

Модернизация камеры ускорителя электронов РМ55 НИИЯФ МГУ для проведения фотоядерных экспериментов с высокой точностью измерений.

Выполнил студент 413 гр. Кравченко В.С.,
Научный руководитель к.ф.-м.н Кузнецов А.А

МГУ им. М.В.Ломоносова, Физический факультет, кафедра общей ядерной
физики

20 апреля 2020 г.

1. Введение

Настоящая исследовательская работа направлена на получение новых экспериментальных данных по фотоядерным реакциям и модернизацию ускорителя электронов НИИЯФ МГУ РМ55.

Экспериментальные данные о фотоядерных реакциях необходимы во многих фундаментальных и прикладных исследованиях. В частности, сечения фотопротонных и фотонейтронных реакций необходимы для ответа на вопрос о происхождении обойдённых ядер — самых лёгких стабильных изотопах химических элементов в процессе звездного нуклеосинтеза. Прикладные задачи, в которых используются фотоядерные реакции — задачи трансмутации ядерных отходов, создание пучков радиоактивных ядер и получение медицинских изотопов.

Фотоядерные реакции широко исследуются, начиная с 50-х годов 20 века. За это время был накоплено большое количество экспериментальных данных о фотоядерных реакциях. Большинство измерений было выполнено на пучках квазимонохроматических фотонов методом прямой регистрации нейтронов. Наибольший вклад в исследование фотоядерных реакций сделали две лаборатории: в Сакле (Франция) и Ливерморе (США). Данные, полученные в разных лабораториях, различаются друг от друга до 2-х раз. Это связано со сложностью использованной методики — разделения нейтронов по множественности, а также возможными погрешностями в эффективности регистрации нейтронов. Необходимы новые данные о фотоядерных реакциях, лишенные недостатков этих экспериментов. В НИИЯФ МГУ для исследования фотоядерных реакций используется активационная методика измерения выходов и сечений. Мишень из исследуемого материала облучается

тормозным пучком гамма-квантов от ускорителей электронов. Идентификация и расчет выходов, происходящих в образцах реакций, проводится с помощью измерений спектров остаточной активности. Данный метод позволяет в одном эксперименте независимо измерить выходы сразу нескольких реакций. Полученные выходы позволяют также проверять другие методики, основанные на методе регистрации нейтронов, и выявить источники систематических ошибок. Вдобавок активационный метод позволяет измерить выходы реакций, недоступных для других методов, в частности, многонуклонных реакций с вылетом до 5 нейтронов. Сейчас при проведении активационных экспериментов в НИИЯФ МГУ используется тормозной пучок от микротрона РМ55 НИИЯФ МГУ. Измерения проводятся при одной энергии электронов — 55 МэВ. Для получения более точных оценок сечений фотоядерных реакций и изучения особенностей взаимодействия гамма-квантов с веществом необходимы измерения и при более низких значениях энергии электронов. В сечение фотопоглощения при максимальной энергии тормозного пучка гамма-квантов 55 МэВ вносят вклады гигантский дипольный резонанс (ГДР), квазидейтронный механизм поглощения (КД), изовекторный квадрупольный резонанс (КР) и обертона ГДР (ГДР2). При измерении выходов реакций при одной энергии 55 МэВ мы получаем сумму всех возможных механизмов. Для изучения ГДР нужно ограничиваться энергией около 30 МэВ.

Для возможности измерений при разных энергиях электронов необходимо внести изменения в конструкцию ускорителя. Новая сборка позволит спускать облучаемые образцы непосредственно в ускорительную камеру без нарушения вакуума. Так можно будет проводить облучение на орбитах микротрона с энергиями 55, 50, 45, 40, 35, 30, 25, 20 и 15 МэВ. Это позволит делать более точные оценки сечений и изучить особенности взаимодействия гамма-квантов с веществом, в частности, явления изоспинового расщепления гигантского дипольного резонанса.

В результате проведенной работы создана полная трехмерная модель вакуумной камеры ускорителя РМ55, которая будет в использована при изготовлении новой вакуумной камеры и модернизации РМ55. Также с помощью программы GEANT4 построена модель установки, которая позволяет планировать будущие эксперименты.

2. Описание изменений ускорительной камеры.

Модернизировать ускоритель предлагается таким образом, чтобы можно было проводить облучения на орбитах ускорителя внутри вакуумной камеры. Благодаря предложенному способу модернизации ускорителя изменения коснулись только ускорительной камеры, что существенно удешевляет и упрощает модернизацию ускорителя. В процессе модернизации ускорителя потребуется только заменить старую ускорительную камеру на новую, так же придется произвести незначительную замену деталей, приваренных к камере.

Для реализации проекта будут внесены следующие изменения в устройство ускорительной камеры (рис. 1.) (УК): увеличение УК, добавление 8 отверстий для систем спуска

образца (ССО) (рис.2) и канавки для приварки ССО к УК. Сами ССО будут выполнены из 3 деталей: стакана, сальфона и направляющей (рис. 3-4). Сальфон будет обеспечивать подвижность системы, стакан одновременно является тормозной мишенью и резервуаром для образца, направляющая ограничивает смещение сальфона, предотвращая критические деформации, а как следствие, потерю вакуума и поломку системы.

2.1. Общие изменения деталей камеры.

Согласно новым изменениям в крышке ускорительной камеры появились 8 отверстий для систем спуска образца (8 отверстий - по одному на каждую орбиту, проходящую через камеру, орбиты будем нумеровать от 1 до 8 по мере возрастания энергии). Т.к. для снятия напряжения при сварке необходима проточка заготовки вокруг отверстия, появилась необходимость увеличить длину камеры со стороны первой орбиты, иначе сварить не получится. Увеличение камеры составило всего 2 мм, этого достаточно, чтобы проточка и отверстие уместились, при этом камера не будет задевать ускоряющую структуру. В оригинальных чертежах текущего исполнения деталей и сборки ускорителя расстояние от ускорительной камеры до ускоряющей структуры составляет 7 мм, результат измерения данного расстояния на действующей установке был существенно меньше - всего 4 мм, тем не менее, для нас это означает, что мы все еще можем увеличивать длину на 2 мм. В результате такого изменения камеры, необходимо увеличить на 2 мм сразу 3 детали: РАМ.001.20.03.1.01 (фланец), РАМ.001.20.03.1.02 (крышка), РАМ.001.20.03.1.03 (дно).

Чтобы пучки электронов не испытывали дополнительную расфокусировку, все детали ускорительной камеры размагничивают. Для предотвращения коррозии все детали электрополируют.

2.2. Необходимые параметры системы спуска образца.

Максимальная апертура пучка в ускорителе РТМ-55 НИИЯФ МГУ ограничена внутренним диаметром каналов на орбитах (детали РАМ.001.20.03.1.07, РАМ.001.20.03.1.08 и РАМ.001.20.03.1.08-01, минимальный внутренний диаметр -15 мм). В результате хорошей настройки квадрупольных линз апертура пучка примерно 8-9 мм. Из этого следует, что оптимальный размер облучаемых образцов примерно 14-15 мм. Т.к. образцы могут быть и больше (на РТМ-55 проводят облучения различные институты и факультеты МГУ, поэтому реальные размеры мишени могут быть немного больше), то внутренний диаметр стакана было решено делать не менее 25 мм.

Исходя из устройства новой ускорительной камеры и минимального внутреннего диаметра стакана был определен минимальный диаметр отверстий под приварку (32мм).

Чтобы неактивная система спуска образца не заслоняла орбиту, а активная перекрывала орбиту целиком, свободный ход сальфонов должен быть не менее 30мм. При эксплуатации и обслуживании ускорителя, если у сальфона нет запаса свободного хода, его можно довольно легко повредить, т.к. толщина стенок гибких сальфонов примерно 0.05мм. Ис-

ходя из этого было принято решение устанавливать сиффоны со свободным ходом 40 мм.

Чтобы ускорительную камеру можно было легко и быстро отремонтировать в случае поломки сиффонов, систему спуска образца разделили на 3 части: направляющую, стакан и сиффон, система собирается посредством болтовых соединений, вакуум удерживается фланцами DN40CF, которые в свою очередь есть у каждой из 3-х перечисленных деталей (у сиффона таких фланца 2, один для соединения с направляющей, другой для соединения со стаканом).

Для обеспечения антикоррозийных свойств, все детали (кроме мембранного сиффона DN40R-40) будут изготовлены из нержавеющей стали марки 12X18H10T.

2.3. Сиффон EWB40R-40.

EWB40CF производится немецкой компанией VACOM. В качестве вводов мембранные сиффоны передают движение в вакуум или разделяют вакуумную камеру и вакуумные компоненты. Преимущества таких сиффонов перед гидроформованными: гибкость, компактный монтаж, отвечают высоким требованиям применения в условиях высокого и сверхвысокого вакуума, низкая жёсткость (позволяет изменять положения сиффона руками без чрезмерных усилий). Сиффон выполнен из немецкой марки стали 316L (ближайший российский аналог - сталь марки 03X16H15M3). Антикоррозийные свойства марки стали 316L обусловлены наличием поверхностного слоя оксида хрома, защитный слой устойчив, даже после механических и химических повреждений приобретает свой прежний вид, сохраняя антикоррозийные качества сплава без изменений.

3. Моделирование фотоядерного эксперимента.

После создания трезмерной модели новой ускорительной камеры, была построена модель установки на GEANT4, которая позволяет проводить моделирование экспериментов с учетом всех физических процессов, происходящих в облучаемых образцах.

В результате экспериментов на тормозных пучках измеряются выходы $Y(E^m)_{\text{экс.}}$ фотоядерных реакций представляющие собой свертку сечения фотоядерной реакции $\sigma(E_\gamma)$ с плотностью распределения числа тормозных фотонов по энергии на один электрон пучка ускорителя $W(E_\gamma, E^m)$:

$$Y(E^m)_{\text{экс.}} = \alpha \eta \int_{E_{\text{пор.}}}^{E^m} W(E, E^m) \sigma(E) dE, \quad (1)$$

где E^m — кинетическая энергия электронов, падающих на вольфрамовый радиатор, E — энергия тормозных γ -квантов, образующихся на радиаторе, $E_{\text{пор.}}$ — порог исследуемой фотоядерной реакции, α — количество исследуемых ядер, отнесенное к 1 см^2 мишени, η — процентное содержание исследуемого изотопа в облучаемой мишени.

Построенная модель позволяет рассчитывать тормозные спектры гамма-квантов на разных орбитах ускорителя, попадающих на облучаемую мишень. Примеры рассчитанных

тормозных спектров с энергией электронов от 15 до 55 МэВ приведены на рис. 5. Приведено количество тормозных фотонов, образующихся от одного электрона ускорителя. Одним из требований при проектировании новой вакуумной камеры было использование тонкой тормозной мишени, при этом рассчитанный тормозной спектр по форме будет совпадать со спектром Зельтцера-Бергера для тонкой тормозной мишени, что значительно упростит интерпретацию экспериментальных выходов. Использование тонкой тормозной мишени позволяет рассчитывать экспериментальные выходы в виде сечения на эквивалентный квант:

$$\sigma_q = \frac{\int_{E^{thr}}^{E^m} \sigma(E_\gamma) W(E_\gamma, E^m) dE}{\frac{1}{E^m} \int_0^{E^m} E_\gamma \cdot W(E_\gamma, E^m) dE_\gamma} \quad (2)$$

Такое представление более удобно чем выход, т.к. позволяет сравнивать результаты экспериментов на тормозных пучках, выполненных в разной геометрии.

С использованием модели установки на GEANT4 был смоделирован один из типов экспериментов, проводимых в НИИЯФ МГУ, а именно измерение выходов фотопротонных реакций. Набор экспериментальных сечений фотопротонных реакций доступных в литературе крайне ограничен из-за сложности измерения протонов на пучке фотонов. Активационная методика, имеющая дело с конечными ядрами, позволяет измерять выходы фотопротонных реакций. В качестве примера выбрана реакция $^{100}\text{Mo}(\gamma, 1p)^{99}\text{Nb}$. Для моделирования выбраны теоретические сечения фотопротонных реакций, рассчитанные по комбинированной модели фотоядерных реакций. Эта модель разработана в НИИЯФ МГУ и имеет ряд преимуществ по сравнению с другими программами статистического расчета ядерных реакций. В КМФР полное сечение фотопоглощения рассчитывается с помощью полумикроскопической модели колебаний и квазидейтронного механизма поглощения (КД). Помимо гигантского дипольного резонанса в сечение фотопоглощения вносят вклад еще квадрупольный резонанс (КР) и обертона ГДР (ГДР2). Сечение $^{100}\text{Mo}(\gamma, 1p)^{99}\text{Nb}$, рассчитанное по КМФР приведено на рис. 6. На рисунке приведено суммарное сечение реакции $^{100}\text{Mo}(\gamma, 1p)^{99}\text{Nb}$ (S) и сечения отдельных компонент. Важным вопросом для изучения ГДР является исследование изоспинового расщепления ГДР. Изоспиновые компоненты ГДР $T_<$ и $T_>$ связаны с возбуждением ГДР с изоспином равным изоспину основного состояния исходного ядра и на единицу больше. Из рис. 6 видно, что при проведении эксперимента на тормозном пучке с верхней границей 55 МэВ, мы измеряем не только ГДР, но и вклад других компонент — ГДР2, КР и КД.

Для расчета результатов, которые будут измерены в эксперименте, было рассчитано суммарное сечение на эквивалентный квант для реакции $^{100}\text{Mo}(\gamma, 1p)^{99}\text{Nb}$ и сечения отдельных компонент. Результаты суммированы в таблице 1 и на рис.7. Видно, что при энергии электронов ускорителя выше 30 МэВ достаточно большой вклад в полное сечение на эквивалентный квант для реакции $^{100}\text{Mo}(\gamma, 1p)^{99}\text{Nb}$ вносит квадрупольный резонанс. Для того, чтобы исследовать только вклад ГДР нужно проводить эксперимент с верхней границей тормозного спектра при энергии 20-30 МэВ. Измерения при нескольких энер-

гиях от 15 до 30 МэВ позволит также исследовать зависимости изоспинового расщепления ГДР от энергии гамма-квантов.

Таблица 1: Сечения на эквивалентный квант для различных механизмов фотоядерной реакции $^{100}\text{Mo}(\gamma, 1p)^{99}\text{Nb}$ в зависимости от энергии электронов E^m .

E^m , МэВ	$\sigma_{q \text{ tot}}$, Мб	$\sigma_{q T <}$, Мб	$\sigma_{q T >}$, Мб	$\sigma_{q \text{ КР}}$, Мб	$\sigma_{q \text{ ГДР2}}$, Мб	$\sigma_{q \text{ КД}}$, Мб
15	2.83E-05	2.82E-05	0	9.22E-08	5.18E-09	1.21E-08
20	0.22	0.15	0.07	0.00063	7.53E-05	1.91E-05
25	2.05	0.45	1.58	0.016	0.0009	0.0008
30	3.01	0.70	2.17	0.135	0.0043	0.0035
35	3.50	0.86	2.38	0.23	0.013	0.007
40	3.82	0.98	2.52	0.27	0.032	0.010
45	4.06	1.07	2.62	0.30	0.054	0.013
50	4.24	1.14	2.71	0.32	0.068	0.015
55	4.39	1.19	2.78	0.33	0.077	0.017

4. Заключение

Работа направлена на получение новых экспериментальных данных о фотоядерных реакциях. Для этой цели было предложено выполнить модификацию вакуумной камеры ускорителя электронов РМ55, которая позволяет проводить исследования фотоядерных реакций при энергиях электронов от 15 до 55 МэВ с шагом 5 МэВ. Была создана полная трехмерная модель модернизированной вакуумной камеры ускорителя с учетом всех технических требований, предъявляемых к проведению активационных экспериментов, а также схемы и документация, необходимые для производства камеры. С помощью пакета GEANT4 разработана физическая модель новой камеры, которая позволяет моделировать фотоядерные эксперименты, которые будут выполняться на модернизированном ускорителе. Приведено моделирование одного из типов фотоядерных экспериментов, проводимых в НИИЯФ МГУ, по исследованию изоспинового расщепления ГДР с помощью измерений выходов фотопротонных реакций.

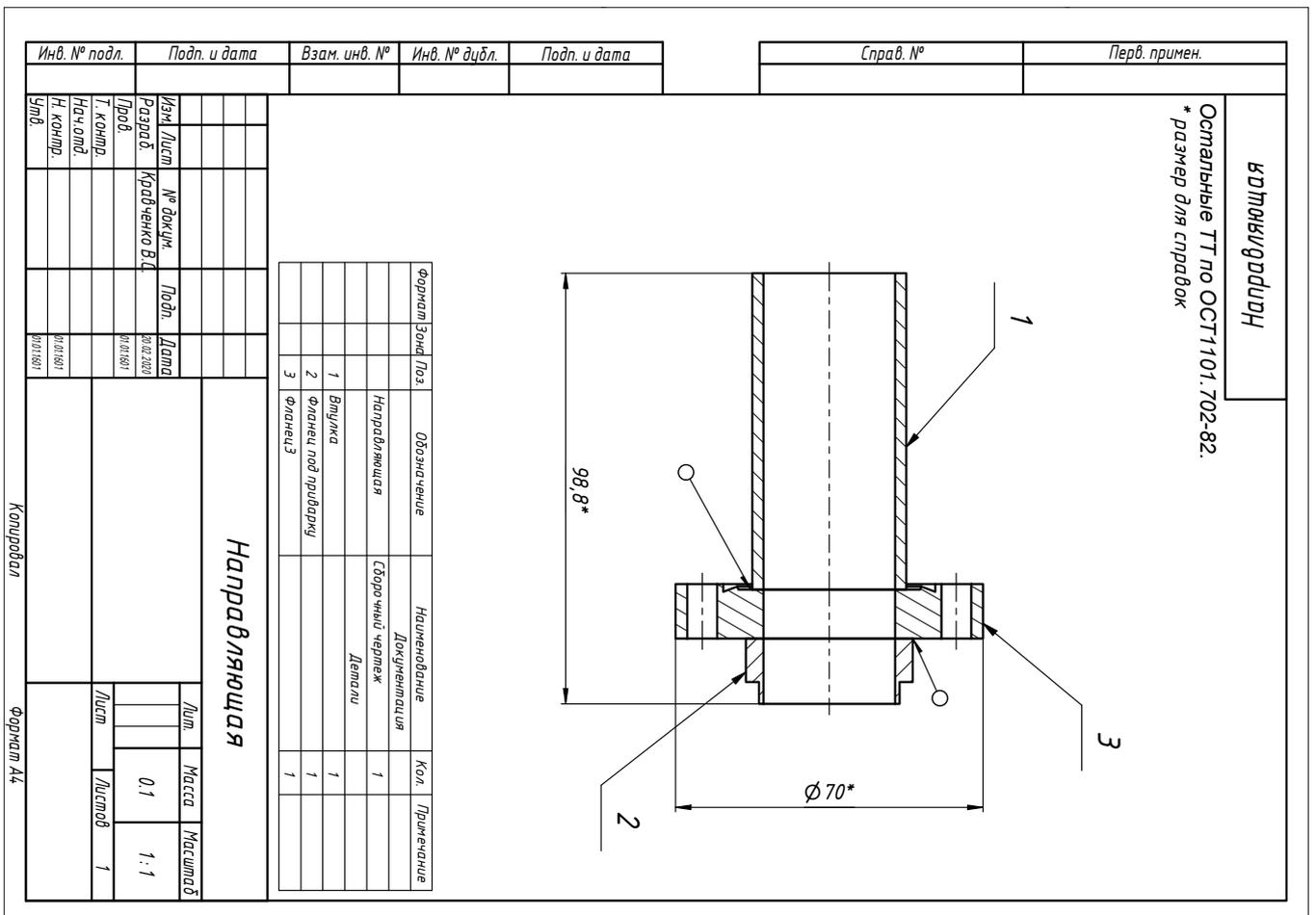


Рис. 2: Направляющая системы спуска образца.

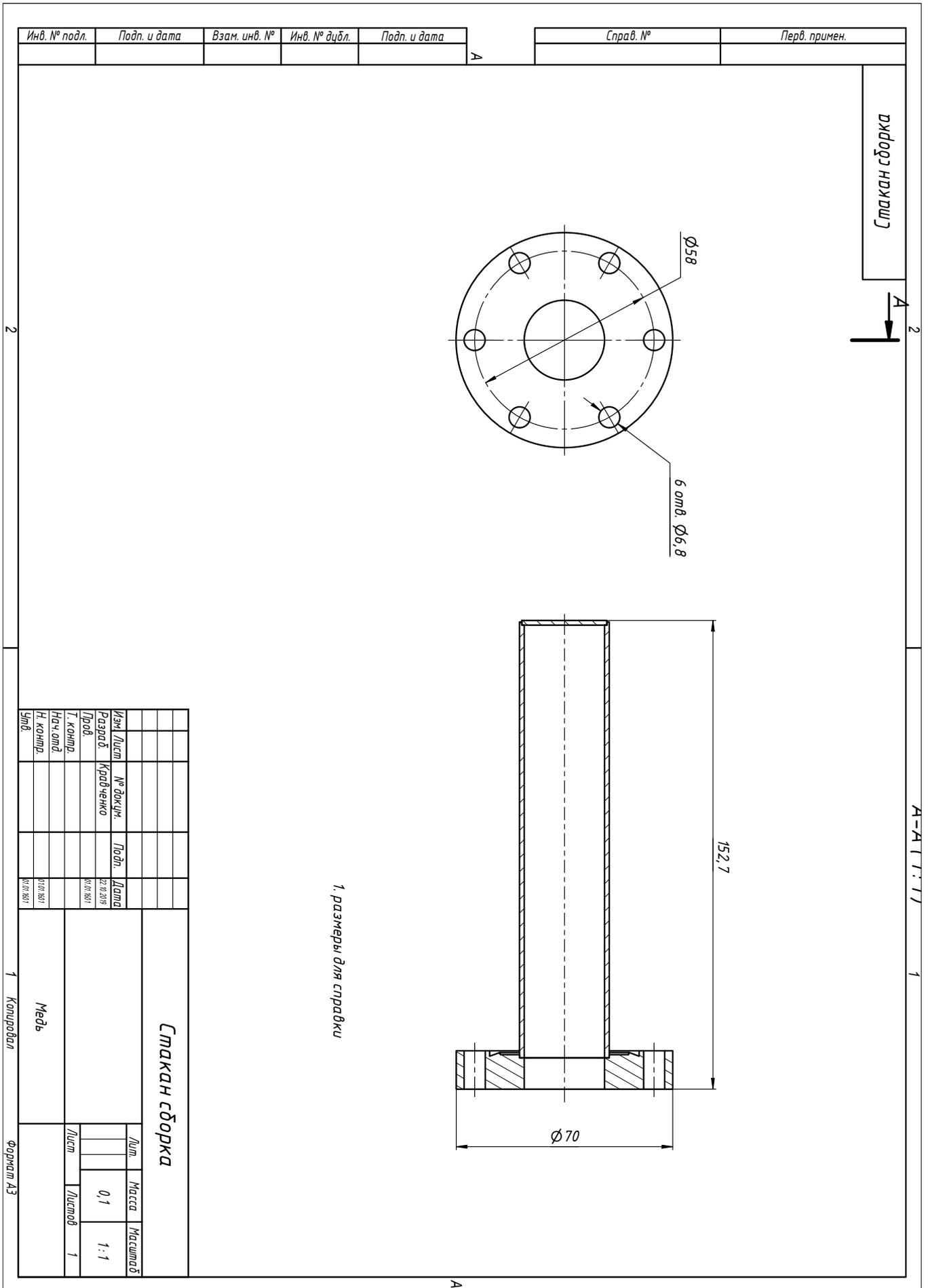
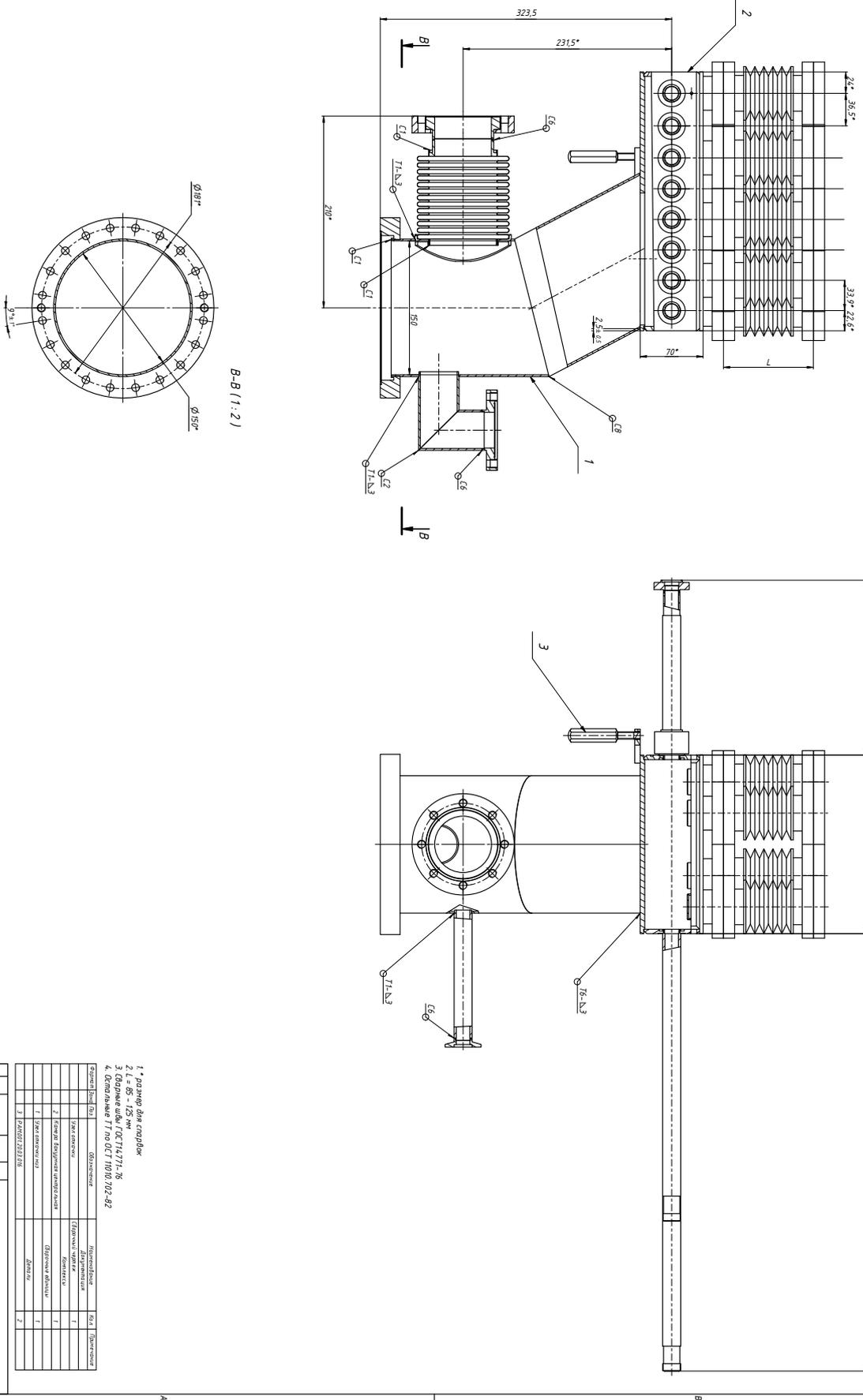


Рис. 3: Стакан системы спуска образца.



Ид. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Ид. № дил.	Подп. и дата	Специ. №	Перв. примок
-------------	--------------	--------------	------------	--------------	----------	--------------

1 * размер для справок
 2 L = 65 - 125 мм
 3. Обозначение ГОСТ 11417.1-78
 4. Ссылка на ТУ 02.110.01.02-82

Код	Наименование	Материал	Кол-во	Примечание
1	Корпус	Л590	1	
2	Помповый вал	Л590	1	
3	Помповый вал	Л590	1	
4	Помповый вал	Л590	1	
5	Помповый вал	Л590	1	
6	Помповый вал	Л590	1	
7	Помповый вал	Л590	1	
8	Помповый вал	Л590	1	
9	Помповый вал	Л590	1	
10	Помповый вал	Л590	1	
11	Помповый вал	Л590	1	
12	Помповый вал	Л590	1	
13	Помповый вал	Л590	1	
14	Помповый вал	Л590	1	
15	Помповый вал	Л590	1	
16	Помповый вал	Л590	1	
17	Помповый вал	Л590	1	
18	Помповый вал	Л590	1	
19	Помповый вал	Л590	1	
20	Помповый вал	Л590	1	
21	Помповый вал	Л590	1	
22	Помповый вал	Л590	1	
23	Помповый вал	Л590	1	
24	Помповый вал	Л590	1	
25	Помповый вал	Л590	1	
26	Помповый вал	Л590	1	
27	Помповый вал	Л590	1	
28	Помповый вал	Л590	1	
29	Помповый вал	Л590	1	
30	Помповый вал	Л590	1	
31	Помповый вал	Л590	1	
32	Помповый вал	Л590	1	
33	Помповый вал	Л590	1	
34	Помповый вал	Л590	1	
35	Помповый вал	Л590	1	
36	Помповый вал	Л590	1	
37	Помповый вал	Л590	1	
38	Помповый вал	Л590	1	
39	Помповый вал	Л590	1	
40	Помповый вал	Л590	1	
41	Помповый вал	Л590	1	
42	Помповый вал	Л590	1	
43	Помповый вал	Л590	1	
44	Помповый вал	Л590	1	
45	Помповый вал	Л590	1	
46	Помповый вал	Л590	1	
47	Помповый вал	Л590	1	
48	Помповый вал	Л590	1	
49	Помповый вал	Л590	1	
50	Помповый вал	Л590	1	

Рис. 4: Узел откачки.

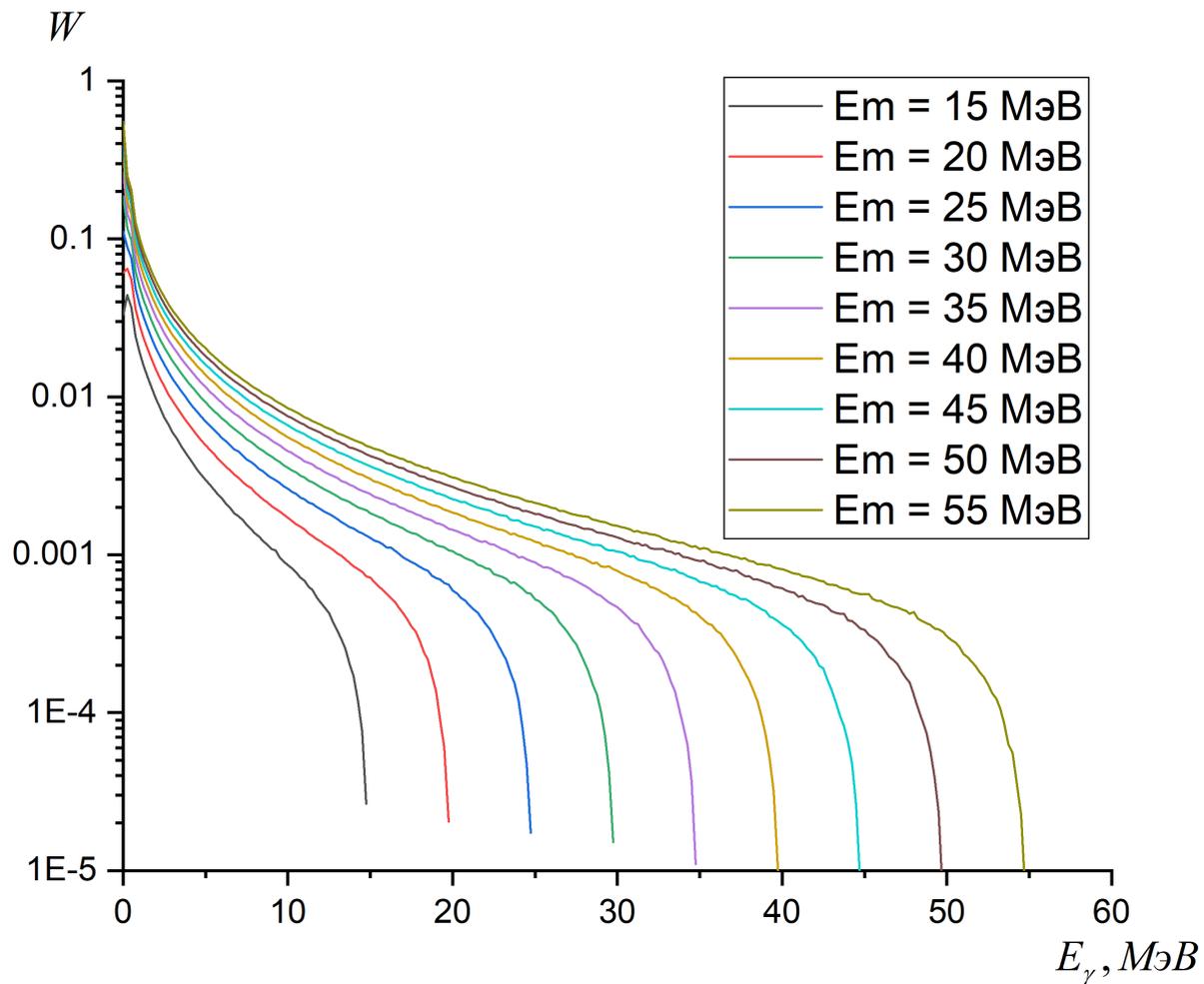


Рис. 5: Тормозные спектры гамма-квантов, образующиеся на стальной тормозной мишени для энергий электронов 15-55 МэВ.

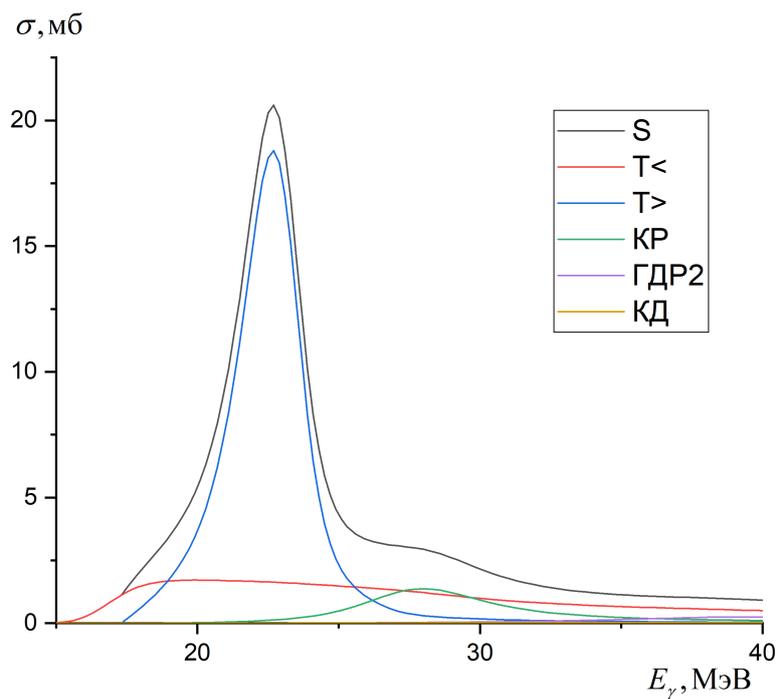


Рис. 6: Суммарное сечение реакции $^{100}\text{Mo}(\gamma, 1p)^{99}\text{Nb}$, сечения для различных механизмов фотоядерной реакции $^{100}\text{Mo}(\gamma, 1p)^{99}\text{Nb}$.

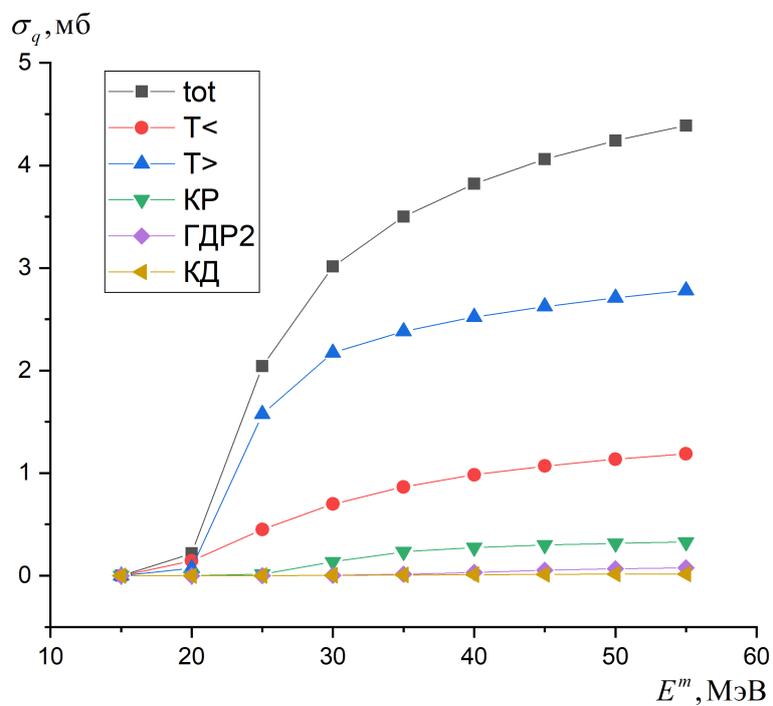


Рис. 7: Сечения на эквивалентный квант для различных механизмов фотоядерной реакции $^{100}\text{Mo}(\gamma, 1p)^{99}\text{Nb}$ в зависимости от энергии электронов E^m .