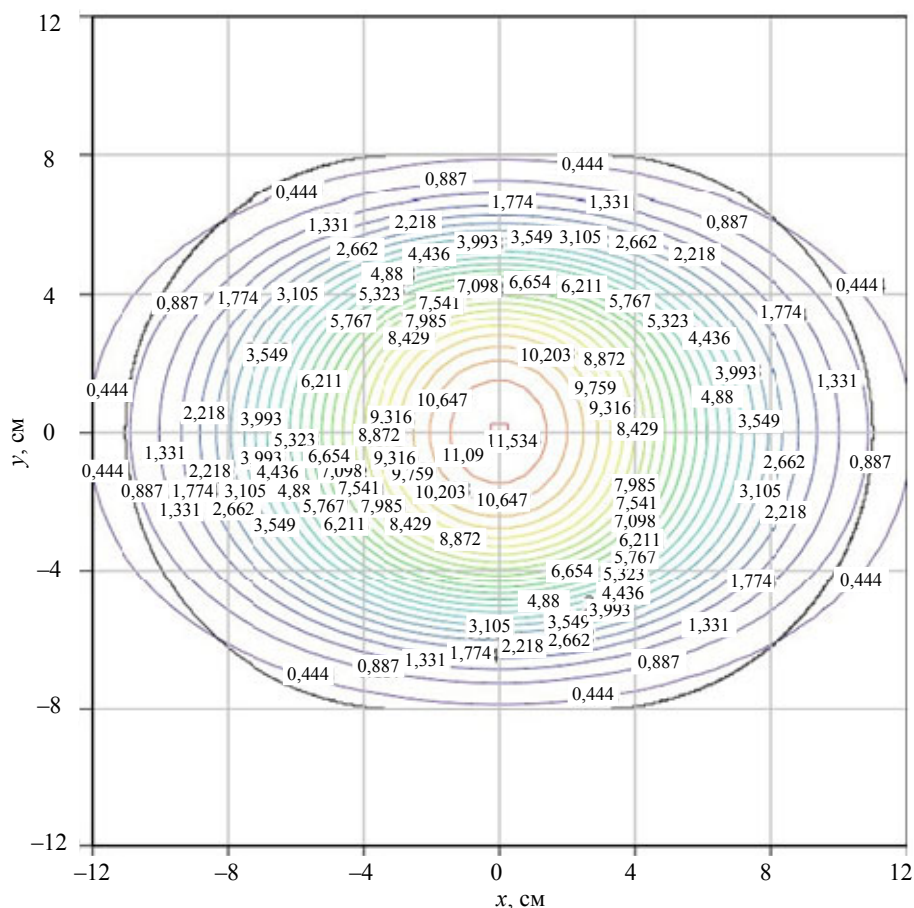


Рис. 3. Распределение плотности мощности в пучке на диафрагме КП

Таблица 1. Координаты термопар калориметра\*

Параметр	Левое крыло калориметра					Правое крыло калориметра				
Верхние термопары, $y = +30$ мм										
Номер пластины	9	7	5	3	1	2	4	6	8	10
Номер термопары	05	06	07	08	10	20	18	17	16	15
Угол между пластиной и плоскостью $y-z$ , град	36	20	12	9	8	8	9	12	20	36
Плотность мощности, кВт/см <sup>2</sup> (расчёт)	1,97	7,17	10,82	12,67	13,50	13,56	12,74	10,90	7,23	1,99
Нормальная плотность мощности $P_n$ , кВт/см <sup>2</sup> (расчёт)	1,16	2,45	2,25	1,98	1,88	1,89	1,99	2,27	2,47	1,17
Нижние термопары, $y = -30$ мм										
Номер пластины	9	7	5	3	1	2	4	6	8	10
Номер термопары	01	02	03	04	09	19	14	13	12	11
Угол между пластиной и плоскостью $y-z$ , град	36	20	12	9	8	8	9	12	20	36
Плотность мощности, кВт/см <sup>2</sup> (расчёт)	1,97	7,17	10,82	12,67	13,50	13,56	12,74	10,90	7,23	1,99
Нормальная плотность мощности $P_n$ , кВт/см <sup>2</sup> (расчёт)	1,16	2,45	2,25	1,98	1,88	1,89	1,99	2,27	2,47	1,17

\*Примечание. Координата  $Z$  отсчитывается от диафрагмы на входе калориметра ( $z = 225,4$  см от сеток ионно-оптической системы) в направлении распространения пучка, координата  $x$  отсчитывается от вертикальной плоскости симметрии пучка, координата  $y$  — расстояние от горизонтальной плоскости симметрии пучка и пластин калориметра: +30 мм и -30 мм.

Характерный размер, на котором изменяется плотность мощности пучка вдоль пластины, много больше толщины пластины, поэтому задачу теплопроводности в первом приближении можно считать одномерной, т.е. можно пренебречь потоком тепла вдоль пластины по сравнению с потоком от поверхности пластины к зоне охлаждения. Тогда температура на любой глубине внутри пластины калориметра определяется балансом между локальной плотностью мощности нагрева на поверхности пластины и по-

током тепла к зоне, охлаждаемой жидкостью. Поэтому изменение температуры термомпар  $\Delta T = T - T_0$  должно быть пропорционально локальной нормальной плотности мощности нейтрального пучка  $\Delta T \propto P_n$ .

На рис. 4 показан график распределения вычисленной нормальной плотности мощности в области расположения верхнего ряда термомпар на каждой пластине калориметра.

Следует учитывать, что не вся мощность пучка, падающая на пластину калориметра, полностью поглощается. Часть энергии исходных атомов дейтерия уносится ими из-за отражения атомов от пластины. Также энергия атомов пучка частично расходуется на распыление материала пластины [5, 6]. Доля отражённой энергии и доля энергии на распыление материала зависят от массы и энергии налетающих частиц, от угла падения и от материала поверхности.

В нашем случае атомы дейтерия имеют энергию 27 кэВ, а угол падения атомов на пластины калориметра (угол от нормали к поверхности) составляет от  $54^\circ$  для крайних пластин до  $82^\circ$  для центральных пластин (см. рис. 2, табл. 2). Долю

отражённой энергии можно оценить из численных расчётов по коду TRIM [5]. Коэффициент отражения энергии (отношение средней энергии отражённых под любыми углами атомов к энергии исходных атомов) минимален при нормальном падении и монотонно растёт с ростом угла падения. При фиксированном угле падения коэффициент отражения энергии атомов дейтерия от меди монотонно снижается с энергией в диапазоне от 300 эВ до 160 кэВ. При падении пучка с энергией  $\sim 30$  кэВ под углом  $54^\circ$  к нормали (крайние пластины) отражается примерно 2% падающей энергии, а при падении под углом  $82^\circ$  (центральные пластины) отражается около 20% падающей энергии. Поэтому отражение энергии при больших углах падения может приводить к заметному отличию реальной нормальной плотности мощности от расчётной.

Другой канал потерь энергии состоит в распылении (англ. sputtering) материала пластины. Однако в случае лёгких атомов пучка энергия, уносимая распыленными атомами мишени, гораздо меньше энергии, уносимой отражёнными атомами пучка. Из расчётных данных [6] для энергий атомов дейтерия до 10 кэВ следует, что выход атомов меди и уносимая ими энергия достигают максимума при энергии атомов дейтерия несколько кэВ и уменьшаются при дальнейшем росте энергии. Поэтому для оценки сверху можно взять энергию 3 кэВ. Хотя выход атомов меди, растущий с углом падения, составляет до 30% при углах падения около  $80^\circ$ , энергия, уносимая этими атомами, мала и не превышает 0,3% от падающей энергии. Поэтому потерями энергии на распыление меди с пластин калориметра можно пренебречь.

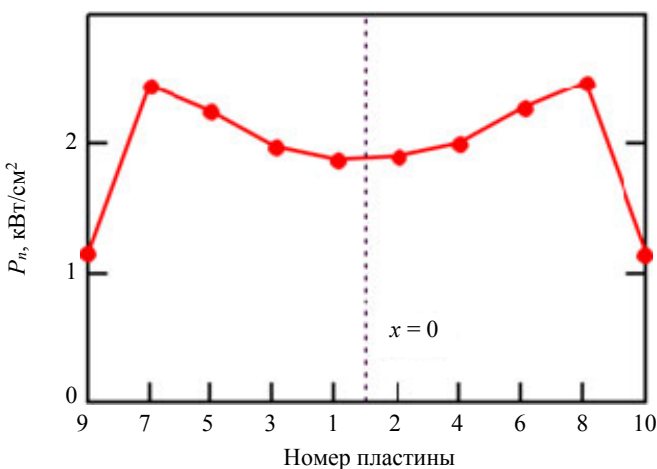


Рис. 4. Расчётная нормальная плотность мощности на пластинах (см. последнюю строку табл. 1)

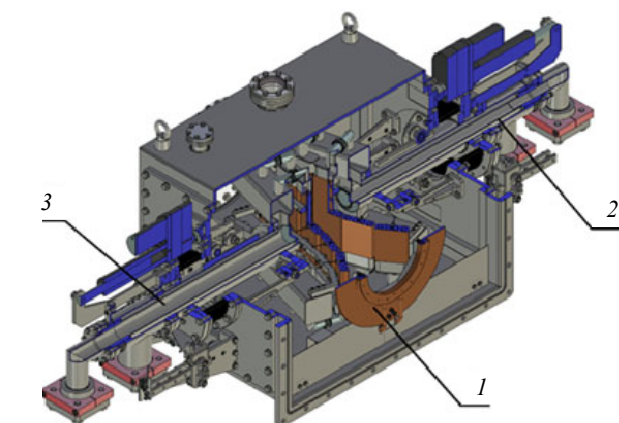


Рис. 5. Общий вид калориметра-приёмника, основные элементы: 1 — вакуумная камера с прицельным устройством (диафрагмой); 2 — узел правой приёмной панели; 3 — узел левой приёмной панели

Итак, если для крайних пластин поглощённая мощность почти равна падающей мощности пучка, то для центральных пластин локальная поглощённая мощность может составлять менее 80% от падающей мощности при учёте однократного отражения исходных частиц пучка.

#### Конструкция калориметра-приёмника.

Калориметр-приёмник имеет раздвижную конструкцию и состоит из трёх основных узлов: вакуумной камеры с прицельным устройством (диафрагмой); узел правой приёмной панели и левой приёмной панели. Общий вид устройства показан на рис. 5.

Вакуумная камера калориметра представляет собой сварную конструкцию. Она обеспечивает заданную пространственную ориентацию всех его элементов, а также является частью вакуумной камеры пучкового тракта. Общий вид вакуумной камеры с диафрагмой показан на рис. 6.

Прицельное устройство (ПУ) представляет собой паяное соединение двух дисков с впаянной в один из них трубкой охлаждения. В одном из дисков предусмотрены места для расположения вторично-эмиссионных датчиков. ПУ выполняет функцию по определению пространственного положения пучка на входе в калориметр, а также срезает гало пучка. Общий вид ПУ показан на рис. 7.

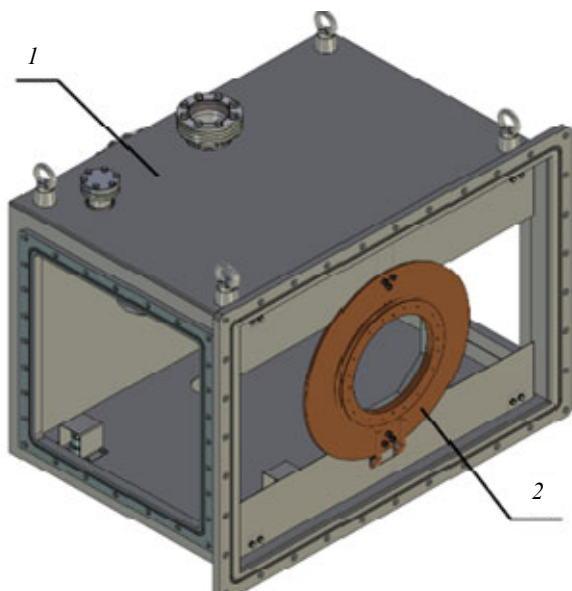


Рис. 6. Общий вид вакуумной камеры с прицельным устройством, основные элементы: 1 — вакуумная камера; 2 — прицельное устройство (диафрагма)

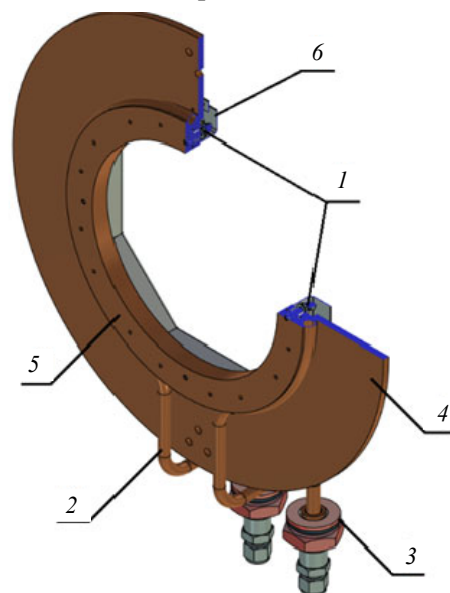


Рис. 7. Общий вид прицельного устройства, основные элементы: 1 — вторично-эмиссионные датчики; 2 — трубка охлаждения; 3 — развязка вакуум—атмосфера; 4 — диск; 5 — корпус датчиков; 6 — экран

Правая и левая приёмные панели располагаются на противоположных сторонах вакуумной камеры КП и состоят из нескольких сборочных единиц, которые в сочетании обеспечивают заданное пространственное положение приёмной панели, её перемещение в вакууме, разделение вакуум—атмосфера, а также подключение к напорной и сливной магистралям. Общий вид одной из приёмных панелей показан на рис. 8.

Каждая приёмная панель имеет опорные элементы, находящиеся и в вакууме, и в атмосфере. В вакууме узел фиксируется между направляющими роликами в вертикальной плоскости и опирается своими роликами на четыре кронштейна, расположенные на крышке вакуумной камеры. В атмосфере узел фиксируется на направляющей каретке. Во всех опорах узла установлены подшипники качения. Схема подвеса узла приёмной панели показана на рис. 9.

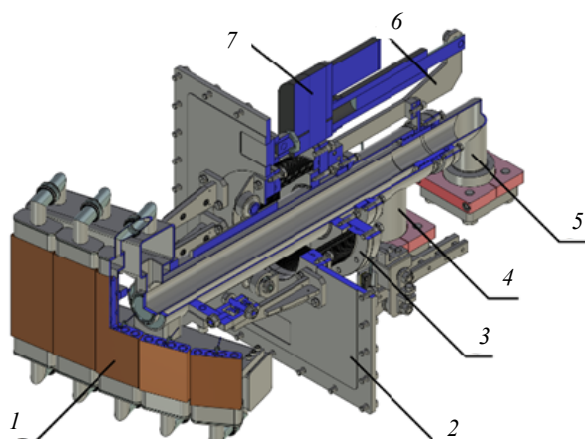


Рис. 8. Общий вид узла приёмной панели, основные элементы: 1 — приёмная панель; 2 — крышка вакуумной камеры; 3 — сильфонный узел (развязка вакуум—атмосфера); 4 — патрубок подачи воды; 5 — патрубок слива воды; 6 — толкатель; 7 — электропривод

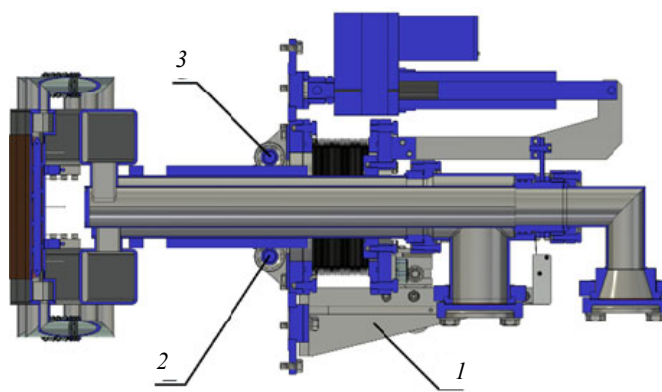


Рис. 9. Система подвеса узла приёмной панели: 1 — направляющая каретка (атмосфера); 2 — направляющий ролик; 3 — кронштейн

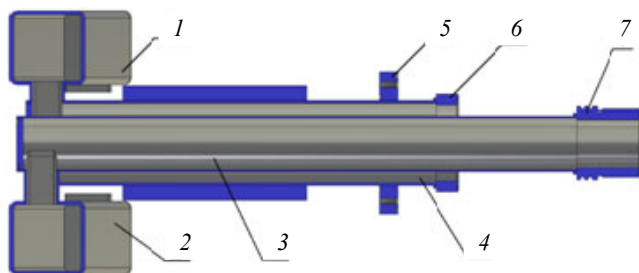


Рис. 10. Общий вид водяного коллектора, основные элементы: 1 — напорный коллектор-ресивер; 2 — сливной коллектор-ресивер; 3 — сливной трубопровод; 4 — напорный трубопровод; 5 — фланец развязки вакуум—атмосфера; 6 — присоединительный фланец к напорной магистрали; 7 — присоединительный фланец к сливной магистрали

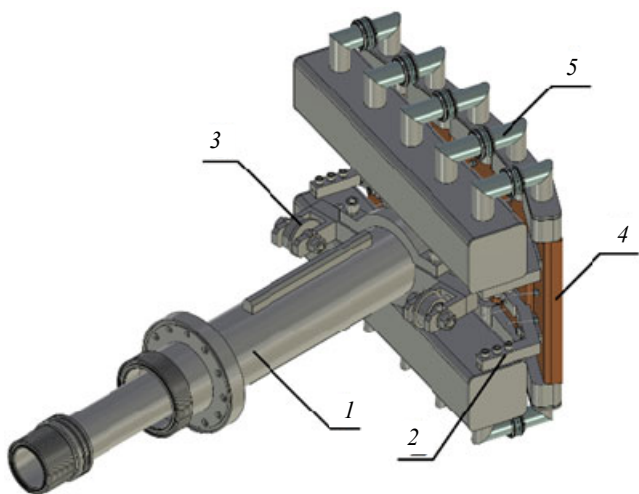


Рис. 11. Приёмная панель КП, основные элементы: 1 — водяной коллектор; 2 — опорный кронштейн теплообменников; 3 — опора; 4 — теплообменник; 5 — соединительный патрубок

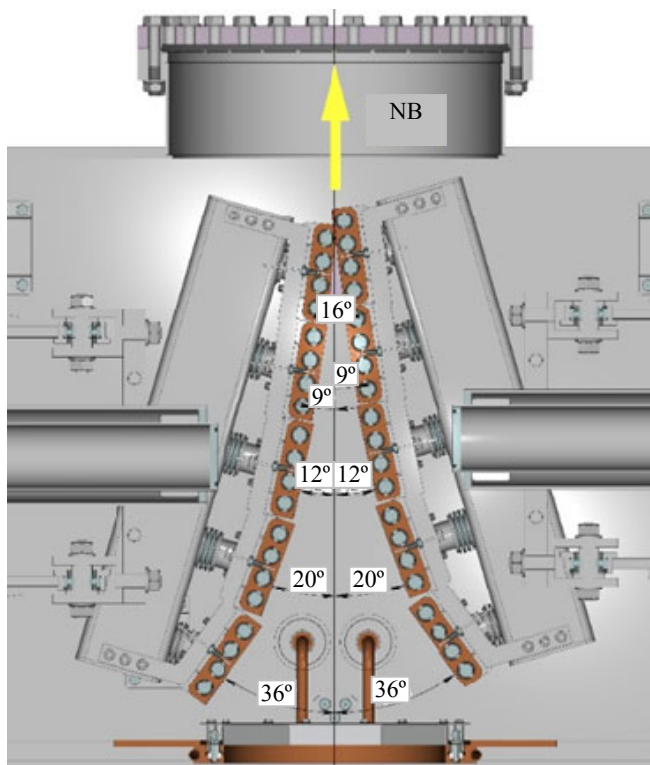


Рис. 12. Углы наклона теплообменников

Перемещение панелей обеспечивают электрические приводы. Ввод движения в вакуум осуществляется через сильфонный узел. Система подачи и слива охлаждающей жидкости организована по типу труба-в-трубе и объединяется в общий водяной коллектор. Она представляет собой герметичную сварную конструкцию, в которой труба меньшего диаметра 64 мм расположена внутри трубы большего диаметра 90 мм. По трубе большего диаметра осуществляется подача воды, а по трубе меньшего диаметра — её слив. На конце каждой из труб приварены соответствующие элементы, обеспечивающие герметичное соединение с водяными магистралями. Подобная компоновка значительно упрощает конструкцию и позволяет использовать водяные коллекторы в качестве элементов, передающих движение. Общий вид водяного коллектора показан на рис. 10.

К водяному коллектору крепятся теплообменники (приёмные пластины) и опора, с помощью которой узел перемещается в вакууме. Сами теплообменники крепятся к опорному кронштейну, который прикручивается к водяному коллектору, а соединительные патрубки привариваются к теплообменникам и водяному коллектору. Каждый патрубок имеет сильфонную вставку для компенсации термодформаций приёмной пластины в процессе нагрева пучком. Общий вид приёмной панели показан на рис. 11.

Приёмные панели смыкаются внутри вакуумной камеры, образуя V-образный приёмник. Такая форма приёмника позволяет получить наименьший размер вдоль оси пучка [7], причём теплообменники на каждой приёмной панели расположены под различными углами по отношению к оси пучка. Расположение под одним углом не требуется, поскольку наибольшая плотность мощности находится в центре пучка. Это позволяет сократить габариты КП. Углы наклона теплообменников по отношению к оси движения пучка частиц показаны на рис. 12.

Все приёмные пластины имеют одинаковую конструкцию, за исключением одной, с грани которой снята фаска, которая обеспечивает смыкание панелей без зазора. Это сделано для обеспечения гарантированного перекрытия пучка.

Каждый теплообменник представляет собой медную пластину толщиной 22 мм с четырьмя каналами, в которых установлены завихрители потока — интенсификаторы теплообмена [2] (рис. 13). Их наличие обеспечивает закрутку потока. В конструкции применён завихритель, образованный полностью перекрывающей канал вставкой с однозаходной проволочной навивкой.

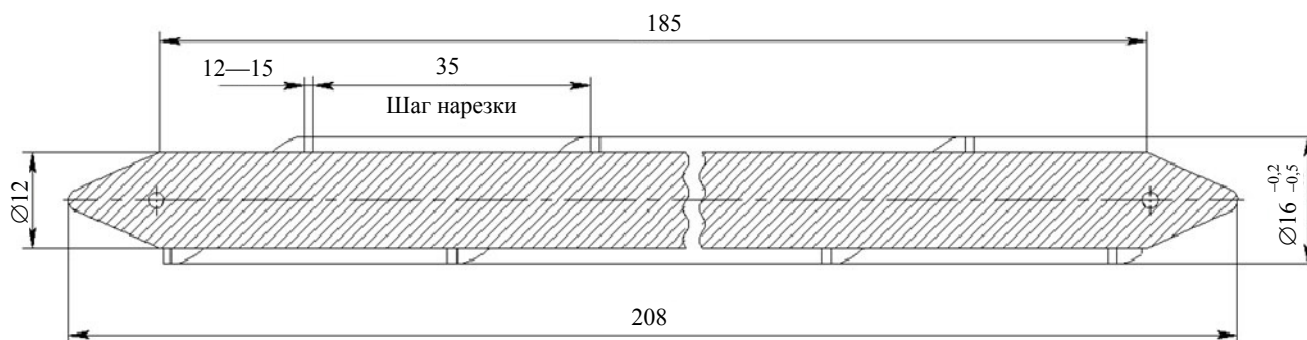


Рис. 13. Конструкция и основные размеры завихрителя

Данный тип не является достаточно эффективным с точки зрения интенсификации теплообмена [2], поскольку полностью перекрывает сечение канала, формируя кольцевой канал щелевого профиля. Вместе с тем эта конфигурация имеет ряд преимуществ с точки зрения технологии изготовления и массового расхода воды. Для измерения температуры нагрева пластин, а также определения профиля пучка на каждой из них установлены по две термопары ТХК-01. Конец термопары находится на расстоянии 2 мм от поверхности приёмной пластины. Конец термопары заделан в пластину с применением индий-галлий-оловянной эвтектики. Эвтектика находится в жидком состоянии при температуре 5—10 °С. Такая заделка обеспечивает тепловой контакт термопары с приёмной пластиной панели. Конструкция теплообменника показана на рис. 14.

Пластины с расположенными в них завихрителями достаточно чувствительны к деформациям, в частности, изгибу пластины в следствие теплового расширения металла. Значительные перемещения ведут к разрушению элементов КП. Конфигурация толстой пластины с четырьмя объединёнными каналами имеет достаточную жёсткость, часть которой обеспечивается завихрителями.

**Теплогидравлические расчёты калориметра.** Все теплогидравлические расчёты проводились в программе ANSYS [8] в средах Fluent и Mechanical. В первую очередь был сделан гидродинамический расчёт движения теплоносителя в гидравлической системе КП. В качестве исходного расчётного параметра было принято давление потока на входе в систему, которое составило 6 атм. Такая постановка задачи позволила сделать предварительные оценки правильности выбранной гидравлической схемы и определить некоторые значения параметров движения потока. Были найдены скорости движения потока во всех зонах водяного тракта для этого режима, определён требуемый расход жидкости, выявлены места обратного тока теплоносителя и закруток потока, а также застойные зоны. По полученным данным была проведена возможная оптимизация. Расчёт скоростей движения потока жидкости в водяной магистрали калориметра, соответствующий режиму расхода 700 л/мин показан на рис. 15. Па-

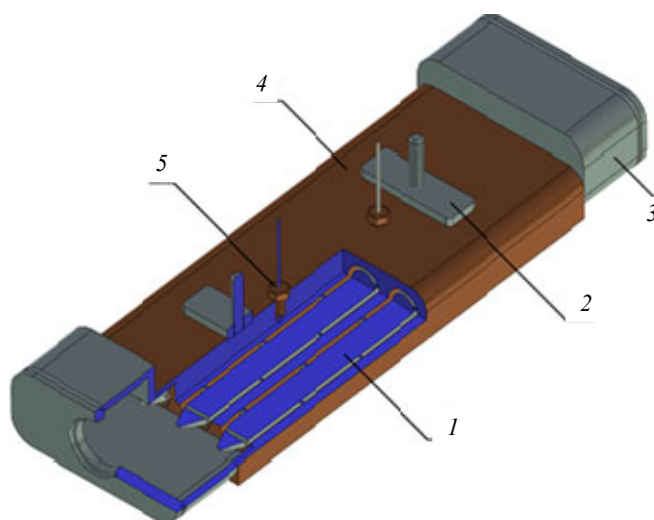


Рис. 14. Конструкция теплообменника КП, основные элементы: 1 — завихритель (интенсификатор теплообмена); 2 — опорная пластина; 3 — крышка-ресивер; 4 — приёмная пластина; 5 — термопара

Вектор скорости 1, мс<sup>-1</sup>

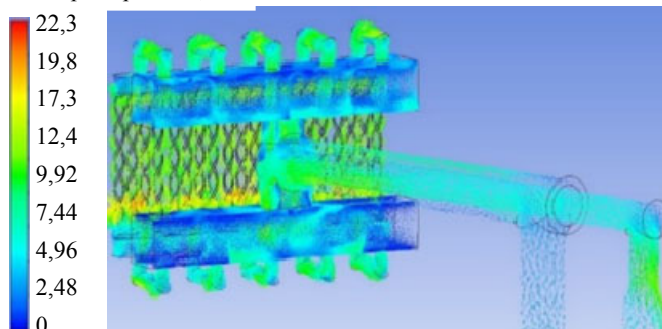


Рис. 15. Векторы скоростей потока жидкости в водяной магистрали калориметра



дение давления воды в системе показано на рис. 16. Давление воды на входе составляет 600 кПа (6,1 атм.), а на выходе давление падает — 11 кПа (0,1 атм.).

Следующим этапом был расчёт сопряжённого теплообмена приёмной пластины в среде Fluent. Данный способ расчёта позволяет смоделировать режим поглощения мощности пучка приёмной пластиной,

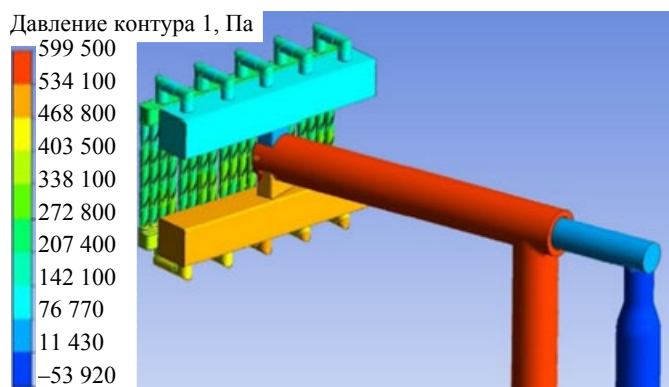


Рис. 16. Падение давления воды в водяной магистрали калориметра

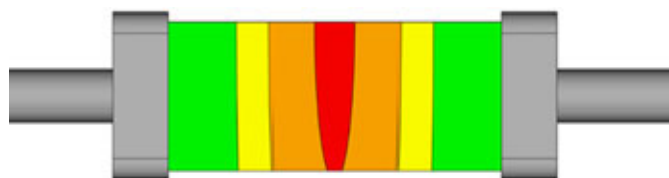


Рис. 17. Распределение плотности мощности пучка на пластине



Рис. 18. Изменение температуры приёмной пластины в зависимости от времени

охлаждаемой теплоносителем. Модель приёмной пластины для расчёта была максимально приближена к реальной, за исключением некоторых упрощений. За исходные параметры расчёта были приняты скорость воды на входе в теплообменник, равная  $V = 6$  м/с, и падающая (поглощаемая) на пластину плотность мощности, которая была задана в соответствии с расчётом распределения плотности мощности в пучке, полученной в расчёте. Согласно характеру распределения плотности мощности в пучке нагрузка на пластину от центра к её краям убывает. Для упрощения расчётов поверхность пластины была разделена на четыре нагрузочных зоны. Распределение нагрузки на пластине показано на рис. 17.

Красная зона соответствует максимальному значению плотности мощности  $1,88 \pm 0,04$  кВт/см<sup>2</sup>, коричневая —  $1,30 \pm 0,04$  кВт/см<sup>2</sup>, жёлтая —  $0,88 \pm 0,04$  кВт/см<sup>2</sup> и зелёная —  $0,35 \pm 0,04$  кВт/см<sup>2</sup>.

Таким образом, на приёмной пластине были организованы четыре зоны, на каждой из которых была задана соответствующая плотность мощности.

Нагрев воды в каналах пластины составил в среднем 32 °С. Падение давления составило 3,6 атм., а средний коэффициент теплоотдачи воды вблизи поверхности каналов охлаждения — в среднем  $8 \cdot 10^4$  Вт/(м<sup>2</sup>·К). Зависимость температуры поверхности пластины, поглощающей мощность пучка, от времени приведена на рис. 18.

Расчётный массовый расход для данного температурного режима составил 2,5 кг/с на один теплообменник. Таким образом, секундный и минутный расходы на одну приёмную панель — 12,5 л/с и 750 л/мин соответственно. При таком расходе воды обеспечивается достаточный теплосъём, при котором не происходит разрушительных термодформаций для элементов калориметра. Хотя значительная жёсткость пластины с установленными завихрителями позволяет противостоять изгибу, но при достижении температуры 700 °С и выше теплообменник будет подвержен достаточно сложному режиму деформации. В общем виде мы будем иметь достаточно холодную большую часть теплообменника и сильно разогретый поверхностный слой толщиной 2—4 мм, который будет расширяться как в осевом направлении, так и в поперечном. Перемещения достигнут нескольких миллиметров и приведут к возможной потере герметичности сварных и паяных соединений. Также расширившийся медный слой будет оказывать сильное давление на стальной завихритель, который может его разрушить.

Для сравнения приведём данные расхода воды на калориметрах некоторых инжекторов мегаваттного диапазона: в работе [9] для инжектора типа PINI на TEXTOR использовался калориметр с величиной падения давления 10 атм. и массовым расходом воды около 2000 л/мин, в работе [10] для инжектора мощностью 3 МВт на установке METF — падение давления воды 11,5 атм. и полный массовый расход воды около 2500 л/мин, в работе [11] применён калориметр для инжектора мощностью 1 МВт и длительностью 1 с с массовым расходом 300 л/мин, калориметр на токамаке НИЦ «Курчатовский институт»

для инжектора мощностью 3,7 МВт в атомах, приведённый в работе [12], потребовал массового расхода 30 л/с при 8 атм.

**Опыт эксплуатации на TCV.** Инжектор атомов работает на токамаке TCV в Лозанне с 2015 г. За это время в калориметр было произведено порядка 1000 выстрелов при разных мощностях пучка и длительностях импульса. За время эксплуатации калориметр не потребовал никаких сервисных работ и замены каких-либо деталей.

При работе инжектора атомов на токамаке TCV были получены данные температур с термопар приёмных пластин калориметра. Измерения проводились при мощности нейтрального пучка 1,30 МВт и длительности импульса 500 мс, при этом параметры потока имели следующие значения: расход воды в пересчёте на одну панель 420 л/мин, давление потока на входе 3,3 атм. В табл. 2 приведены данные температур на термопарах по уровням (верх—низ) и сторонам (лево—право).

Т а б л и ц а 2. Данные температур на термопарах по уровням (верх—низ) и сторонам (лево—право)

Параметр	Левое крыло калориметра					Правое крыло калориметра				
	Верхние термопары, $y = +30$ мм									
Номер термопары	05	06	07	08	10	20	18	17	16	15
Угол между пластиной и плоскостью $y-z$ , град	36	20	12	9	8	8	9	12	20	36
Измеренная температура, °С	84/90	120/122	63/62	100/98	100/98	102/83	109/108	47/46	148/145	103/109
	Нижние термопары, $y = -30$ мм									
Номер термопары	01	02	03	04	09	19	14	13	12	11
Угол между пластиной и плоскостью $y-z$ , град	36	20	12	9	8	8	9	12	20	36
Измеренная температура, °С	87/90	127/129	59/58	92/94	92/94	107/104	93/98	68/67	131/132	93/91

На рис. 19 показаны измеренные экспериментальные данные температур на термопарах (разбито на четыре зоны).

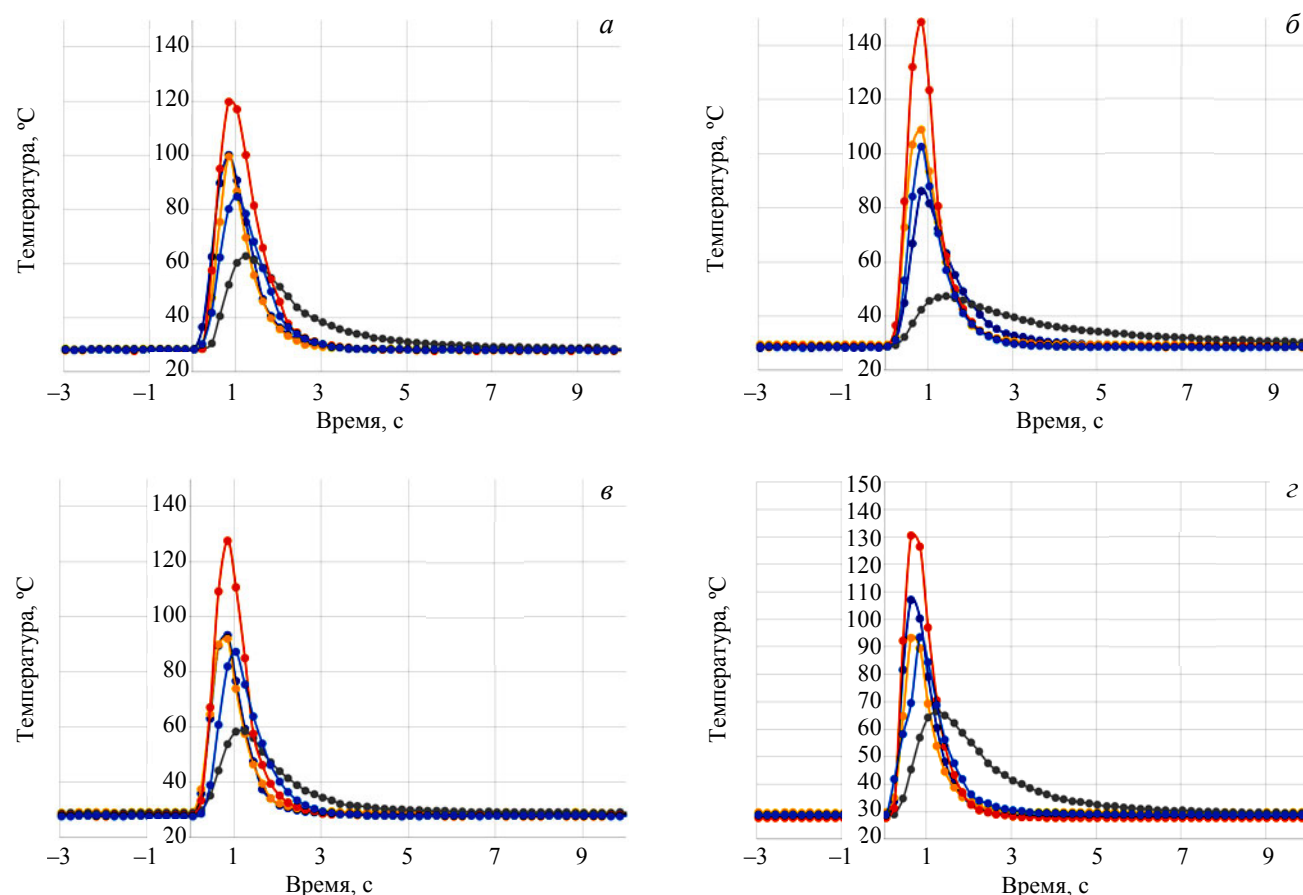


Рис. 19. Зависимость температуры от времени для термопар № 1—20: калориметр верхний левый (а) (● — ТС 10; ● — ТС 8; ● — ТС 7; ● — ТС 6; ● — ТС 5); верхний правый (б) (● — ТС 20; ● — ТС 18; ● — ТС 17; ● — ТС 16; ● — ТС 15); нижний левый (в) (● — ТС 9; ● — ТС 4; ● — ТС 3; ● — ТС 2; ● — ТС 1); нижний правый (г) (● — ТС 19; ● — ТС 14; ● — ТС 13; ● — ТС 12; ● — ТС 11)

Для термопары 7 (пластина 5 левого крыла калориметра) и термопар 17 и 13 (пластина 6 правого крыла) время отклика на воздействие пучка составило  $\tau \sim 1,3$  с, что в 2,6 раза больше. Этот негативный фактор можно объяснить следующим образом. Поскольку все пластины калориметра одинаковые, по видимому, это означает, что для термопар с большим характерным временем установления температуры тепловой контакт между пластиной и термопарами слабый (низкая теплопроводность контакта) и не обеспечивает быстрого установления температуры термопары в соответствии с температурой пластины в этой области. Поэтому следует исключать из анализа измерения температуры термопарами 07 и 03 (пластина 5 левого крыла калориметра) и термопарами 17 и 13 (пластина 6 правого крыла).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный в данной статье калориметр был введён в работу в 2015 г. За время его эксплуатации в режимах автономной работы в него было произведено более 1000 выстрелов с мощностью пучка свыше одного мегаватта. Приёмник поглощал как полноимпульсные пучки, так и модулированные. За время работы калориметра не произошло каких-либо отказов в работе его систем.

В конструкции КП был применён ряд технических решений, таких как приёмные пластины с установленными в них завихрителями потока жидкости для интенсификации теплообмена и коллекторы подачи и слива воды по принципу труба-в-трубе, обеспечивающие ввод движения в вакуум, которые позволили достичь высокой энергоэффективности при сравнительно небольших расходах теплоносителя, небольших габаритных размеров устройства, сравнительно малого веса устройства, модульной конструкции, удобства сборки, настройки, обслуживания, простоты изготовления элементов калориметра.

Авторы приносят искреннюю благодарность А.Н. Карпушовой (TCV, Лозанна, Швейцария) за предоставление данных по нагреву калориметра и за полезные обсуждения, А.В. Брулю, В.И. Давыденко, А.В. Сорокину, В.В. Мишагину за интерес к работе и ценные замечания.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Karpushov A.N., Chavan R., Coda S. et al.** Neutral beam heating on the TCV tokamak. — *Fusion Eng. Des.*, 2017, vol. 123, p. 468.
2. **Митрофанова О.В.** Гидродинамика и теплообмен закрученных потоков в каналах ядерно-энергетических установок. — М.: Физматлит, 2010. 288 с. SBN 978-5-9221-1223-9.
3. **Sorokin A.V., Akhmetov T.D., Brul A.V., Davydenko V.I., Ivanov A.A., Karpushov A.N., Mishagin V.V., Shikhovtsev I.V.** Update of ion-optical system of neutral beam of tokamak à configuration variable. — *Rev. Sci. Instrum.*, 2020, vol. 91, p. 013323.
4. **Akhmetov T.D., Davydenko V.I., Ivanov A.A.** Model of neutral-beam propagation in a duct with scrapers. — *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2008, vol. 36(4), p. 1545—1551.
5. **Eckstein W.** Reflection (Backscattering), Max-Planck-Institut für Plasmaphysik. IPP 17/12 (2009); url: [http://pubman.mpdl.mpg.de/pubman/item/escidoc:2141005/component/escidoc:2141004/IPP\\_report\\_17\\_12\\_Eckstein.pdf](http://pubman.mpdl.mpg.de/pubman/item/escidoc:2141005/component/escidoc:2141004/IPP_report_17_12_Eckstein.pdf).
6. **Eckstein W.** Sputtered Energy Coefficient and Sputtering Yield, Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, IPP 17/29 (2011); url: [http://pubman.mpdl.mpg.de/pubman/item/escidoc:2140248/component/escidoc:2140247/IPP\\_17\\_29.pdf](http://pubman.mpdl.mpg.de/pubman/item/escidoc:2140248/component/escidoc:2140247/IPP_17_29.pdf).
7. **Belchenko Yu.I., Davydenko V.I. et al.** Studies of ion and neutral beam physics and technology at the Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS. — *Phys. Usp.*, 2018, vol. 61, p. 531— 581.
8. See <http://www.ansys.com> for ANSYS Workbench Platform.
9. **Euringer H., Lochter M., Pfister U., Uhlemann R.** Neutral injection for TEXTOR. — In: *Proc. of IEEE 13th Symposium on Fusion Engineering*, Knoxville. TN, 1989, vol. 2, p. 992.
10. **Combs S.K., Milora S.L., Foster C.A., Haselton H.H., Menon M.M., Tsai C.C.** Compact inexpensive target design for steady-state heat removal in high-heat-flux fusion applications. — *Rev. Sci. Instr.*, 1985, vol. 56, № 8, p. 1526—1530.
11. **Sorokin A., Belov V., Davydenko V., Deichuli P., Ivanov A., Podyminogin A., Shikhovtsev I., Shulzhenko G., Stupishin N., Tiunov M.** Characterization of 1 MW, 40 keV, 1 s neutral beam for plasma heating. — *Review of Scientific Instruments*, 2010, vol. 81(2), 02B108—02B108-4.
12. **Наумов В.К., Семашко Н.Н.** Некоторые вопросы обеспечения теплового режима токоприёмников мощного инжектора нейтральных атомов. — *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез*, 1980, вып. 1(5), с. 67.



Владислав Харисович Амиров, ведущий инженер-конструктор; ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН, 630090 Новосибирск, пр. Лаврентьева 11, Россия  
V.Kh.Amirov@inp.nsk.su



Тимур Дарвинович Ахметов, с.н.с.; ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН, 630090 Новосибирск, пр. Лаврентьева 11, Россия; Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирская обл. Новосибирск, ул. Пирогова 2, Россия  
T.D.Akhmetov@inp.nsk.su



Александр Иванович Горбовский, начальник конструкторского бюро; ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН, 630090 Новосибирск, пр. Лаврентьева 11, Россия; Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирская обл. Новосибирск, ул. Пирогова 2, Россия  
A.I.Gorbovsky@inp.nsk.su



Петр Петрович Дейчули, с.н.с., к.ф.-м.н.; ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН, 630090 Новосибирск, пр. Лаврентьева 11, Россия  
P.P.Deichuli@inp.nsk.su



Александр Александрович Иванов, заместитель директора, д.ф.-м.н. лауреат премии им. Л.А. Арцимовича; ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН, 630090 Новосибирск, пр. Лаврентьева 11, Россия;  
A.A.Ivanov@inp.nsk.su



Валериан Александрович Капитонов, ведущий инженер; ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН, 630090 Новосибирск, пр. Лаврентьева 11, Россия  
V.A.Kapitonov@inp.nsk.su



Игорь Владимирович Шиховцев, с.н.с., к.ф.-м.н.; ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН, 630090 Новосибирск, пр. Лаврентьева 11, Россия  
I.V.Shikhovtsev@inp.nsk.su

Статья поступила в редакцию 17 февраля 2021 г.  
После доработки 10 июля 2021 г.  
Принята к публикации 28 сентября 2021 г.  
Вопросы атомной науки и техники.  
Сер. Термоядерный синтез, 2021, т. 44, вып. 4, с. 80—91.