

Энергетическая зависимость дифференциальных сечений рождения частиц на БАК

Ю.Ю. Овчаров,* Л.Н. Смирнова†

*Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,**физический факультет, кафедра общей ядерной физики**Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2*

(Статья поступила 24.06.2017; Подписана в печать)

В работе выполнен анализ дифференциальных спектров заряженных частиц, рожденных в соударениях протонов на Большом адронном коллайдере (БАК) при энергиях в системе центра масс $\sqrt{s} = 0.9, 2.36, 7, 8$ и 13 ТэВ, по поперечному импульсу частиц. Проведен анализ энергетической зависимости, как самих спектров, так и их отношений. Показано, что спектр частиц становится более жестким при увеличении энергии соударения протонов.

PACS: 13.85.Ni УДК: 539.1.07

Ключевые слова: дифференциальный спектр заряженных частиц, поперечный импульс, коллайдер.

ВВЕДЕНИЕ

В соударениях протонов высоких энергий на Большом адронном коллайдере (БАК) основная доля энергии расходуется на множественное образование частиц, более 60% которых являются заряженными. Дифференциальные сечения рождения частиц, или спектры частиц, позволяют изучать проявления сильных взаимодействий при малых переданных импульсах. Для описания таких процессов используются феноменологические модели, в основе которых лежат законы квантовой хромодинамики (КХД). Энергия протонных соударений на БАК является максимальной, достигнутой на ускорителях, что позволяет исследовать энергетическую зависимость дифференциальных сечений рождения заряженных частиц в новой области энергий. В эксперименте ATLAS [1] на БАК выполнены измерения дифференциальных сечений рождения заряженных частиц в протонных взаимодействиях при минимальных критериях отбора событий в диапазоне энергий в системе центра масс \sqrt{s} от 0.9 до 13 ТэВ [2–4]. Эти сечения были нормированы на число событий и сравнивались с предсказаниями различных генераторов, используемых для моделирования процессов с малыми передачами импульса. Результаты сравнения использовались для настройки генераторов для правильного описания фоновых событий при исследованиях процессов с большими переданными импульсами.

Для качественного понимания изменения характеристик рожденных частиц с ростом энергии соударения представляет интерес прямое сравнение дифференциальных сечений рождения частиц при разных энергиях. Такое сравнение выполнено в данной работе. Используются измеренные в эксперименте ATLAS спектры заряженных частиц, размещенные для свободного доступа в базе данных Hepdata.

Анализ данных при энергиях соударений протонов 8 и 13 ТэВ [5] показал, что в исследуемой в эксперименте ATLAS кинематической области заметные изменения формы распределений заряженных частиц с ростом энергии проявляются для распределений по поперечному импульсу частиц (p_T) и практически отсутствуют для распределений по псевдобыстроте η . Результат для дифференциальных сечений частиц в зависимости от поперечного импульса согласуется с наблюдениями в эксперименте ALICE [6].

1. РАССМАТРИВАЕМАЯ КИНЕМАТИЧЕСКАЯ ОБЛАСТЬ И ОТБОР СОБЫТИЙ

Кинематическая область для измерений заряженных частиц в детекторе общего назначения ATLAS ограничена по псевдобыстроте условием $|\eta| < 2.5$, определяемой геометрическими размерами установки. Область измерений поперечных импульсов имеет стандартную нижнюю границу $p_T > 500$ МэВ. Усовершенствование программных методов реконструкции позволило передвинуть эту границу к более низкому значению 100 МэВ.

Для анализа отбирались события, вершина которых восстанавливалась, по крайней мере, по двум реконструированным трекам с $p_T > 100$ МэВ. Низкая светимость коллайдера при наборе данных при энергиях 0.9, 2.36 и 7 ТэВ [2] позволяла исключать из анализа события, когда при столкновении пучков взаимодействовало более одной пары протонов и события с вторичной вершиной, содержащей четыре и более треков. В измерениях при энергиях 8 ТэВ [3] и 13 ТэВ [4] вклад событий, в которых два протонных столкновения относятся к одной вершине, найден пренебрежимо малым.

Для сравнительного анализа дифференциальных сечений рождения заряженных частиц в работе используются распределения, полученные для событий, имеющих не менее одной заряженной частицы в кинематическом диапазоне $|\eta| < 2.5$ и $p_T > 500$ МэВ ($n_{зар} \geq 1$). В этом диапазоне измерения выполнены при всех пяти значениях энергии протонных соударений: 0.9, 2.36,

*E-mail: ovcharov-yu@mail.ru

†E-mail: lns@physics.msu.ru

Таблица I: Средняя множественность заряженных частиц $n_{зар}$ при $\eta = 0$

Энергия \sqrt{s}	0.9 ТэВ [2]	7 ТэВ [2]	8 ТэВ [3]	13 ТэВ [4]
$\langle n_{зар} \rangle$	3.483 ± 0.106	5.630 ± 0.169	5.64 ± 0.10	6.542 ± 0.096

Таблица II: Результаты аппроксимации спектров по p_T функцией p_T^{-n}

Энергия \sqrt{s} ТэВ	Значение n ($\chi^2/ст.св.$) $1.0 < p_T < 3.0$ ГэВ	Значение n ($\chi^2/ст.св.$) $3.0 < p_T < 20.0$ ГэВ
0.9	5.11 ± 0.18 (3.2/15)	6.96 ± 0.45 (0.05/7)
2.36	4.61 ± 0.23 (1.1/9)	5.87 ± 1.3 (0.10/10)
7	4.40 ± 0.15 (3.3/15)	5.94 ± 0.07 (0.23/10)
8	4.39 ± 0.15 (3.3/15)	5.87 ± 0.24 (0.36/4)
13	4.33 ± 1.4 (4.7/16)	5.75 ± 0.21 (0.21/11)

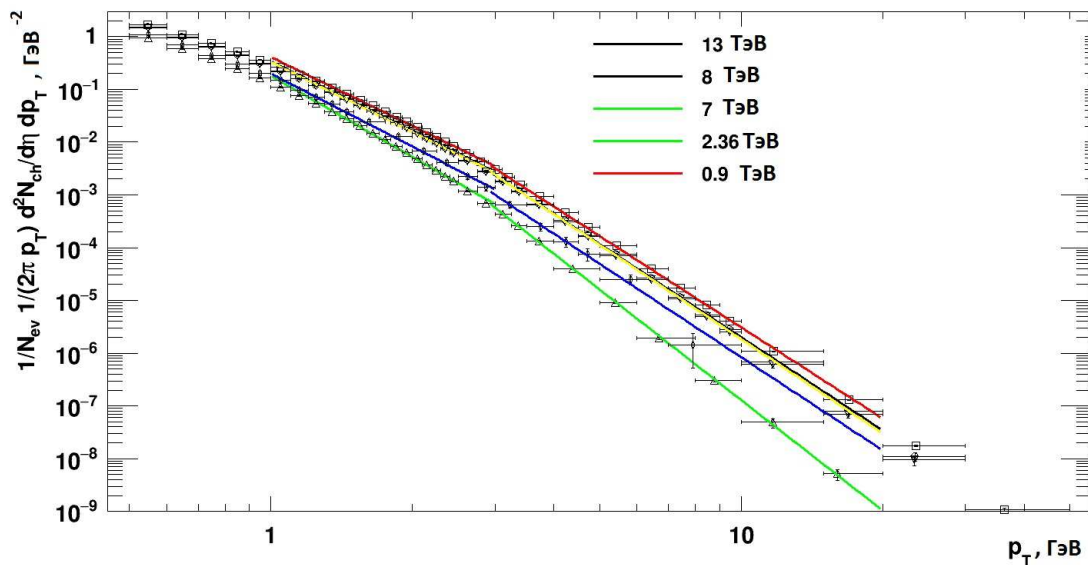


Рис. 1: Спектры заряженных частиц по p_T при энергиях соударения пучков 0.9, 2.36, 7, 8 и 13 ТэВ с множественностью $n_{зар} \geq 1$, $p_T > 500$ МэВ, псевдобыстротой $|\eta| < 2.5$ и временем жизни $\tau > 300$ пс [2–4]. Линиями показаны аппроксимации степенными функциями с параметрами табл. 2

7, 8 и 13 ТэВ. Увеличение инклюзивного сечения заряженных частиц с ростом энергии можно оценить по плотности распределения заряженных частиц на единицу псевдобыстроты $n_{зар} = 1/N_{соб} (dN_{зар}/d\eta)$ при $\eta = 0$, усредненной по области $|\eta| < 0.2$, приведенных в табл. 1 для частиц с $|\eta| < 2.5$, $p_T > 100$ МэВ и множественностью в этом диапазоне $n_{зар} \geq 2$. Из табл. 1 следует, что в диапазоне энергий БАК, где выполнены измерения плотности заряженных частиц $n_{зар}$, ее значения возрастают почти в два раза (1.88 ± 0.06).

На рис. 1 приведены совместно результаты измерений дифференциальных сечений рождения заряженных частиц со временем жизни $\tau > 300$ пс, нормиро-

ванных на одно событие. Из рис. 1 видно, что величины нормированных сечений перекрывают диапазон значений в восемь порядков. Спектры сильнее расходятся при увеличении p_T . Видно, что основной вклад в увеличение множественности дают частицы с малыми $p_T \leq 1$ ГэВ.

2. АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ p_T

Проведены аппроксимации распределений заряженных частиц по p_T степенной функцией вида p_T^{-n} для двух интервалов p_T : $1.0 < p_T < 3.0$ ГэВ

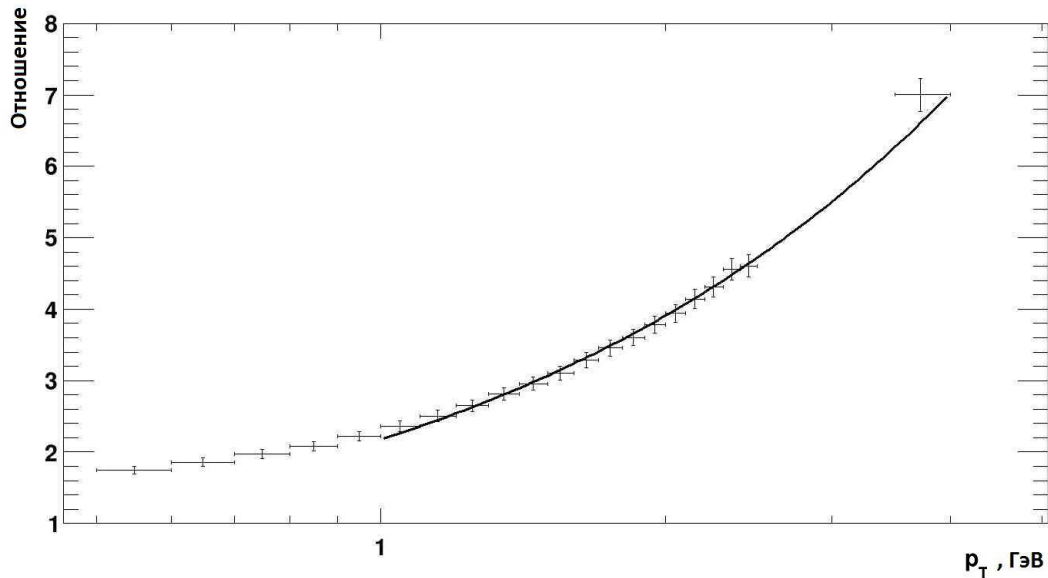


Рис. 2: Отношение спектров заряженных частиц при 13 ТэВ к аналогичному спектру при 0.9 ТэВ по p_T для событий с множественностью $n_{ch} \geq 1$ и частиц с $p_T > 500$ МэВ, псевдобыстротой $|\eta| < 2.5$ и временем жизни $\tau > 300$ пс

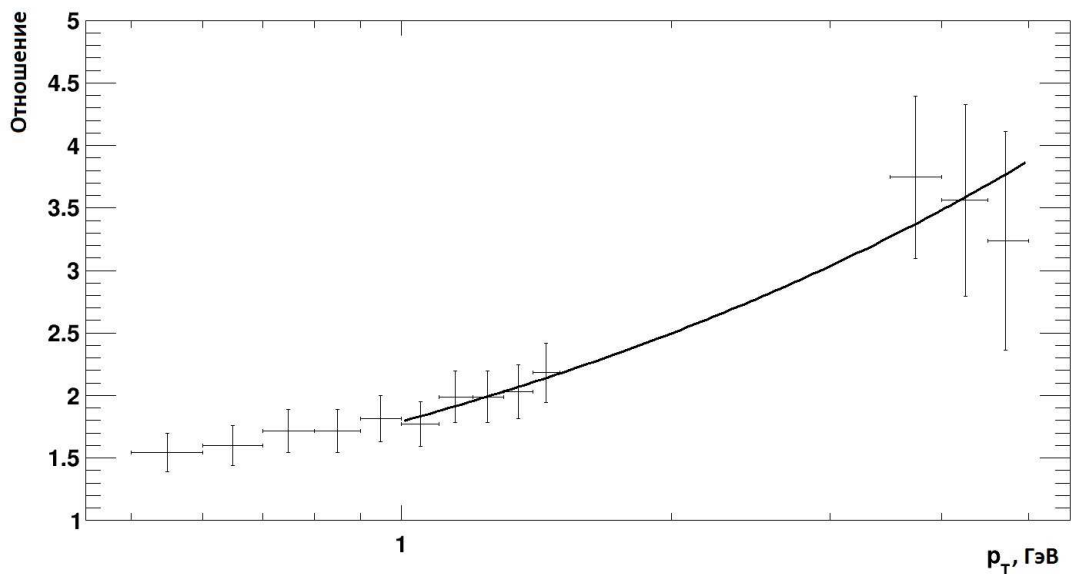


Рис. 3: Отношение спектров заряженных частиц при 13 ТэВ к аналогичному спектру при 2.36 ТэВ по p_T для событий с множественностью $n_{ch} \geq 1$ и частиц с $p_T > 500$ МэВ, псевдобыстротой $|\eta| < 2.5$ и временем жизни $\tau > 300$ пс

и $3.0 < p_T < 20$ ГэВ. Результаты аппроксимации приведены в табл. 2.

С ростом энергии взаимодействия значение показателя степени n имеет тенденцию к уменьшению для обоих интервалов поперечных импульсов, но большие погрешности значений параметра n не позволяют сделать надежный вывод об изменении характера спектров. Возникает необходимость прямого сравне-

ния спектров при различных энергиях. С этой целью проведено вычисление отношений дифференциального спектра заряженных частиц, нормированного на число событий, при энергии протонных соударений 13 ТэВ к аналогичным спектрам заряженных частиц при энергиях протонных соударений 0.9, 2.36, 7 и 8 ТэВ. Рассчитанные отношения сечений приведены на рис. 2–5. Области p_T с отсутствием значений отношений обу-

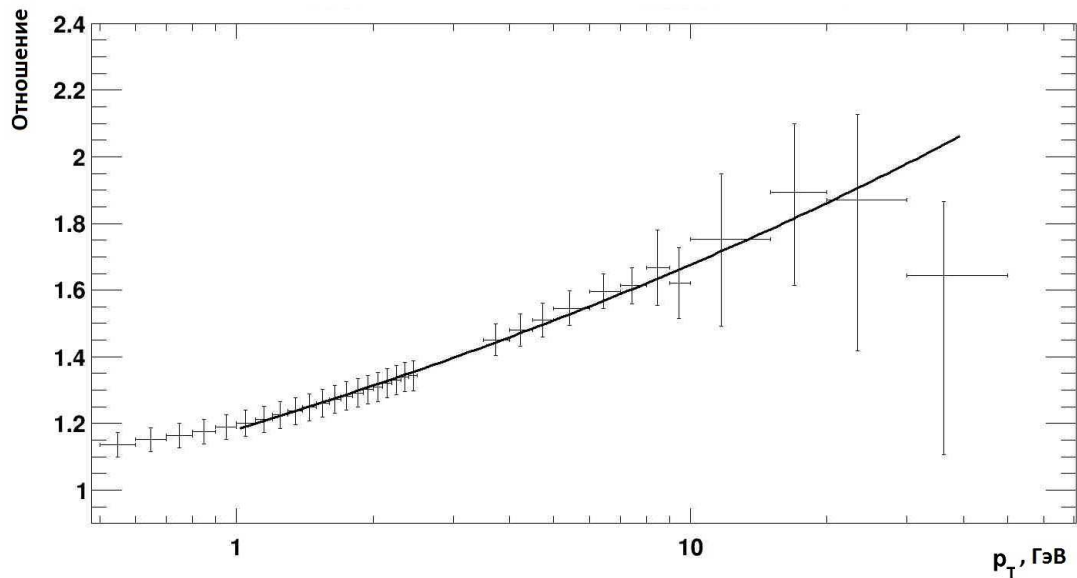


Рис. 4: Отношение спектров заряженных частиц при 13 ТэВ к аналогичному спектру при 7 ТэВ по p_T для событий с множественностью $n_{ch} \geq 1$ и частиц с $p_T > 500$ МэВ, псевдобыстротой $|\eta| < 2.5$ и временем жизни $\tau > 300$ пс

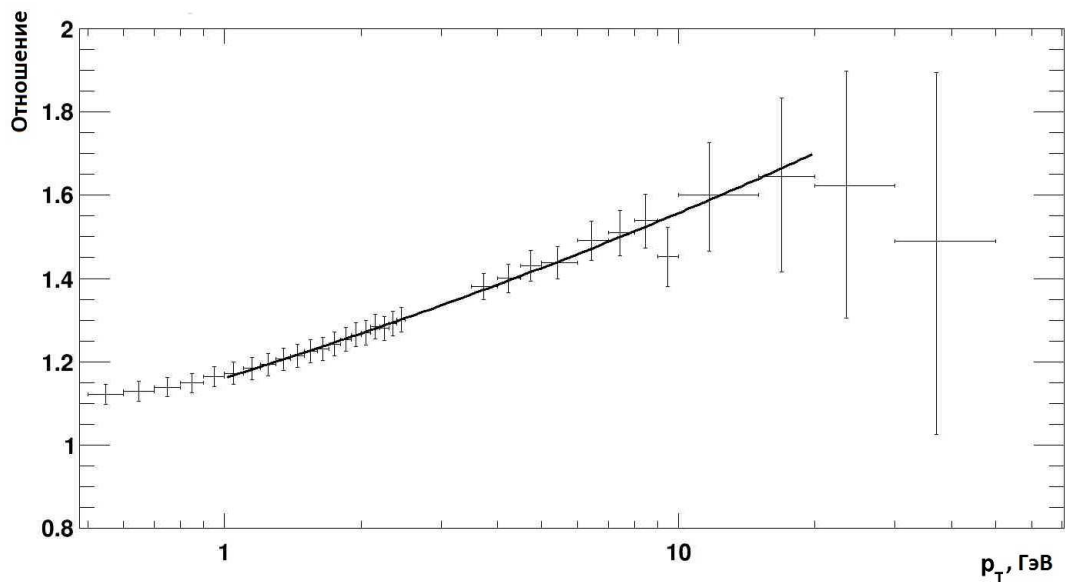


Рис. 5: Отношение спектров заряженных частиц при 13 ТэВ к аналогичному спектру при 8 ТэВ по p_T для событий с множественностью $n_{ch} \geq 1$ и частиц с $p_T > 500$ МэВ, псевдобыстротой $|\eta| < 2.5$ и временем жизни $\tau > 300$ пс

словлены разными размерами интервалов p_T в распределениях при разных энергиях. Было принято, что исключение этих областей при вычислении отношений вносит меньше искажений, чем применение дополнительного перевзвешивания спектров с учетом измерения границ бинов. Линиями на рисунках показаны результаты аппроксимации отношений спектров степенной функцией p_T^k . Значения параметра аппроксимации

для разных отношений спектров приведены в табл. 3. Из рисунков видно, что степенная параметризация отношений хорошо воспроизводит их зависимость от величины поперечного импульса p_T . Это соответствует приближенному описанию спектров по p_T степенной функцией, выполненному в разд. 1.

Из результатов аппроксимации отношений спектров по p_T , приведенных в табл. 3, хорошо заметно убыва-

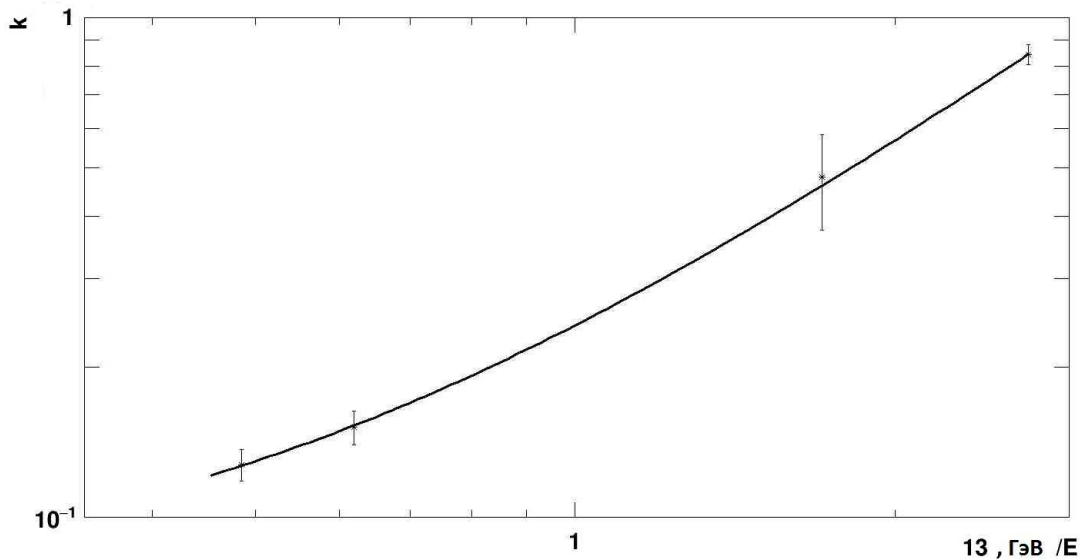


Рис. 6: Значения параметра k в зависимости от величины отношения энергий $R = 13/\sqrt{s_i}$

Таблица III: Параметры аппроксимации отношений спектра по p_T при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ к спектрам при меньших значениях $\sqrt{s_i}$ функцией p_T^k

$\sqrt{s_i}$ ТэВ	k
0.9	0.84 ± 0.04
2.36	0.48 ± 0.10
7	0.15 ± 0.01
8	0.13 ± 0.01

ние показателя степенной функции k с ростом энергии $\sqrt{s_i}$. Это означает, что с ростом энергии спектр частиц становится более жестким. Можно проанализировать изменение параметра k в зависимости от отношения энергий 13 ТэВ и парной энергии $\sqrt{s_i}$. На рис. 6 приведены значения параметра k в зависимости от величины отношения $13/\sqrt{s_i}$ ТэВ. Линией показана аппроксимация зависимости значения k от отношения $13/\sqrt{s_i}$ зависимостью $k^{0.39}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен анализ дифференциальных сечений рожденных заряженных частиц в протонных соударениях при энергиях БАК. Выполнена аппроксимация дифференциальных спектров степенной функцией для двух интервалов поперечных импульсов частиц. Рассчитаны отношения спектров частиц по поперечному импульсу при энергии соударения 13 ТэВ к спектрам при энергиях 0.9, 2.36, 7, 8 ТэВ. В результате проведенного анализа установлено, что дифференциальный спектр заряженных частиц по поперечному импульсу в протонных соударениях становится более жестким при увеличении энергии соударения протонов. Отношения спектров аппроксимированы степенной функцией. Получена зависимость показателя степени для аппроксимации отношения спектров в зависимости от отношения энергий протонных соударений. Результаты проведенного анализа могут быть использованы для сравнения с предсказаниями различных генераторов событий и теоретических моделей.

[1] Aad G., Abat E., Abdallah J., Abdelalim A. A., Abdesselam A., Abidinov O., Abi B. A., Abolins M., Abramowicz H., Acerbi E. et al., ATLAS Collaboration JINST. 2008. **3**. S0800.
 [2] Aad G., Abbott B., Abdallah J., Abdelalim A. A., Abdesselam A., Abidinov O., Abi B., Abolins M., Abramowicz H., Abreu H. et al., ATLAS Collaboration. New J. Phys. 2011. **13**. P. 053033.
 [3] Aad G., Abbott B., Abdallah J., Abidinov O., Abeloos B.,

Aben R., Abolins M., AbouZeid O. S., Abraham N. L., Abramowicz H. et al., ATLAS Collaboration. Phys. Lett. B. 2016. **758**, P. 67.
 [4] Aad G., Abbott B., Abdallah J., Abidinov O., Abeloos B., Aben R., Abolins M., Abouzeid O. S., Abraham N. L., Abramowicz H. et al., ATLAS Collaboration. Eur. Phys. J. C. 2016. **76**. P. 403.
 [5] Овчаров Ю. Ю., Маевский А. С. Труды XVII межвузовской научной школы молодых специалистов «Концентри-

рованные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине». 2016. М. С.118.

[6] Adam J., Adamova D., Aggarwal M. M., Aglieri Rinella G., Agnello M., Agrawal N., Ahammed Z., Ahn S. U., Aiola S.,

Akindinov A. et al., ALICE Collaboration. *Phys. Lett. B.* 2016. **753**. P. 319.

Energy dependence of differential cross sections for particle production at the LHC

I. I. Ovcharov^a, L. N. Smirnova^b

Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia.

E-mail: ^aovcharov-yu@mail.ru, ^blns@physics.msu.ru

Analysis of differential spectra of charged particles produced in proton collisions at the center of mass energies $\sqrt{s} = 0.9, 2.36, 7, 8$ и 13 TeV in dependence on transverse momentum at the LHC is presented. The parameterization of both transverse momentum spectra and their ratios are fulfilled. It is shown that particle spectrum on transverse momentum becomes harder with increase of proton collision energy.

PACS: 13.85.Ni

Keywords: differential charged particle spectrum, transverse momentum, collider, analysis of differential spectra.

Received 24 June 2017.

Сведения об авторах

1. Овчаров Юрий Юрьевич — студент 3-го курса; e-mail: ovcharov-yu@mail.ru.
2. Смирнова Лидия Николаевна — доктор физ.-мат. наук, профессор; e-mail: lns@physics.msu.ru.