

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЫ, ПУЧКОВ ЧАСТИЦ И ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ

УДК 539.126

ИЗУЧЕНИЕ СОБЫТИЙ С ДВУМЯ ЛЕПТОНАМИ В КОНЕЧНОМ СОСТОЯНИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СТАНДАРТНОГО И ПОИСКА ТЯЖЕЛОГО БОЗОНА ХИГГСА В КАНАЛЕ РАСПАДА $h/H \rightarrow WW^{(*)} \rightarrow l\nu$ В ПРОТОН-ПРОТОННЫХ СТОЛКНОВЕНИЯХ ПРИ 13 ТэВ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ АТЛАС НА БАК

© 2021 г. А. А. Гаврилюк^{а, *}, Е. Н. Рамакоти^а, И. И. Цукерман^а

^аНИИЦ "Курчатовский институт", пл. Академика Курчатова 1, Москва, 123182 Россия

*E-mail: alexander.gavrilyuk@itep.ru

Поступила в редакцию 25.09.2020 г.

После доработки 25.09.2020 г.

Принята к публикации 25.09.2020 г.

Авторами в составе рабочей группы по поиску и изучению бозона Хиггса (HWW) проведено изучение событий с двумя лептонами в канале распада $h/H \rightarrow WW^{(*)} \rightarrow l\nu$ в эксперименте АТЛАС на Большом адронном коллайдере при 13 ТэВ. В анализе используется полный набор данных протон-протонных столкновений, набранных в 2015–2018 гг., который соответствует интегральной светимости 139 фб^{-1} . Особое внимание уделено исследованию характеристик адронных струй, летящих под малыми полярными углами. Такие струи сопровождают рождение бозона Хиггса в механизме слияния векторных бозонов. Проведено сравнение двух алгоритмов восстановления струй, EMToro и PFlow. Для дальнейшего анализа выбран второй, как более надежный при высокой светимости БАК. Изучена кинематика адронных струй отдельно для экспозиций при разной дифференциальной светимости. Приводятся также первые результаты анализа контрольных областей основных фонов для поиска тяжелого бозона Хиггса на полной статистике данных при 13 ТэВ.

Ключевые слова: адронные струи, бозон Хиггса, Стандартная Модель, эксперимент АТЛАС, Большой адронный коллайдер, LHC

DOI: 10.56304/S2079562920060238

1. ВВЕДЕНИЕ

Изучение стандартного (СБХ) и поиски тяжелого (ТБХ) бозона Хиггса ведутся в разных каналах распада, в частности, в перспективном канале $h/H \rightarrow WW^{(*)}$. Ожидаемая относительная вероятность распада (BR) СБХ в этой моде с массой 125 ГэВ в Стандартной модели (СМ) составляет 21.6%, та же модель предсказывает $\text{BR}(H \rightarrow WW) = 60\text{--}70\%$ при массе $>200 \text{ ГэВ}$ [1]. В данной работе рассматривается канал $h/H \rightarrow WW^{(*)} \rightarrow l\nu$, имеющий итоговый BR $O(1\%)$ [2]; при этом наилучшие фоновые условия достигаются при конечном состоянии с одним электроном и одним мюоном, $e\nu\mu\nu$. Недостатком этого канала является возможность восстановления лишь поперечной массы СБХ и ТБХ. Изучение СБХ и поиск ТБХ в экспериментах АТЛАС и КМС на БАК в разных каналах распада, включая и WW, проводился как при энергии 8 ТэВ в системе центра масс на полной статистике [3], так и при энергии 13 ТэВ на данных 2015–16 гг. [4]. Были измерены константы связи и сечения рождения СБХ в различных

механизмах его рождения. Что касается ТБХ, то новая частица не была обнаружена и были поставлены верхние пределы на сечение ее рождения в широком диапазоне сканируемых масс.

В экспериментах АТЛАС и КМС в одном пересечении пучков БАК происходит одновременно несколько протон-протонных взаимодействий, их число μ пропорционально его светимости. На рис. 1 показано распределение по среднему μ в данных АТЛАС 2015–2018 гг. Если в экспозициях 2015–2016 гг., которые были проанализированы ранее, происходит 15–25 событий каждые 25 нс, то в данных 2017–2018 гг. их в среднем около сорока. Такое наложение “мягких” событий (pile-up) может создать проблемы с правильным восстановлением искомого “жесткого” события. Эффект pile-up приводит, в частности, к увеличению фонов из-за сторонних адронных струй. Если в области перекрытия трековых детекторов ($|\eta| < 2.5^1$) пода-

¹ Псевдобыстрота η связана с полярным углом θ соотношением $\eta = -\text{Intg}(\theta/2)$.

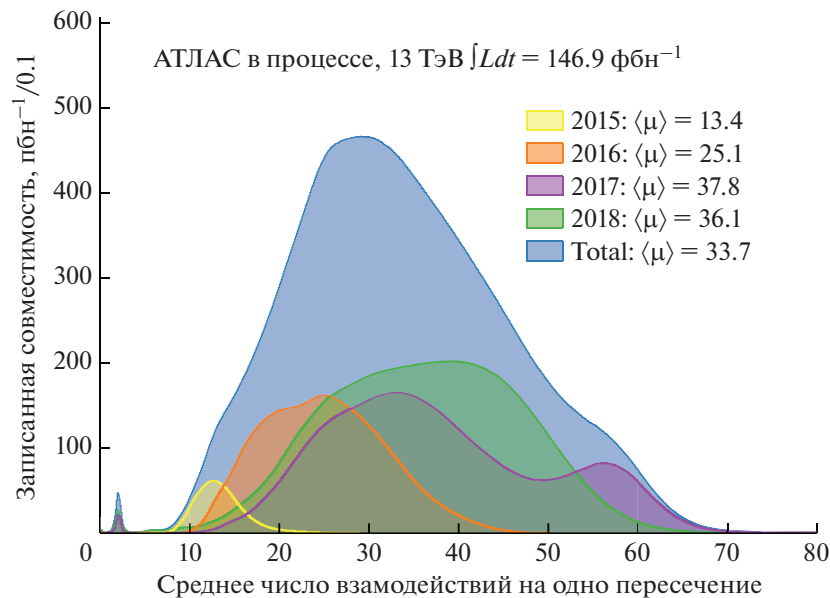


Рис. 1. Распределение по среднему числу взаимодействий μ в одном пересечении пучков в данных эксперимента АТЛАС на БАК в сеансах 2015–2018 гг.

вить такие струи несложно, то при малых углах это проблематично. Наиболее удобный способ понять ситуацию в этой мало заселенной области — изучить события $Z \rightarrow \mu\mu/ee$, поскольку набранная статистика составляет около сотни миллионов сигнальных кандидатов. За такое исследование отвечали авторы в составе рабочей группы HWW эксперимента АТЛАС.

2. ИЗУЧЕНИЕ КОНТРОЛЬНОЙ ОБЛАСТИ Z-БОЗОНА

Отбираются события с двумя жесткими изолированными мюонами или электронами разных знаков с инвариантной массой, близкой к массе Z-бозона, $m_{ll} = m_Z \pm 10 \text{ ГэВ}/c^2$. В отличие от анализа, представленного нами в [5], используется полная статистика данных, набранных при 13 ТэВ, существенно обновлены программы реконструк-

ции, анализа и исходные образцы смоделированных событий. Кроме того, вместо стандартного ЕМТоро используется новый алгоритм восстановления струй PFlow [6]. Отметим, что адронные струи реконструируются во всем интервале $|\eta| < 4.5$ и должны иметь поперечный импульс $p_T > 30 \text{ ГэВ}/c$. В табл. 1 для примера показаны числа событий с двумя электронами, набранных в 2017 г., в зависимости от множественности адронных струй. Полное число таких событий составляет 15.8 млн. В большинстве случаев наблюдается хорошее согласие реальных данных с МС-моделированием; лишь для событий с тремя и более струями есть 4%-ная разница. Сходная ситуация имеет место и для событий 2018 г., а также для случая $\mu\mu$.

На рис. 2 показано распределение по псевдобыстроте второй адронной струи после отбора событий с двумя электронами и двумя или более струями, восстановленными с помощью ЕМТоро

Таблица 1. Число событий (в тыс.) с двумя электронами, набранных в 2017 г., в зависимости от множественности адронных струй. Под *Fakes* понимаются события $W \rightarrow l\nu + jets$ с одним ложно идентифицированным лептоном

	W	Топ	$Z \rightarrow ee$	<i>Fakes</i>	Полный фон	Данные	Данные/МС
Все	195	22.9	15206	165	15589	15810	1.01
0 струй	107	0.6	11122	137	11367	11643	1.02
1 струя	51.3	4.3	2912	21.1	2989	2956	0.99
2 струи	23.6	8.3	844	5.6	881	872	0.99
>2 струй	13.3	9.7	327	1.6	352	339	0.96

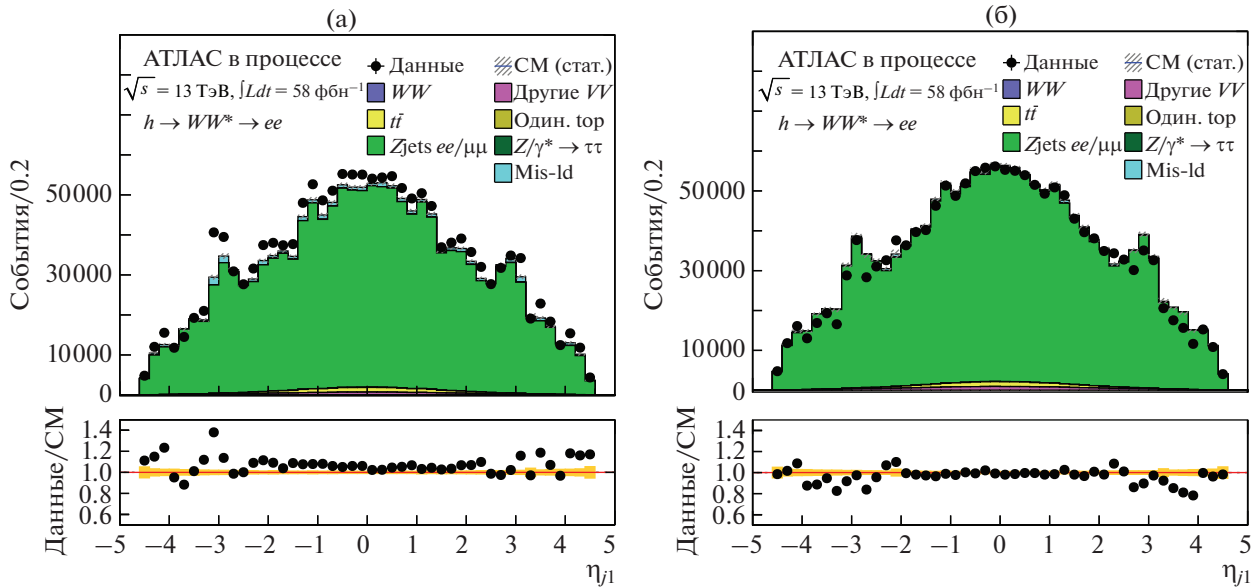


Рис. 2. Распределение по псевдобыстроте второй адронной струи в событиях $Z \rightarrow ee$ с двумя струями, набранных в 2018 г. (а) Струи восстановлены алгоритмом EMTopo. (б) Струи восстановлены алгоритмом PFlow. Систематические погрешности еще не оценивались.

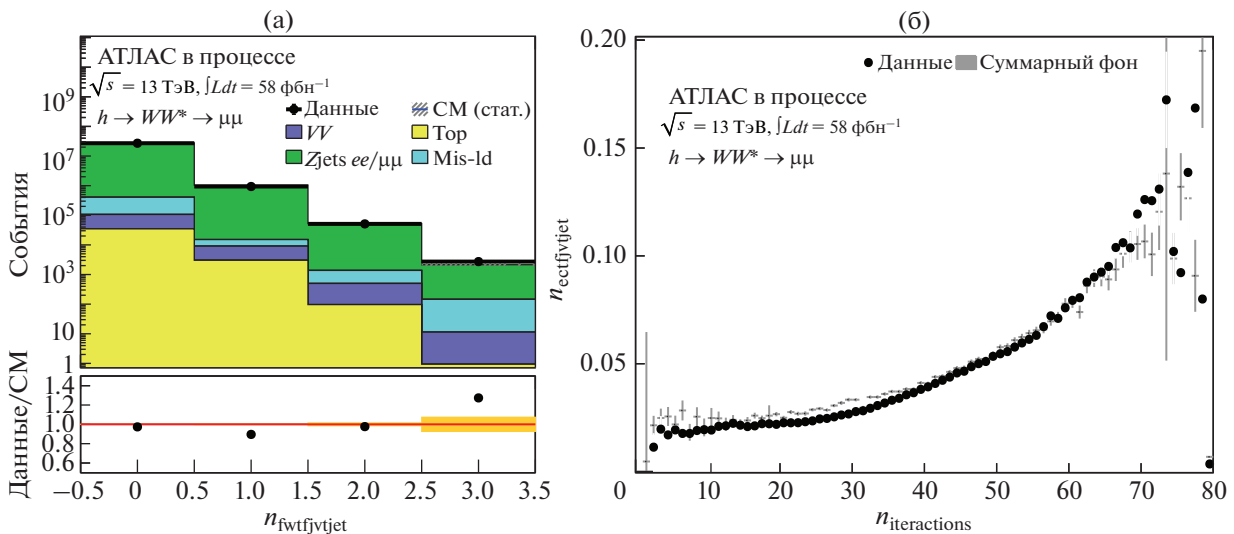


Рис. 3. (а) Распределение по множественности струй в интервале $3.25 < |\eta| < 4.5$ в $Z \rightarrow \mu\mu$ событиях 2018 г. от числа взаимодействий μ в одном пересечении пучков БАК. (б) Зависимость среднего числа струй в интервале $2.75 < |\eta| < 3.25$ в $Z \rightarrow \mu\mu$ событиях 2018 г. от числа взаимодействий μ в одном пересечении пучков БАК. Систематические погрешности еще не оценивались.

и PFlow алгоритмов, для данных 2018 г. Видно, что в центральной области данные неплохо воспроизводятся Монте-Карло моделированием (МС) в обоих случаях, тогда как в передней области алгоритм PFlow дает намного лучшее согласие с МС, чем EMTopo. Распределения по другим кинематическим переменным тоже лучше моделируются для случая PFlow. Поэтому для дальнейшего анализа был выбран последний алгоритм.

На рис. 3а показано распределение по числу струй, летящих в область $3.25 < |\eta| < 4.5$. МС воспроизводит этот спектр достаточно хорошо. Зависимость среднего числа струй от μ в интервале $2.75 < |\eta| < 3.25$ (рис. 3б) тоже неплохо описывается МС-моделированием. Кроме того, нами изучалась кинематика адронных струй в нескольких разных интервалах по переменной μ . Существенных отклонений данных от результатов модели-

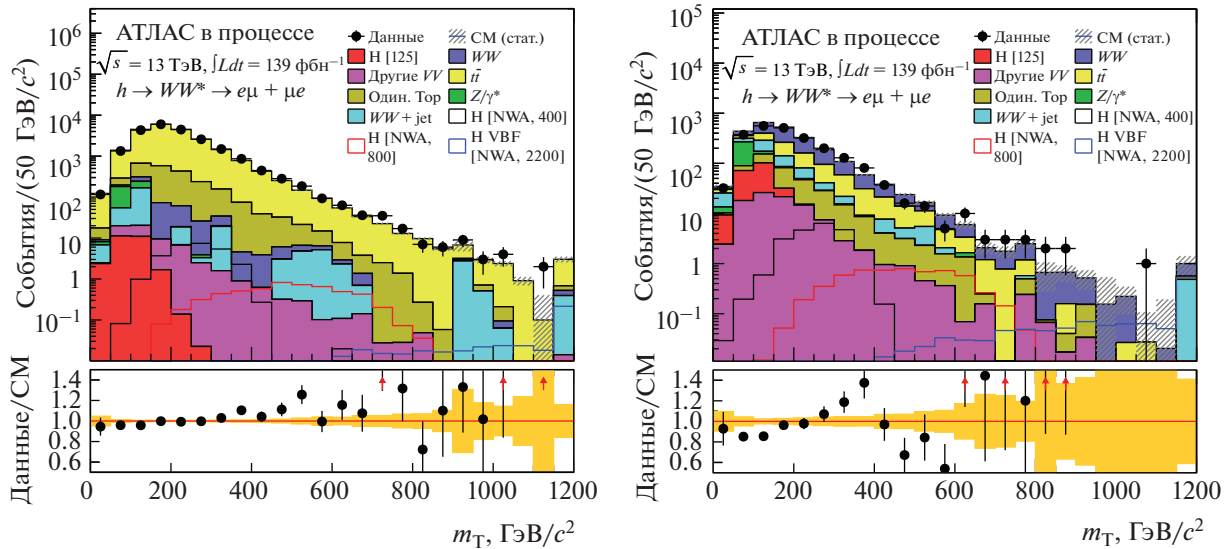


Рис. 4. Распределения по поперечной массе m_T в контрольных областях VBF ТБХ. (а) Контрольная область фона от топ кварков. (б) Контрольная область фона от WW. Систематические погрешности еще не оценивались.

рования не выявлено. Таким образом, можно сохранить используемое ранее для анализа данных 2015–16 гг. ограничение $p_T > 30$ ГэВ/с для струй также и для данных 2017–2018 гг., где эффект pile-up намного сильнее.

3. ИЗУЧЕНИЕ КОНТРОЛЬНЫХ ОБЛАСТЕЙ ДЛЯ ПОИСКА ТБХ ПРИ 13 ТЭВ

Сейчас проводится анализ событий с электроном и мюоном для поиска ТБХ в канале $H \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$ на полной статистике 2015–2018 гг., тогда как в предыдущем рассматривались лишь данные 2015–2016 гг. Кроме того, в настоящем анализе используются улучшенные образцы смоделированных событий, более аккуратно проведена оценка фона. На рис. 4 для примера показаны распределения по поперечной массе в контрольных областях доминирующих фонов от топ кварков и парного рождения векторных бозонов для поиска ТБХ в механизме VBF. Существенных расхождений между данными и МС не выявлено. Указанные распределения, а также кинематика струй и лептонов отдельно изучались в различных интервалах μ . Как и в контрольной области Z-бозона, в других контрольных областях не наблюдается проблем при очень больших μ .

В последующем планируется проанализировать события с двумя электронами и двумя мюонами в конечном состоянии с применением алгоритма подавления струй, летящих под малыми углами (fJVT) [7], что, вероятно, позволит заметно уменьшить верхний предел на сечение рождения ТБХ.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате анализа событий с двумя электронами и двумя мюонами авторами в составе рабочей группы сотрудничества АТЛАС по бозону Хиггса показано, что новый алгоритм восстановления адронных струй PFlow гораздо лучше старого ЕМТоро, особенно при высокой светимости БАК в 2017–2018 гг. По нашему мнению, можно не ужесточать критерии отбора по поперечному импульсу струй, летящих на малые углы, сохранив ограничение $p_T > 30$ ГэВ для изучения свойств стандартного и для поиска тяжелого бозона Хиггса в механизме рождения за счет слияния векторных бозонов. Анализ событий с электроном и мюоном в контрольных областях для поиска тяжелого бозона Хиггса показал удовлетворительное согласие экспериментальных результатов с МС.

5. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят своих коллег по рабочей группе сотрудничества АТЛАС по изучению бозона Хиггса (HWW) в канале $H \rightarrow WW$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *de Florian D. et al.* // Report CERN-2017-002-M; arXiv:1610.07922 [hep-ph]. 2016.
2. *Tanabashi M. et al.* // Phys. Rev. D. 2018. V. 98. P. 030001.
3. *ATLAS Collab.* // Phys. Rev. D. 2015. V. 91. P. 012006; *ATLAS Collab.* // J. High Energy Phys. 2016. V. 2016. (1). No. 1. P. 032; *CMS Collab.* // J. High Energy Phys.

2014. V. 2014. No. 1. P. 096; *CMS Collab.* // J. High Energy Phys. 2015. V. 2015. No. 10. P. 144.
4. *ATLAS Collab.* // Phys. Lett. B. 2019. V. 789. P. 508; *ATLAS Collab.* // Eur. Phys. J. C. 2018. V. 78. P. 24; *CMS Collab.* // Phys. Lett. B. 2019. V. 791. P. 96; *CMS Collab.* // Report CMS-PAS-HIG-17-033. 2019.
 5. Гаврилюк А.А., Рамакоти Е.Н., Цукерман И.И. // Ядерная физика и инжиниринг. 2018. Т. 9. № 6. С. 591; Рамакоти Е.Н., Гаврилюк А.А., Цукерман И.И. // Ядерная физика и инжиниринг. 2018. Т. 9. № 6. С. 585.
 6. *ATLAS Collab.* // Eur. Phys. J. C. 2017. V. 77. P. 466.
 7. *ATLAS Collab.* // Eur. Phys. J. C. 2017. V. 77. P. 590.

Study of Events with Two Leptons in the Final State to Investigate Properties of the Standard Model Higgs Boson and to Search for a Heavy Higgs Boson in the $h/H \rightarrow WW^{(*)} \rightarrow l\nu l\nu$ Decay Channel in pp-Collisions at 13 TeV with the ATLAS Detector at the LHC

A. A. Gavrilyuk¹, *, E. N. Ramakoti¹, and I. I. Tsukerman¹

¹*National Research Center “Kurchatov Institute”, Moscow, 117218 Russia*

**e-mail: alexander.gavrilyuk@itep.ru*

Received September 25, 2020; revised September 25, 2020; accepted September 25, 2020

Within the ATLAS Higgs boson working group (HWW), a study of events with two leptons in the $h/H \rightarrow WW^{(*)} \rightarrow l\nu l\nu$ decay channel in pp-collisions at 13 TeV with the ATLAS detector at the LHC is performed. The analysis uses complete data sample accumulated during 2015—2018 exposures which corresponds to integrated luminosity 139 fb^{-1} . Particular attention was paid to study forward going hadron jet properties. Such jets accompany Higgs boson production in the vector boson fusion mechanism. A comparison of two jet reconstruction algorithms, EMTopo and PFlow, is performed. The second algorithm is chosen for further analyses as more robust to conditions at high LHC luminosity. Jet kinematics is studied separately for exposures at different differential luminosities. The first results of the analysis of control regions of main backgrounds to heavy Higgs boson based on complete 13 TeV statistics are also given.

Keywords: hadron jets, Higgs boson, Standard Model, ATLAS experiment, LHC