

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ДЕТЕКТОРОВ ЭКСПЕРИМЕНТА $BM@N$ В АРГОННОМ СЕАНСЕ С ЭНЕРГИЕЙ ПУЧКА 3,2А ГЭВ НА НУКЛОТРОНЕ

*В. А. Плотников<sup>а, 1</sup>, Л. Д. Ковачев<sup>а, б</sup>, А. И. Зинченко<sup>а</sup>*

<sup>а</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

<sup>б</sup> Институт механики, Болгарская академия наук, София

Представлены методики расчета и учета при моделировании, а также результаты, полученные для эффективностей детекторов центральной трековой системы, внешних трекеров и времяпролетных детекторов эксперимента  $BM@N$  на ускорительном комплексе нуклотрон/NICA при анализе выходов мезонов и легких фрагментов во взаимодействиях пучка аргона с энергией 3,2А ГЭВ с фиксированными мишенями.

Methods of calculation and accounting for modeling, and results obtained for the efficiencies of detectors of the central tracking system, external trackers, and time-of-flight detectors of the  $BM@N$  experiment at the Nuclotron/NICA accelerator complex in the analysis of meson and light fragment yields in the interactions of an argon beam with an energy of 3.2A GeV with fixed targets are presented.

PACS: 01.50.Pa; 07.77.Ka

### ВВЕДЕНИЕ

$BM@N$  («Барионная материя на нуклотроне») является первым действующим экспериментом на ускорительном комплексе нуклотрон/NICA. Среди трех основных экспериментов комплекса нуклотрон/NICA, как уже действующих, так и планируемых ( $BM@N$ , MPD, SPD), сфера ответственности  $BM@N$  — эксперименты на фиксированной мишени. На этапе ввода в эксплуатацию в конфигурации с ограниченным покрытием фазового пространства в  $BM@N$  регистрировались данные по столкновениям аргонного пучка энергии 3,2А ГЭВ с набором фиксированных мишеней [1, 2]. Для анализа выходов мезонов, а также легких фрагментов ядер по экспериментальным данным предложена методика и выполнена оценка эффективностей детекторов (ЭД) установки.

ЭД установки является одним из основных параметров, закладываемых в моделирование методом Монте-Карло (МК) прохождения продуктов столкновения тяжелых ионов через экспериментальную установку. Она оценивается по экспериментальным

---

<sup>1</sup>E-mail: vplotnikov@jinr.ru

данным. Метод ее получения в представляемой работе основан на реконструкции заряженных треков. Оценка ЭД, рассчитанная этим методом, помимо эффективности регистрации сигналов детекторами включает эффективность алгоритмов реконструкции заряженных треков, использованных в анализе. Указанная оценка зависит от загрузки соответствующей области детекторов. Задача разделения эффективности регистрации сигналов и эффективности реконструкции не ставилась. Для каждого детектора, использованного в анализе, требовалось разработать алгоритм получения ЭД и вычислить такую комбинированную эффективность по экспериментальным данным.

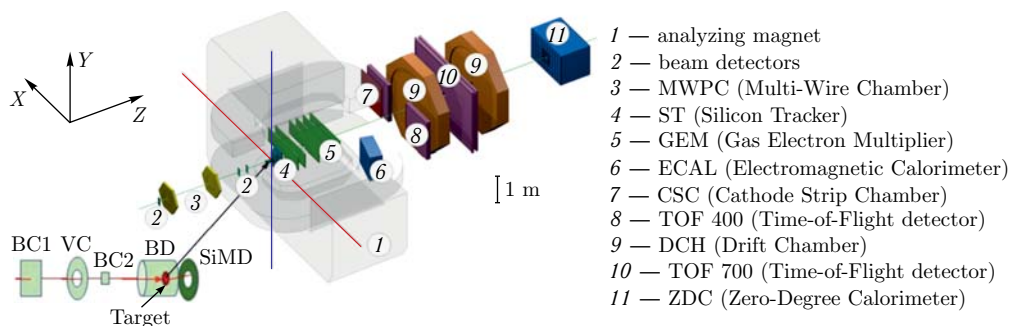
На этапе моделирования было необходимо эффективность, полученную по экспериментальным данным, заложить в алгоритмы реконструкции сигналов и выполнить ее настройку в соответствии с экспериментальной ЭД. По результатам применения ЭД в методе МК требовалось оценить остаточное расхождение эффективностей в моделировании и эксперименте, которое будет использовано в дальнейшем анализе в качестве одного из источников систематической погрешности.

Данная работа организована следующим образом. В разд. 1 описана экспериментальная установка. Разд. 2 посвящен описанию алгоритмов оценки ЭД для различных детекторов. Методика введения ЭД в моделирование представлена в разд. 3. В разд. 4 приводится сравнение ЭД, полученных по экспериментальным данным и в моделировании после введения экспериментальных ЭД. Наконец, дано обобщение полученных результатов.

## 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Установка  $BM@N$  является передним спектрометром, покрывающим диапазон псевдобыстроты  $1,6 \leq \eta \leq 4,4$ . Ее схема в аргонном сеансе представлена на рис. 1. Дополнительную информацию обо всех компонентах установки можно найти в работе [3]. Спектрометр включает центральную трековую систему, состоящую из 3 плоскостей передних кремниевых детекторов (ST) и 6 плоскостей детекторов, основанных на газовых электронных умножителях (GEM) [4]. Детекторы ST и GEM являются двухкоординатными стриповыми детекторами. Вертикальные стрипы плоскостей ST имеют шаг стрипов 95 мкм. Косые стрипы наклонены под углом к вертикали  $2,5^\circ$  и имеют шаг стрипов 103 мкм. Шаг стрипов детекторов GEM 800 мкм, и стереоугол между вертикальными и наклонными стрипами  $15^\circ$ . Центральная трековая система расположена далее по пучку относительно мишени внутри дипольного магнита, имеющего магнитную силу около  $\approx 2,1$  Тл·м и зазор 1,05 м между полюсами. В измерениях, представляемых здесь, центральная трековая система покрывала только верхнюю половину акцептанса магнита.

Две дрейфовые камеры (DCH), катодно-стриповая камера (CSC), два набора времяпролетных детекторов (ToF) и калориметр под нулевым углом (ZDC) расположены далее по пучку относительно дипольного магнита. Дрейфовые камеры содержат пары сигнальных проволок по четырем координатам с углами наклона  $0, 45, 90$  и  $135^\circ$ . Расстояние между проволоками 10 мм. Шаг стрипов в двухкоординатной камере CSC составляет 2,5 мм. Наклон стрипов по отношению к вертикали  $0$  и  $15^\circ$ . Камеры ToF-400 содержат вертикальные стрипы длиной 30 см с шагом 1,25 мм. ToF-700 включает ка-

Рис. 1. Схема установки  $BM@N$  в аргонном сеансе

меры двух типов. Камеры первого типа расположены в области ближе к пучку и содержат горизонтальные стрипы длиной 16 см и шагом 10 мм. Камеры второго типа размещены дальше от пучка и включают горизонтальные стрипы длиной 56 см и шагом 18 мм.

В детекторах GEM и CSC предусмотрены «горячие» и «холодные» зоны с отдельным считыванием. Во время проведения сеанса детекторы устанавливаются таким образом, чтобы пучок проходил вблизи центров «горячих» зон. Загрузка продуктами столкновения в «горячих» зонах при этом оказывается существенно больше, чем в остальной области детекторов. Раздельное считывание позволяет избежать реконструкции большого числа ложных хитов в «холодных» зонах из-за комбинаций их сигналов с сигналами из «горячих» зон.

Для триггирования событий использовались два пучковых счетчика (BC1, BC2), вето-счетчик (VC), баррель-детектор (BD) и кремниевый детектор множественности (SiMD).

В представляемой работе выполнена оценка эффективности передних кремниевых детекторов, детекторов GEM, ближней к мишени дрейфовой камеры, катодно-стриповой камеры и двух наборов времяпролетных детекторов: ToF-400 и ToF-700. Данные, набранные на каждой из твердых мишеней с различными атомными весами (C, Al, Cu, Sn, Pb), анализировались отдельно при получении физических результатов. В текущей работе для каждого из детекторов представлены ЭД, полученные интегрально по всем мишеням. Суммарно было проанализировано около 16,3 млн событий.

## 2. ОЦЕНКА ДЕТЕКТОРНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Реконструкция треков в центральной трековой системе основана на методе «клеточных автоматов» [5, 6], реализующем ограниченный комбинаторный поиск кандидатов в треки с их последующим фитингом с использованием фильтра Калмана для определения параметров трека. Эти треки используются для реконструкции первичной вершины в событии, а также для получения ЭД различных детекторов.

При расчете эффективности каждого из детекторов их чувствительная область делилась на прямоугольные ячейки. Размер ячеек для различных детекторов отличался. Эффективность для каждой ячейки считалась отдельно. Для ее расчета использовались треки минимально ионизирующих частиц (MIPs).

**2.1. Эффективность ST/GEM.** Размер ячеек, использованных для кремниевых и GEM-детекторов, был выбран  $1 \times 1$  см. Для расчета эффективности использовались треки, подходящие по критериям качества (пробники). Пробники анализировались только в событиях, прошедших критерии отбора.

К событиям предъявлялись следующие требования:

- в событии должна быть реконструирована вершина взаимодействия;
- реконструированная вершина должна находиться в окрестности мишени;
- в реконструкции вершины должны участвовать не менее 3 треков, каждый из которых состоит не менее, чем из 4 хитов (из 9 детектирующих станций).

Пробники удовлетворяли критериям отбора, перечисленным ниже:

- трек должен участвовать в реконструкции вершины;
- трек должен содержать не менее 4 хитов (из 9 станций);
- для расчета эффективности ST (GEM) станций трек должен содержать не менее 2 (4) хитов в ST (GEM) станциях (из 3 (6) станций);
- трек должен иметь импульс больше 2 ГэВ/с и не превосходить 5 ГэВ/с.

Основной задачей использования критериев отбора на события и треки было избежать использования при оценке эффективности ложных треков и треков с плохо восстановленными параметрами. Требование на минимальный импульс трека применялось, так как вероятность реконструкции таких треков возрастает с уменьшением импульса. Это связано с недостаточным учетом многократного рассеяния в алгоритмах экстраполяции треков, а также неопределенностями в измеренной карте магнитного поля. Указанная верхняя граница на импульс трека включает область выходов протонов, являющихся продуктами фрагментации ядер пучка в результате столкновения и представляющих собой основные по числу производимые частицы, и отсекает треки с нефизическими большими импульсами. Верхняя граница может быть несколько увеличена, чтобы включить треки легких фрагментов ядер. Однако их количество невелико и не оказывает существенного влияния на вычисление ЭД.

Алгоритм расчета эффективности для каждой мишени следующий. Используются два глобальных счетчика для определения эффективности каждой ячейки в каждой станции ST и GEM: для знаменателя и для числителя. Выполняется цикл по всем событиям. Для событий, удовлетворяющих критериям отбора, выполняется цикл по всем трекам. Треки, подходящие под критерии пробника, используются для расчета эффективности. Выполняется цикл по всем станциям ST и GEM. Если число хитов в оставшихся станциях ST (GEM), кроме текущей, удовлетворяет критерию на число хитов для пробника, то определяется ячейка. Для случая, когда трек содержит хит в текущей станции, ячейка определяется по координатам хита  $x$  и  $y$ . В противном случае с использованием фильтра Калмана пробник экстраполируется в положение текущей станции по оси  $Z$  и определяются его координаты  $x$  и  $y$ . Выполняется проверка на принадлежность найденных координат станции. Если трек проходит мимо текущей станции, то счетчики не меняются. Иначе ячейка определяется по координатам точки экстраполяции. При успешном нахождении ячейки знаменатель увеличивается на единицу. Числитель увеличивается на единицу, если трек имеет хит в текущей станции.

После завершения всех циклов для каждой ячейки в каждой станции ST и GEM числитель и знаменатель просуммированы по всем событиям в аргонном сеансе, а затем эффективность для каждой ячейки вычислена как отношение суммы в числителе

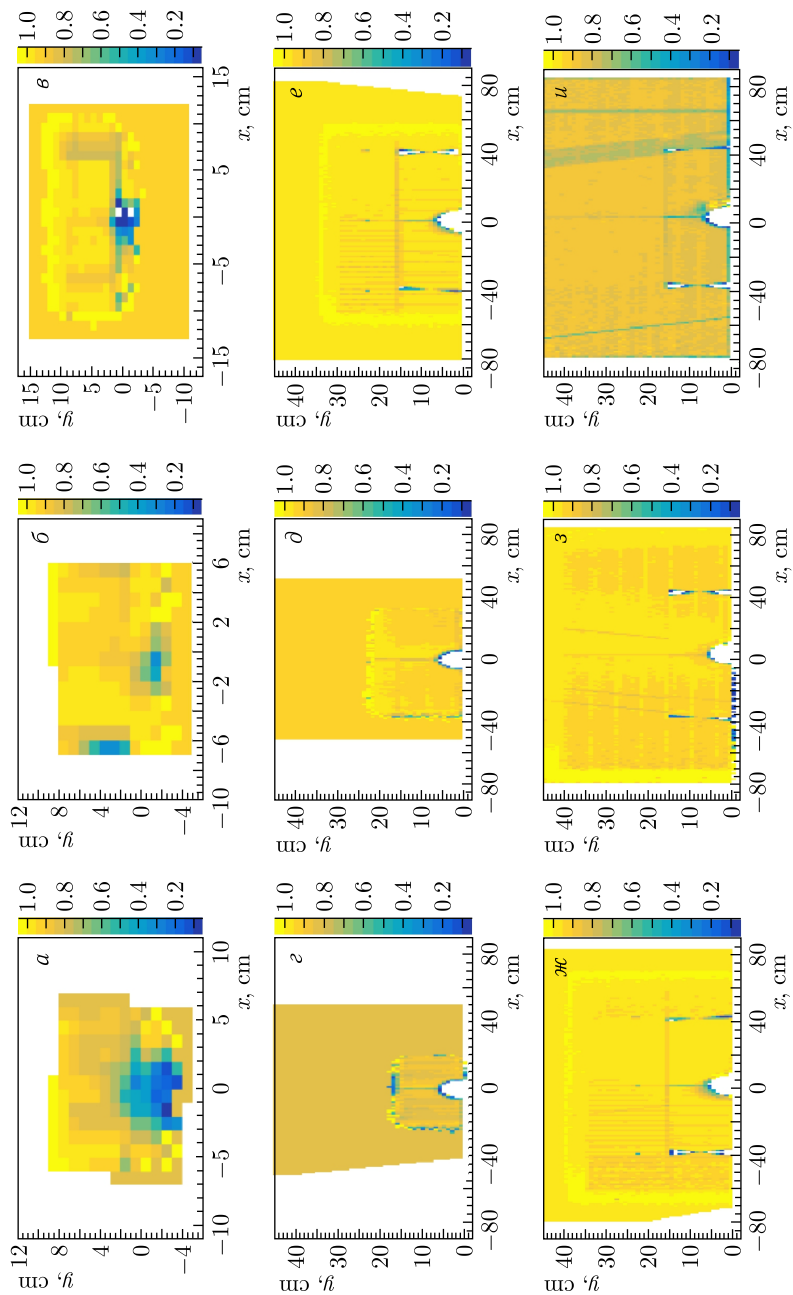


Рис. 2. Двумерное распределение эффективности в плоскости  $XY$  станций  $ST$  и  $GEM$  для положительно заряженных треков по всем аргонным данным: а)  $ST1$ ; б)  $ST2$ ; в)  $ST3$ ; г)  $GEM1$ ; д)  $GEM2$ ; е)  $GEM3$ ; ж)  $GEM4$ ; з)  $GEM5$ ; и)  $GEM6$ .

к сумме в знаменателе. На рис. 2 представлены двумерные эффективности всех станций ST и GEM, полученные описанным выше методом. Станции нумеруются по мере удаления от мишени.

Во всех кремниевых станциях в центральных областях, где проходил пучок, наблюдается пониженная эффективность. В станции ST2 на краю при отрицательных значениях  $x$  эффективность понижена из-за наличия неработавших стрипов в этой области. В остальных частях кремниевых станций эффективность составляет около 80%. При прохождении пучка и его фрагментов непосредственно через чувствительные области детекторов в последних генерировался очень большой сигнал, вызванный большим зарядом ионов пучка и фрагментов. Из-за большой загрузки в процессе реконструкции генерировалось много ложных хитов. С другой стороны, большая ионизация от пучка и его фрагментов могла приводить к нерегистрации или искажению сигналов от однозарядных продуктов столкновения в мишени. Поэтому охарактеризовать детально гистограммы эффективности для кремниевых станций достаточно сложно и это выходит за рамки представляемого анализа.

Ситуация с сигналами со станций GEM существенно проще. Пучок и его фрагменты проходили через отверстия для пучка, имеющиеся в каждой станции GEM. На рис. 2,  $g$ -и отверстия для пучка соответствуют арки в нижних частях распределений. Физически все станции GEM имели одинаковые размеры. Однако для первых двух станций электроника по краям вдоль оси  $X$  не была подключена. На соответствующих гистограммах это выглядит, как белые вертикальные полосы без информации об эффективности. Аналогичные участки без эффективности, имеющие наклонные границы, присутствуют на станциях GEM3 и GEM4. В целом эффективность по всем станциям GEM достаточно высокая. Однако видно, что на крайних станциях (GEM1 и GEM6) она понижена. Это связано с особенностями алгоритма реконструкции треков. Аналогичный эффект наблюдался и в предыдущем сеансе на пучке ионов углерода. Для станции GEM6 также наблюдались провалы эффективности, причиной которых являлись технические проблемы с регистрирующей электроникой, возникавшие в процессе проведения аргонового сеанса. На гистограмме эффективности для каждой станции GEM видны две области: область с детальной структурой, охватывающая отверстие для пучка, и область равномерной эффективности, расположенная дальше от отверстия для пучка. В области с детальной структурой ячейки имеют разную эффективность. В области равномерной эффективности всем ячейкам установлена одинаковая усредненная эффективность. Для GEM1 область равномерной эффективности соответствует  $x < -25$  см,  $x > 20$  см и  $y > 18$  см; для GEM2:  $x < -40$  см,  $x > 33$  см,  $y > 22$  см; для GEM3:  $x < -60$  см,  $x > 58$  см,  $y > 34$  см; для GEM4:  $x < -70$  см,  $x > 70$  см,  $y > 40$  см. В станциях GEM5 и GEM6 область с усредненной эффективностью отсутствует. В моделировании лишь малая доля треков проходит через области GEM, где используется усредненная эффективность. Влияние таких треков на результаты анализа незначительно.

При переходе от первых станций GEM к последним область с детальной структурой растет. Это область, через которую алгоритм реконструкции смог провести треки из первичной вершины (первичные треки). Ясно, что первичные треки расходятся все сильнее при удалении от мишени, что и приводит к росту области с детальной структурой.

Вид области с детальной структурой является отражением физической конструкции станций GEM. На всех гистограммах для станций GEM видна вертикальная граница двух модулей, левого и правого, около  $x = 0$ , из которых состоит каждая станция GEM. На гистограммах для GEM3–GEM6 достаточно хорошо видна граница «горячей» и «холодной» зон. Это вертикальные участки с низкой или нулевой эффективностью около  $x = \pm 40$  см и горизонтальные полосы около  $y = 15$  см.

На распределениях эффективности для станций GEM3–GEM6 хорошо видны узкие вертикальные и наклонные полосы с пониженной эффективностью. Они соответствуют неработающим или шумящим стрипам (стрипам с большими наводками электроники). На распределении для станции GEM6 видны более широкие вертикальные и наклонные полосы с пониженной эффективностью. При анализе двумерной эффективности для станции GEM6 отдельно по наборам событий (в среднем включающим 200 тыс. событий, называемым ранами и имеющим числовой идентификатор) было обнаружено, что в основной части ранов соответствующие области имеют высокую эффективность и не отличаются от окружающих областей. Однако в некоторых ранах эффективность этих областей равна нулю. В качестве иллюстрации на рис. 3 приведены двумерные распределения эффективности для ранов 1 и 2. Для рана 1 видно, что около  $x = 70$  см расположена вертикальная полоса с нулевой эффективностью, остальная часть станции за исключением границы «горячей» и «холодной» зон имеет ненулевую эффективность. Для рана 2 указанная вертикальная полоса отсутствует, т. е. работоспособность электроники соответствующей области была восстановлена, однако перестала работать электроника наклонного блока стрипов левее. На основании этой информации был сделан вывод, что указанные области соответствуют блокам стрипов, подключенным к одним блокам электроники, которые иногда выходили из строя. Горизонтальные структуры, наблюдающиеся в GEM2, GEM5 и GEM6, связаны с границами отдельных секторов высокого напряжения.

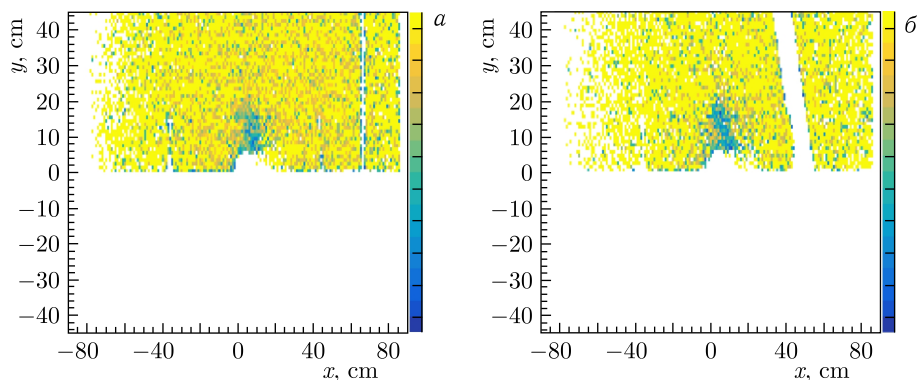


Рис. 3. Двумерная эффективность в плоскости  $XY$  станции GEM6 для положительно заряженных треков: а) для рана 1; б) для рана 2

Области равномерной эффективности в распределениях для станций ST и GEM на рис. 2 соответствуют рабочим областям этих станций, в которых не были обнаружены пробники. Для ячеек из данных областей устанавливалась средняя эффективность, рассчитанная по ячейкам станции, где пробники были обнаружены. Такой подход

обеспечивает возможность регистрации треков в моделировании в тех областях детекторов, в которых нет информации из экспериментальных данных.

По результатам анализа для станций ST получена эффективность в интервале 70–90%. Для станций GEM1 и GEM6 эффективность составила около 80%. Для остальных станций GEM получена эффективность около 90%.

К снижению эффективности детекторов GEM приводили кратковременные сбросы высокого напряжения (trips) из-за нестабильности выбросов пучка по интенсивности.

**2.2. Эффективность CSC.** Для оценки ЭД катодно-стриповой камеры ее чувствительная область была разделена на  $25 \times 25$  ячеек. Размер каждой ячейки составил примерно  $4,5 \times 4,5$  см. По аналогии с расчетом эффективности в станциях ST и GEM для расчета эффективности CSC отбирались только треки-пробники, удовлетворяющие ряду критериев. К событиям специальные требования не предъявлялись.

Пробники соответствуют следующим условиям:

- импульс трека должен быть не меньше 1 ГэВ/с;
- трек должен включать 4 или более хита GEM (из 6 станций), а общее количество хитов ST и GEM должно быть не менее 5 (из 9 станций);
- трек должен экстраполироваться в область положения мишени (в положении  $z = 0$  см  $-4 < x < 4$  см и  $1 < y < 4$  см);
- трек должен иметь подтверждение (хит) в детекторе ToF-400.

Использование дополнительного по сравнению с алгоритмом расчета эффективности ST и GEM требования на подтверждение пробника в еще одном независимом детекторе позволило заметно улучшить качество пробников.

Использование первого условия на пробники позволяет уменьшить неопределенность экстраполяции треков из-за многократного рассеяния в материале детекторов и погрешностей измерения карты магнитного поля. При увеличении числа хитов в треке надежность его восстановления и качество параметров заметно возрастают. Поэтому для отбора надежных треков использовано второе условие на количество хитов. Третье условие позволяет использовать для оценки ЭД треки частиц, образованных при взаимодействии на мишени. Именно такие треки нас интересуют в дальнейшем физическом анализе.

Алгоритм расчета числителя и знаменателя каждой отдельной ячейки CSC повторяет шаги, сделанные при расчете эффективности ST и GEM. Считается, что трек имеет хит в CSC, если хит расположен внутри окрестности точки экстраполяции трека в координату  $z$  CSC. Размер окрестности зависит от импульса трека и получается из экспериментальных данных. Указанный размер соответствует  $2,5\sigma$  распределения невязок (residuals) хитов к координатам экстраполированных треков. На рис. 4 показана двумерная эффективность CSC. Из-за ограниченной конфигурации плоскостей GEM была оценена эффективность CSC только в области  $y > -5$  см. Вертикальная полоса с пониженной эффективностью около  $x = 110$  см соответствует специальной нити поддержки анодных проволок. Для части ранов была обнаружена неисправная область CSC. На рис. 4, а, полученном на небольшой статистике, она видна в левом верхнем углу и выделяется сине-зеленым цветом. Причина пониженной эффективности заключается в неисправности платы front-end электроники.

Из анализа были исключены раны с пониженной эффективностью. На рис. 4, б представлена эффективность CSC по всем аргонным ранам, где усредненная эффек-



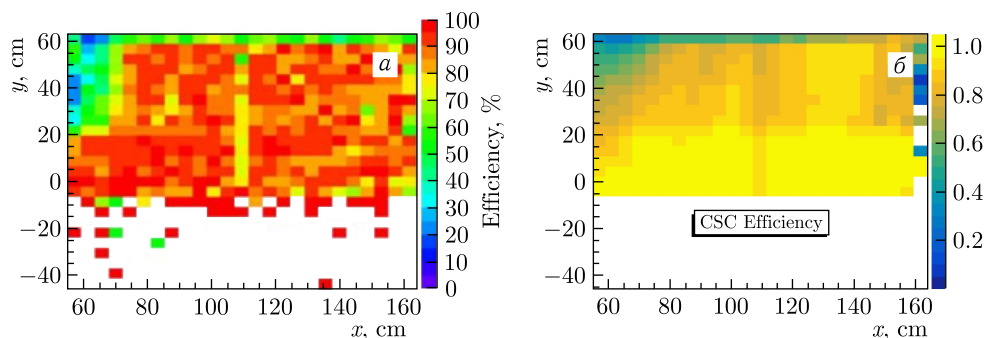


Рис. 4. Двумерная эффективность в плоскости  $XY$  CSC для положительно заряженных треков: а) по ранам с пониженной эффективностью; б) по всем аргонным ранам с достаточно высокой эффективностью CSC (детали в тексте)

тивность «холодного» модуля, занимающего область  $y > 20$  см, не ниже 50%. Неисправная область в левом верхнем углу выражена менее явно. Это связано с восстановлением работоспособности соответствующей области в части ранов. Однако в дальнейшем анализе эта область CSC исключалась из анализа. Треки, проходящие по результатам экстраполяции через нее, автоматически считались подтвержденными.

В обоих «горячих» модулях (область  $y < 20$  см) получена эффективность выше 90%. В левой части камеры, которая расположена ближе к пучку, эффективность несколько понижена по сравнению с остальной областью этих модулей. Это может быть связано с повышенной загрузкой треками указанной области, как показано на рис. 5. В верхнем «холодном» модуле эффективность ниже и составляет в среднем 75–80%.

**2.3. Эффективность ToF-400.** Детектор ToF-400 состоит из четырех стоек по пять камер mRPC в каждой. Две стойки расположены слева по направлению пучка ( $x > 0$ ) и две — справа. В каждой стойке камеры mRPC расположены по вертикали одна под другой с небольшим перекрытием. В текущем анализе использовались только камеры mRPC слева от пучка, которые частично или полностью были расположены в области  $y > 0$ . Данные камеры в основном регистрировали положительно заряженные частицы.

ЭД определялась отдельно для каждой камеры mRPC. Размер камеры mRPC вдоль оси  $X$  составляет примерно 60 см, а вдоль оси  $Y$  — примерно 30 см. В плоскости  $XY$  камера имеет прямоугольную форму. Для получения эффективности была использована сетка, состоящая из  $10 \times 6$  ячеек размером около  $6 \times 5$  см. Так же, как и для

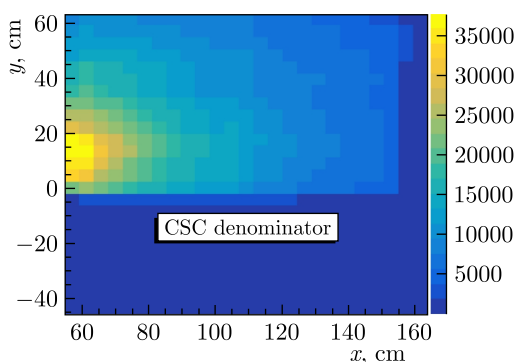


Рис. 5. Число попаданий пробников в ячейки сетки для расчета эффективности (суммарный знаменатель)

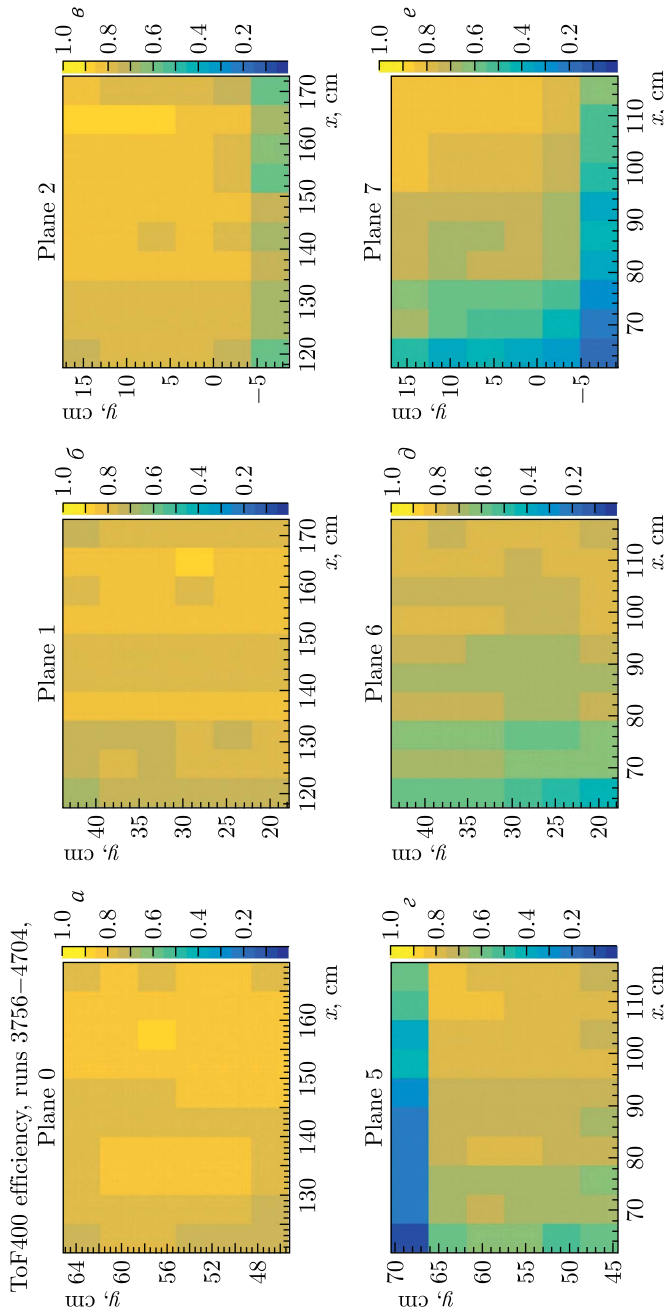


Рис. 6. Двумерная эффективность в плоскости XY камер mRPC ТоF-400 для положительно заряженных треков по всем аргонным ранам с достаточно высокой эффективностью CSC (детали в тексте): а) mRPC 0; б) mRPC 1; в) mRPC 2; г) mRPC 3; д) mRPC 4; е) mRPC 5; з) mRPC 6; и) mRPC 7

CSC при вычислении эффективности ToF-400 использовались только треки-пробники, подходящие по критериям качества. На события условия не накладывались.

Пробники соответствуют следующим условиям:

- импульс трека должен быть в диапазоне от 1 до 2,5 ГэВ/с;
- трек должен включать 4 и более хита GEM (из 6 станций), а общее количество хитов ST и GEM должно быть не менее 5 (из 9 станций);
- трек должен экстраполироваться в область положения мишени (в положении с  $z = 0$  см  $-4 < x < 4$  см и  $1 < y < 4$  см);
- трек должен иметь подтверждение (хит) в детекторе CSC.

Первое условие связано с отклонением положения трека от физической траектории соответствующей частицы и аналогично условию для CSC (см. п. 2.2). При импульсах трека больше 1 ГэВ/с указанное отклонение становится несущественным.

Остальные шаги процедуры вычисления эффективности ToF-400 повторяют соответствующие шаги для CSC. Небольшим изменением является то, что даже если точка экстраполяции пробника не попадает в границы камеры mRPC, но лежит достаточно близко, чтобы попасть в динамическое окно сопоставления трека с хитом ToF-400, то такой трек используется для вычисления эффективности.

На рис. 6 представлена двумерная эффективность камер mRPC ToF-400, участвующих в анализе. Используются аргонные раны, отобранные по эффективности CSC (см. п. 2.2).

По всем камерам mRPC наблюдается достаточно равномерное распределение эффективности без явных эффектов особенностей конструкции. В камерах mRPC 0–2, расположенных дальше от пучка, эффективность выше и составляет в среднем примерно 80%. Для камер 5–7, расположенных ближе к пучку, эффективность заметно меняется вдоль оси  $X$  от 80% на дальней от пучка границе до 50% на ближней к пучку границе. Эффективность на ближней к пучку границе уменьшается от камеры 5 к камере 7, что коррелирует с величиной загрузки в камере, как это можно видеть из рис. 5.

**2.4. Эффективность DCH.** Размер сетки для оценки ЭД дрейфовой камеры составил  $75 \times 75$  ячеек размером примерно  $4 \times 4$  см каждая. Как и для остальных детекторов, при вычислении эффективности DCH использовались только треки-пробники, подходящие по критериям качества. Условия для отбраковки событий не применялись.

Первые три условия, накладываемые на пробники, эквивалентны соответствующим условиям для CSC. Дополнительным условием для DCH было подтверждение (хит) в детекторе ToF-700 в пределах определенного расстояния относительно экстраполированного трека. Указанное расстояние составляло  $3\sigma$  распределения невязок хитов относительно координат экстраполированных треков, построенного по полному набору данных аргонного сеанса.

Для каждой ячейки DCH использовался такой же алгоритм расчета числителя и знаменателя, что и для CSC. По аналогии с CSC для DCH из экспериментальных данных получены размеры окрестности, внутри которой хит DCH ищется около точки экстраполяции трека, в зависимости от импульса. На рис. 7 показана двумерная эффективность DCH, рассчитанная на основе экспериментальных данных.

Ввиду неполного акцептанса станций GEM эффективность DCH получена исключительно для верхней полуплоскости с  $y > -5$  см. Пониженная эффективность около

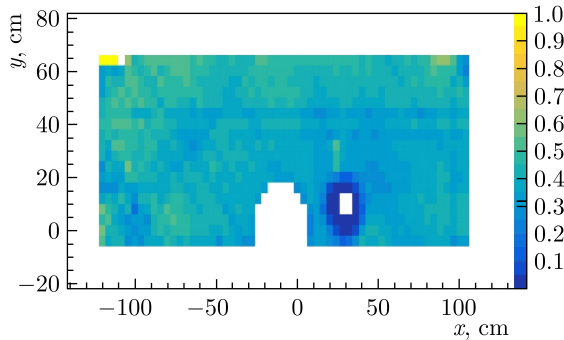


Рис. 7. Двумерная эффективность DCH в плоскости  $XY$  из экспериментальных данных

$x = 30$  см,  $y = 15$  см является следствием ограничений, накладываемых на треки DCH в области пучка для корректной работы алгоритма их восстановления.

Пониженная эффективность DCH объясняется пониженным напряжением на камере для стабильной работы в пучке ионов Ag. Периодические сбросы высокого напряжения из-за нестабильной интенсивности пучка также снижали эффективность DCH.

**2.5. Эффективность ToF-700.** Детектор ToF-700 состоит из 59 камер mRPC. Они расположены в 4 различных по оси  $Z$  плоскостях с небольшим перекрытием. ЭД определялась целиком для всего детектора. Использовалась сетка из  $100 \times 75$  ячеек размером примерно  $4 \times 4$  см. Расчет эффективности для ToF-700 аналогичен расчету для DCH.

Три начальных условия на пробники соответствуют условиям для CSC. Для отбора качественных треков также требуется их подтверждение (хит) в детекторе DCH в пределах  $3\sigma$  относительно координат экстраполированного трека.

На рис. 8 показана двумерная эффективность камер ToF-700. Пониженная эффективность около  $x = 40$  см,  $y = 15$  см связана с большой загрузкой ToF-700. Неэффективность около  $x = 30$  см,  $y = 30$  см обусловлена проблемами в работе одной из камер mRPC. Также наблюдается пониженная эффективность в крайних стрипах детектора ToF-700, связанная с краевыми эффектами алгоритма ее расчета.

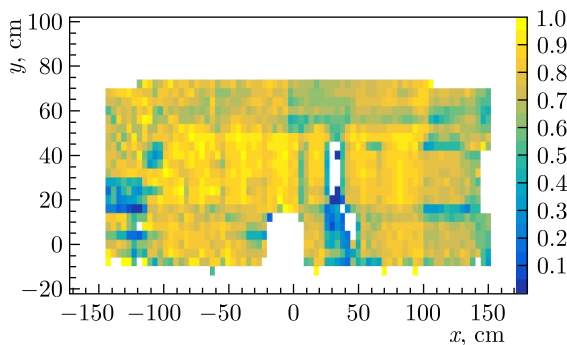


Рис. 8. Двумерная эффективность ToF-700 в плоскости  $XY$  из экспериментальных данных

### **3. МЕТОД ВВЕДЕНИЯ ДЕТЕКТОРНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ В МОДЕЛИРОВАНИЕ**

На этапе моделирования реализована та же цепочка реконструкции и идентификации заряженных треков, а также оценки ЭД, что и для экспериментальных данных. В качестве метода введения ЭД в методе МК использовано случайное подавление сигналов с определенной вероятностью.

В процессе анализа был выработан метод итерационного приближения ЭД в моделировании к полученной из экспериментальных данных. Суть метода заключается в следующем. На первом этапе в моделировании коррекция ЭД не производится. Она вычисляется по тем же алгоритмам, что и для экспериментальных данных. Для каждой пространственной ячейки получается коэффициент коррекции. В текущем анализе были опробованы два вида коэффициента коррекции: отношение эффективности из данных к эффективности, полученной методом МК, и разность между эффективностью из данных и полученной методом МК. На втором этапе полученные коэффициенты коррекции применяются для каждой пространственной ячейки при повторной реконструкции сигналов для их подавления в методе МК. На основе вновь полученного набора хитов восстанавливаются треки. С использованием этих треков повторно вычисляется ЭД. Выполняется оценка достаточности сближения ЭД в методе МК и данных. При необходимости итерации коррекции ЭД повторяются до тех пор, пока ЭД в методе МК не станет достаточно близка к экспериментальным данным.

Опыт применения коэффициентов коррекции обоих видов показал, что оптимальность выбора одного из коэффициентов с точки зрения скорости сходимости ЭД в МК к данным зависит от конкретного детектора и детекторной станции. То есть в одних случаях сходимость происходит быстрее при выборе коэффициента одного вида, а в других случаях — другого. В целом было обнаружено, что в большинстве случаев скорость сходимости использованного метода высока и для обеспечения хорошего согласия между ЭД в МК и данных достаточно 2–3 итераций в независимости от выбора вида коэффициента коррекции. В некоторых случаях требовалось 4–5 итераций.

Была выполнена автоматизация указанного метода коррекции ЭД в моделировании и интеграция его в разработанную программную систему анализа.

### **4. СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТЕЙ В МОДЕЛИРОВАНИИ И ЭКСПЕРИМЕНТЕ**

Для каждого из детекторов ЭД в данных и в методе МК сравнивалась следующим образом. Для каждого бина по оси  $X$  из соответствующей двумерной гистограммы по всем бинам по оси  $Y$  отдельно просуммированы числитель и знаменатель, из которых получалась эффективность. Затем суммарный числитель для данного бина по оси  $X$  поделен на суммарный знаменатель. В результате для данных и для моделирования получены одномерные гистограммы, которые сопоставлялись.

На рис. 9–13 представлено сравнение ЭД из моделирования и из эксперимента для используемых детекторов. Для ST и GEM (рис. 9) сопоставление выполнено по станциям. Для CSC (рис. 10) сравнение сделано по трем областям, расположенным по вертикали одна под другой. ЭД камер mRPC ToF-400 (рис. 11) сравнивались отдельно. Сопоставление эффективностей детекторов DCH и ToF-700 (рис. 12 и 13)

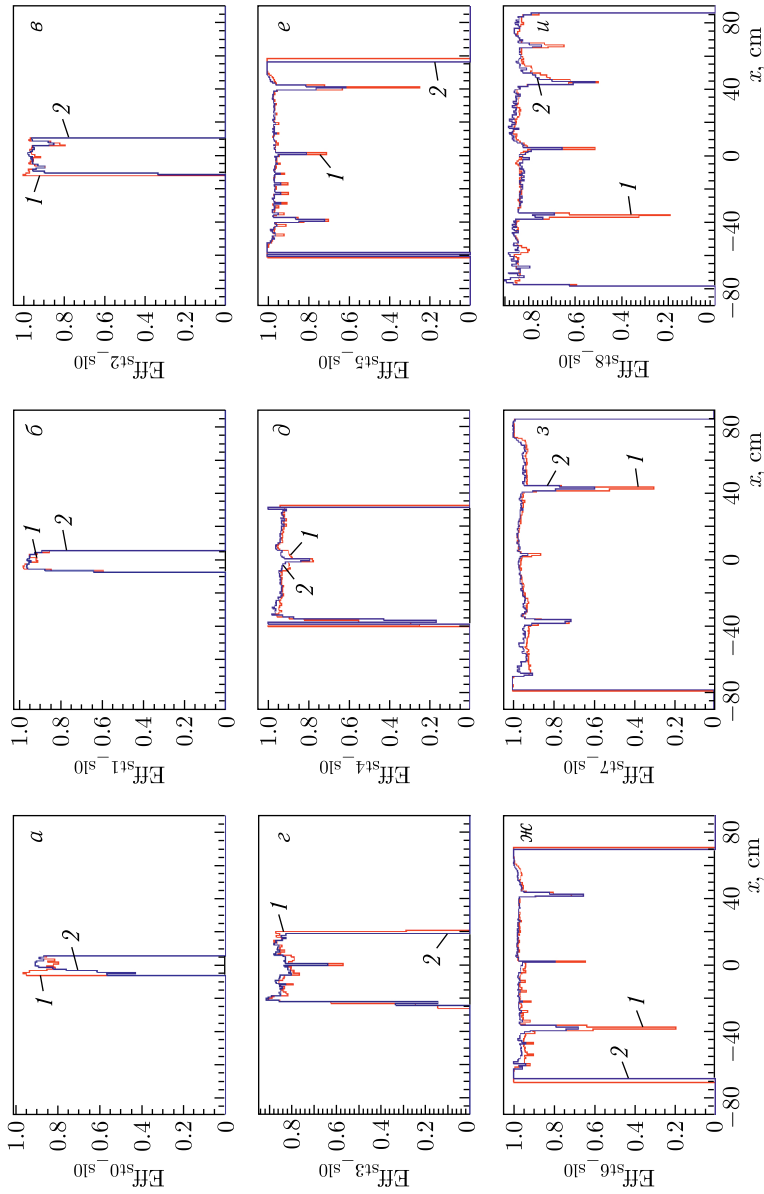


Рис. 9 (цветной в электронной версии). Распределение эффективности по оси  $X$  для станций ST и GEM: а) ST1; б) ST2; в) ST3; г) GEM1; д) GEM2; е) GEM3; ж) GEM4; з) GEM5; и) GEM6. Данные (красные гистограммы, 1) и моделирование (синие гистограммы, 2)

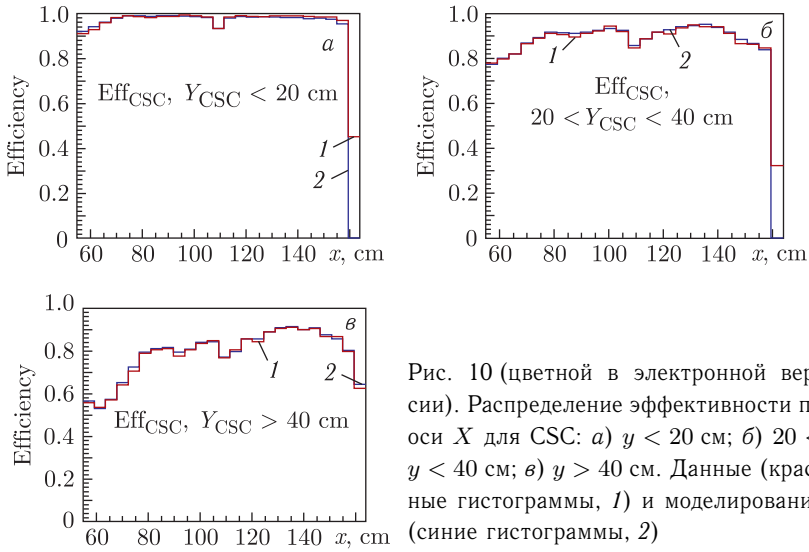


Рис. 10 (цветной в электронной версии). Распределение эффективности по оси  $X$  для CSC: а)  $y < 20$  см; б)  $20 < y < 40$  см; в)  $y > 40$  см. Данные (красные гистограммы, 1) и моделирование (синие гистограммы, 2)

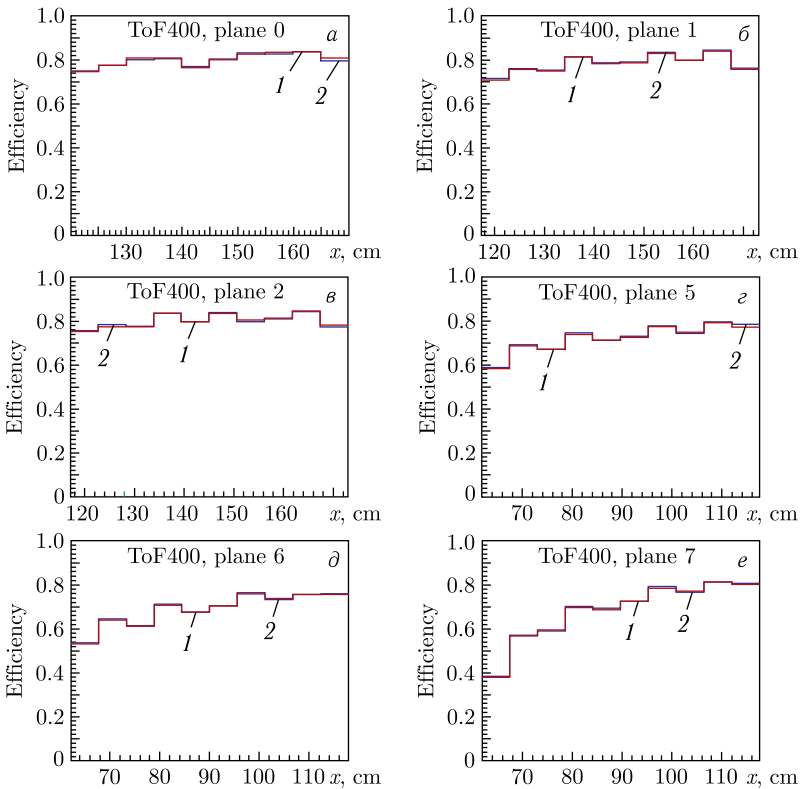


Рис. 11 (цветной в электронной версии). Распределение эффективности по оси  $X$  для камер ToF400: а) mRPC 0; б) mRPC 1; в) mRPC 2; г) mRPC 5; д) mRPC 6; е) mRPC 7. Данные (красные гистограммы, 1) и моделирование (синие гистограммы, 2)

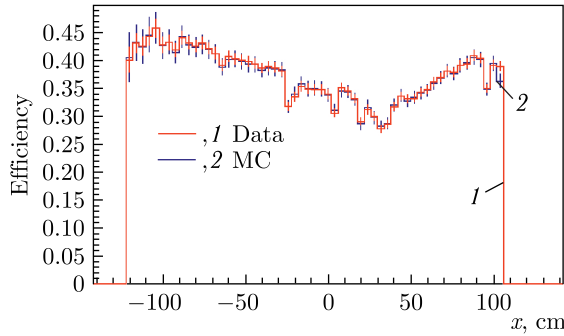


Рис. 12 (цветной в электронной версии). Распределение эффективности по оси  $X$  для DCH. Данные (красная гистограмма, 1) и моделирование (синяя гистограмма, 2)

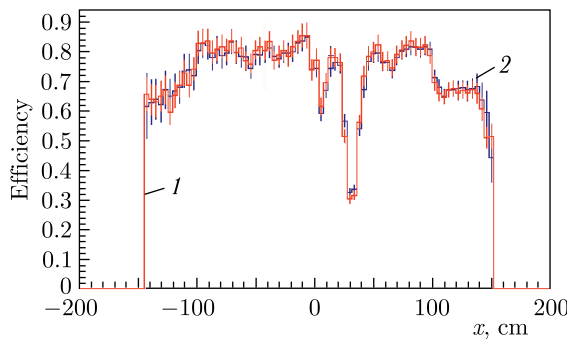


Рис. 13 (цветной в электронной версии). Распределение эффективности по оси  $X$  для ToF-700. Данные (красная гистограмма, 1) и моделирование (синяя гистограмма, 2)

выполнено целиком по всей их площади в плоскости  $xy$ . Во всех случаях наблюдается хорошее согласие. Систематическая неопределенность из-за отклонения ЭД для станций ST и GEM не превосходит 3%. Для каждого из оставшихся детекторов систематическая неопределенность оценена в 5%.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлена методика расчета ЭД для детекторов эксперимента VM@N, использованных для анализа выходов мезонов и легких фрагментов в аргонном сеансе. ЭД оценены по экспериментальным данным и введены в моделирование. Для имплементации ЭД в МК разработан метод, основанный на итерационном применении коэффициентов коррекции для каждой пространственной ячейки детекторов. Указанный метод автоматизирован в рамках программной системы анализа. Результаты применения эффективностей в моделировании сопоставлены с экспериментальными. Получено достаточное согласие. Оценена систематическая неопределенность из-за остаточного расхождения ЭД в моделировании и экспериментальных данных. Ее величина составила 3% для детекторов центральной трековой системы и 5% для внешних треков и времяпролетных детекторов.



**Благодарности.** Авторы благодарны за поддержку HybridLIT ОИЯИ, проект HPC Village, и группе HGPU за предоставление вычислительных ресурсов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kapishin M. (for the  $BM@N$  Collab.)*. Studies of Baryonic Matter at the  $BM@N$  Experiment (JINR) // Nucl. Phys. A. 2019. V. 982. P. 967–970.
2. *Kapishin M. (for the  $BM@N$  Collab.)*.  $BM@N$  First Results // SQM 2019 Proc. Springer Proc. Phys. 2020. V. 250. P. 21–27.
3.  $BM@N$  Project. [http://nica.jinr.ru/files/BM@N/BMN\\_project.pdf](http://nica.jinr.ru/files/BM@N/BMN_project.pdf).
4. *Baranov D. et al.* GEM Tracking System of the  $BM@N$  Experiment // J. Instrum. 2017. V. 12, No. 06. C06041.
5. *Akishina V., Kisel I.* Time-Based Cellular Automaton Track Finder for the CBM Experiment // J. Phys.: Conf. Ser. 2015. V. 599. 012024.
6. *Kisel I.* Event Reconstruction in the CBM Experiment // Nucl. Instr. Meth. A. 2006. V. 566. P. 85–88.

Получено 27 июня 2023 г.