

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЫ, ПУЧКОВ ЧАСТИЦ И ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ

УДК 539.126

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАНДАРТНОГО БОЗОНА ХИГГСА В КАНАЛЕ РАСПАДА $H \rightarrow WW^* \rightarrow \ell\nu\ell\nu$ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ ATLAS НА LHC

© 2022 г. Е. Н. Рамакоти^{а, *}, А. А. Гаврилюк^а, И. И. Цукерман^а

^аНИЦ “Курчатовский институт”, пл. Академика Курчатова 1, Москва, 123182 Россия

*E-mail: ekaterina.ramakoti@itep.ru

Поступила в редакцию 10.09.2021 г.

После доработки 15.09.2021 г.

Принята к публикации 17.09.2021 г.

Авторами в составе рабочей группы HWW эксперимента ATLAS на LHC исследованы события с двумя лептонами и двумя адронными струями для изучения свойств стандартного бозона Хиггса в механизме рождения за счет слияния векторных бозонов в канале распада $H \rightarrow WW^* \rightarrow \ell\nu\ell\nu$. Анализ проводился на полной статистике событий протон-протонных столкновений за 2015–2018 гг. при энергии в их системе центра масс 13 ТэВ. Для событий с электроном и мюоном в конечном состоянии исследование завершено. Рассчитаны наблюдаемая и ожидаемая статистические значимости сигнала от бозона Хиггса без учета систематических погрешностей. Начато также исследование конечных состояний с двумя мюонами и двумя электронами в случае двух и более адронных струй: предложены критерии отбора событий сигнала от H -бозона и выбрана стратегия для вычитания основного фона от процессов Дрелла–Яна. Показано, что экспериментальные кинематические распределения воспроизводятся моделированием методами Монте-Карло.

Ключевые слова: бозон Хиггса, адронные струи, эксперимент ATLAS, LHC

DOI: 10.56304/S2079562922010316

ВВЕДЕНИЕ

В 2012 г. на Большом адронном коллайдере (LHC) в CERN в экспериментах ATLAS и CMS был обнаружен новый бозон H с массой около 125 ГэВ, который можно отождествить с бозоном Хиггса Стандартной Модели (СМ) [1]. Канал $H \rightarrow WW^*$ с относительной вероятностью распада (BR) 21.6% [2] сыграл существенную роль в этом открытии. Он уже изучался в упомянутых экспериментах как при $\sqrt{s} = 8$ ТэВ на полном образце событий 20 фб^{-1} [3], так и при 13 ТэВ на одной четверти данных, т.е. на статистике 36 фб^{-1} [4]. Были измерены константы связи, интегральные и дифференциальные сечения H -бозона. Основной целью анализа полной статистики событий с двумя лептонами, набранной на LHC в 2015–2018 гг. при 13 ТэВ, является более точное и углубленное изучение указанных характеристик. В данной работе рассматриваются как конечное состояние $H \rightarrow WW^* \rightarrow e\nu\mu\nu$, BR которого около 0.5% [5], так и существенно более сложные для экспериментального изучения состояния $H \rightarrow WW^* \rightarrow e\nu e\nu$ или $H \rightarrow WW^* \rightarrow \mu\nu\mu\nu$, с аналогичным суммарным BR. Характерной особенностью этих состояний является наличие двух изолированных лептонов с большим поперечным импульсом p_T . Однако из-за наличия также двух нерегистрируемых нейтрино можно восстано-

вить, с довольно плохим разрешением, лишь поперечную массу m_T искомой частицы. Рассматриваются случаи, когда бозон Хиггса рождается только путем слияния векторных бозонов (VBF), что дает четкую сигнатуру в виде двух энергичных адронных струй, летящих в переднюю область. Также отметим, что для состояний с двумя мюонами и двумя электронами преобладает фон от процессов Дрелла–Яна (DY) $Z^{(*)} \rightarrow ee/\mu\mu$, тогда как в случае $e\nu/\mu\nu$ есть, причем существенно меньший, вклад только от цепочки распадов $Z^{(*)} \rightarrow \tau\tau \rightarrow (ee + \mu\mu) + X$.

Авторами в составе рабочей группы по изучению канала $H \rightarrow WW^*$ (HWW) сотрудничества ATLAS было проведено сравнение кинематических распределений на разных стадиях отбора событий с электроном и мюоном в конечном состоянии. Оно проводилось как в контрольных кинематических областях (CRs) основных фонов, так и в области сигнала (SR). Оценена значимость сигнала от H . Для событий с двумя мюонами и двумя электронами нами были предложены критерии отбора полезных событий и определены контрольные кинематические области для фона от процессов Дрелла–Яна.

Таблица 1. Суммарное количество событий (в тыс.) с электроном и мюоном в конечном состоянии в данных 2015–2018 гг. на разных этапах отбора. Приводятся также результаты моделирования методом Монте-Карло для сигнала и основных фонов. Показаны статистические погрешности в последних значащих цифрах на последней стадии отбора по m_T . Последние две строки соответствуют конечным стадиям отбора в контрольных областях

Отбор	VBF H	gg H + VH	VV	Топ	W + jets	$Z \rightarrow \tau\tau$	Полный фон	Данные
Пред. отбор	0.60	6.1	146	1164	32.9	257	1607	1586
2 струи	0.36	1.2	27.9	905	11.7	23.8	970	967
b -veto	0.32	1.0	23.7	61.9	3.7	19.8	110	106
VBF	0.102	0.034	0.43	0.88	0.040	0.27	1.72	1.60
m_T	0.067	0.013	0.029(2)	0.036(2)	0.012(3)	0.014(3)	0.104(5)	0.156
Топ CR	0.018	0.022	0.23	29.5	0.28	0.17	30.2	30.239
DY CR	0.016	0.012	0.15	0.29	0.16	1.32	1.78	1.774

АНАЛИЗ СОБЫТИЙ С ЭЛЕКТРОНОМ И МЮОНОМ

В данной работе представлены результаты анализа полного образца событий с электроном и мюоном, набранного на LHC в 2015–2018 гг., который соответствует интегральной светимости коллайдера 139 fb^{-1} , предварительные результаты были опубликованы в [6]. Сначала отбираются события с качественно восстановленными изолированными электроном и мюоном, при этом налагаются ограничения на p_T первого и второго лептонов ($p_T^{\text{lead}} > 25 \text{ ГэВ}/c$, $p_T^{\text{sublead}} > 15 \text{ ГэВ}/c$). На следующем этапе выделяются события с двумя и более адронными струями ($p_T > 30 \text{ ГэВ}/c$, $|\eta| < 4.5$, обозначается как “2 струи” в табл. 1) и затем вводится запрет на струи с b -кварками (“ b -veto” в табл. 1) для подавления доминирующего фона от рождения топ-кварков. Кроме того, ограничивается модуль векторной суммы поперечных импульсов струй, лептонов и недостающего поперечного импульса ($|p_T^{\text{tot}}| < 15 \text{ ГэВ}/c$), и применяются критерии отбора для выделения рождения h -бозона в механизме слияния векторных бозонов ($\Delta Y_{jj} > 3.6$ и $m_{jj} > 600 \text{ ГэВ}/c^2$, где ΔY_{jj} и m_{jj} – разница псевдобыстрот струй и их инвариантная масса, сокращенное наименование – “VBF” в табл. 1). На следующем этапе налагается вето на третью струю с $p_T > 20 \text{ ГэВ}/c$ в области перекрытия трекера и требуется, чтобы лептоны находились между струями, также налагаются ограничения $\Delta\phi_{\ell\ell} < 1.8$ и $m_{\ell\ell} < 50 \text{ ГэВ}/c^2$. Наконец, отбираются события с $m_T < 1.2 m_H$ (“ m_T ” в табл. 1). Отметим, что число событий фона от одиночного и парного рождения топ-кварков и процессов $Z^{(*)} \rightarrow \tau\tau$ домножалось на коэффициенты 0.99 ± 0.01 (1.00 ± 0.04) соответственно; эти коэффициенты получаются из анализа контрольных областей, кинематические

распределения в которых хорошо согласуются с результатами моделирования методом Монте-Карло (см. примеры на рис. 1). В табл. 1 приводятся наблюдаемое количество событий в реальных данных, а также предсказания для сигнала и фонов. Последний этап отбора проходят 156 событий, моделирование предсказывает 67 событий сигнала при суммарном фоне 104 ± 5 событий, что соответствует наблюдаемой (ожидаемой) статистической значимости $4.6(5.9)\sigma$. Значимость сигнала оценивается по формуле $S/(B + (\Delta B)^2)^{0.5}$, где S – величина сигнала, B – фон, ΔB – его неопределенность. На рис. 2 и 3 показаны распределения по m_T на ранних и поздних стадиях отбора. Экспериментальные данные неплохо описываются моделированием методом Монте-Карло. Проводится оценка систематических погрешностей.

Исследование, представленное в настоящей публикации, было дополнительным к основному анализу, основанному на нейронных сетях. Предварительные результаты полного анализа [7] сводятся к тому, что впервые в механизме рождения VBF был обнаружен сигнал $H \rightarrow WW^* \rightarrow e\nu\mu\nu$ со значимостью 7.0 стандартных отклонений (при ожидаемой 6.2 σ) на полной статистике событий, набранной при 13 ТэВ. Измеренное сечение рождения, помноженное на относительную вероятность распада по указанному каналу, составило $0.85_{-0.17}^{+0.20}$ пб, что согласуется с величиной, предсказанной в СМ, 0.81 ± 0.02 пб.

АНАЛИЗ СОБЫТИЙ С ДВУМЯ ЭЛЕКТРОНАМИ И ДВУМЯ МЮОНАМИ

Основной сложностью анализа событий с двумя мюонами или двумя электронами является подавление большого фона от процессов $DY Z^{(*)} \rightarrow ee/\mu\mu$. В настоящей работе представлено первое исследование таких состояний при 13 ТэВ, частично осно-

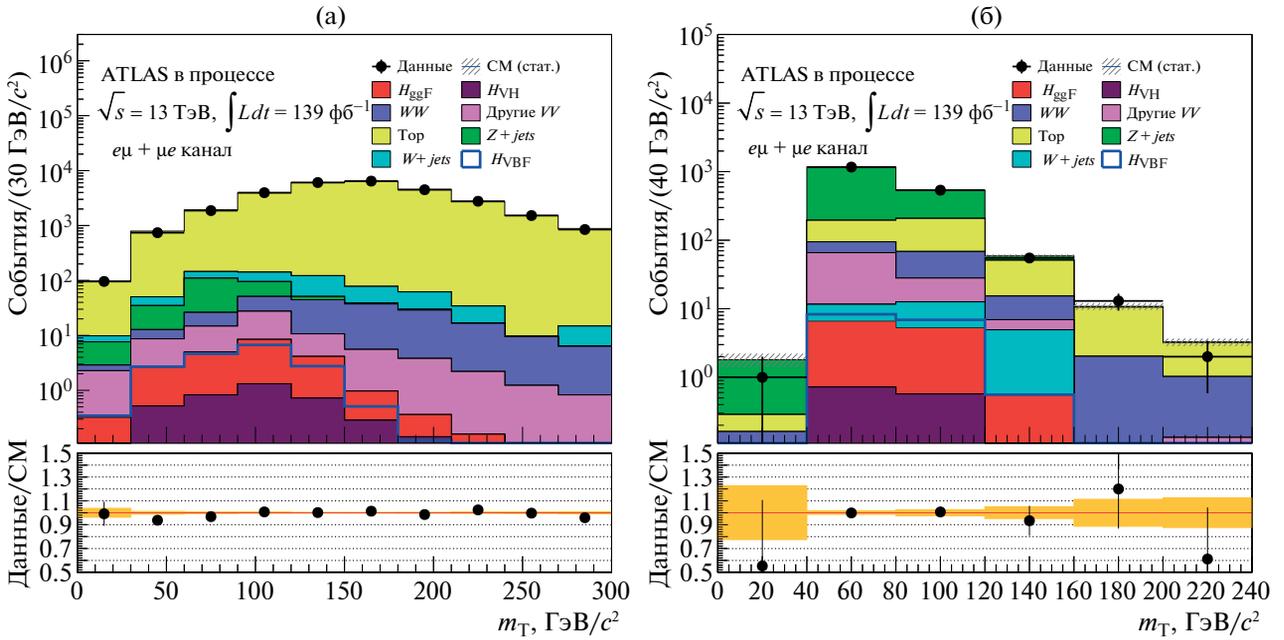


Рис. 1. Распределения по поперечной массе в контрольных областях основных фонов для канала распада бозона Хиггса СМ $H \rightarrow WW^* \rightarrow e\nu\mu$. (а) Контрольная область фона от топ-кварков. (б) Контрольная область фона от $Z \rightarrow \tau\tau$.

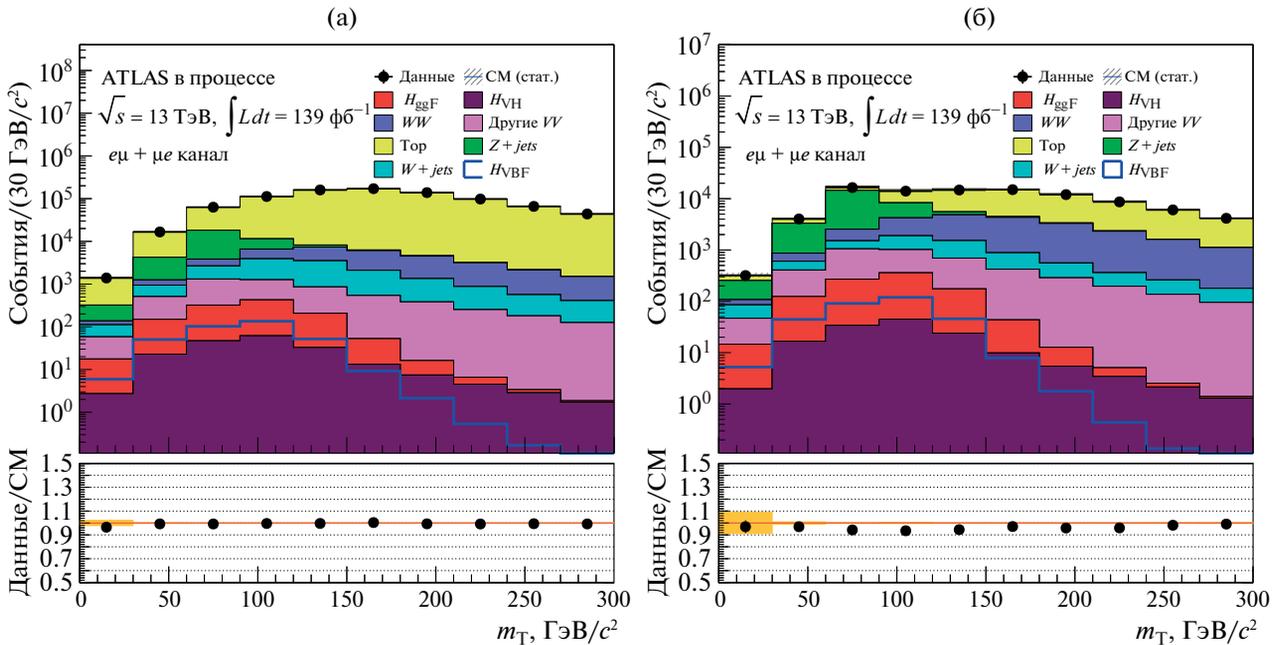


Рис. 2. Распределения по поперечной массе в области сигнала на ранних стадиях отбора для канала распада бозона Хиггса СМ $H \rightarrow WW^* \rightarrow e\nu\mu$. (а) Стадия отбора событий с двумя и более струями. (б) Стадия запрета на b-струи.

ванное на опыте ATLAS при 7 и 8 ТэВ [3]. Отбор событий похож на представленный выше для $e\mu$ -состояний, но вместо ограничения $\Delta\phi_{\ell\ell} < 1.8$ используются критерии $p_T^{\text{miss}} > 50 \text{ ГэВ}/c$ и $E_T^{\text{miss}} > 50 \text{ ГэВ}$ для подав-

ления фона, в первую очередь DY , где p_T^{miss} (E_T^{miss}) — недостающий поперечный импульс (энергия), измеренный(ая) в трекаре (во всем детекторе ATLAS) соответственно. В контрольной области этого

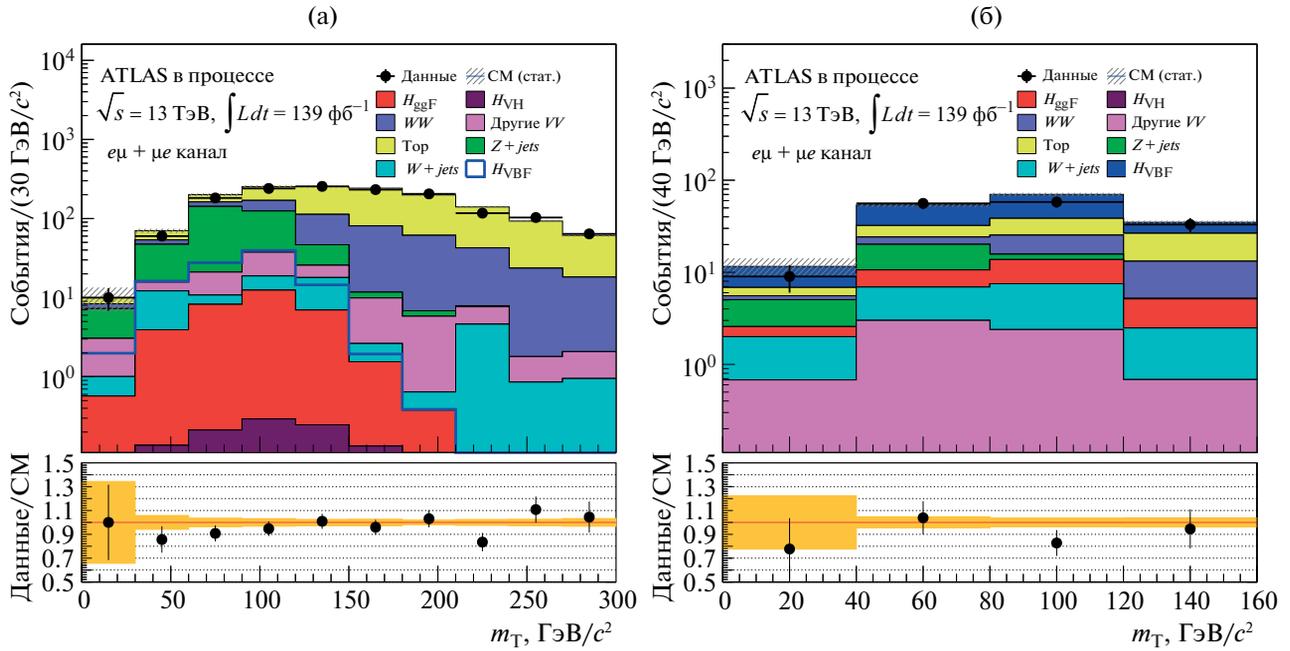


Рис. 3. Распределения по поперечной массе в области сигнала на поздних стадиях отбора для канала распада бозона Хиггса SM $H \rightarrow WW^* \rightarrow e\nu\mu\nu$. (а) Стадия отбора VBF. (б) Последняя стадия отбора.

фона не применяются ограничения $m_{\ell\ell} < 50 \text{ ГэВ}/c^2$ и $m_T < 1.2 m_H$ и берутся события с $20 < E_T^{\text{miss}} < 50 \text{ ГэВ}$, что обеспечивает ортогональность SR и CR. В контрольной области фона от топ-кварков вместо запрета на b -струи отбираются события с одной b -струей и налагается ограничение на т.н. значимость $E_T^{\text{miss}}, S(E_T^{\text{miss}}) > 6$. Коэффициенты пересчета этих фонов на область сигнала оказались

равными 0.88 ± 0.02 и 0.99 ± 0.01 соответственно. На рис. 4 показаны распределения по m_T в упомянутых CRs. Они хорошо описываются моделированием. В табл. 2 приводятся наблюдаемое количество событий в реальных данных, а также предсказания для сигнала и фонов. Отметим, что реальные данные на поздних стадиях отбора пока “закрыты” для анализа; на ранних стадиях (рис. 5) наблюдаемое число событий неплохо согласуется

Таблица 2. Суммарное количество событий (в тыс.) с двумя электронами и двумя мюонами в конечном состоянии в данных 2015–2018 гг. на разных этапах отбора. Приводятся также результаты моделирования методом Монте-Карло для сигнала и основных фонов со статистическими погрешностями в последних значащих цифрах (в скобках). Стадии отбора событий в табл. 2 те же, что и в табл. 1

Отбор	VBF H	$ggH + VH$	WW	Топ	$W + jets$	$Z \rightarrow \ell\ell$	Полный фон	Данные
Предв. отбор	0.55	5.3	1496	892	29.5	10263	12686	12361
2 струи	0.33	1.1	163	695	4.4	1017	1881	1912
b -veto	0.29	0.9	135	48.1	—	855	1037	1038
VBF	0.092	0.030	1.8	0.69	—	16.6	18.9	—
m_T	0.023	0.004	0.025(4)	0.013(1)	0.007(6)	0.145(41)	0.195(42)	—
DY CR	0.050	0.041	3.5	0.55	0.040	27.1	31.2(6)	30959
Топ CR	0.002	0.003	0.068	7.2	0.045	0.087	7.5	7444

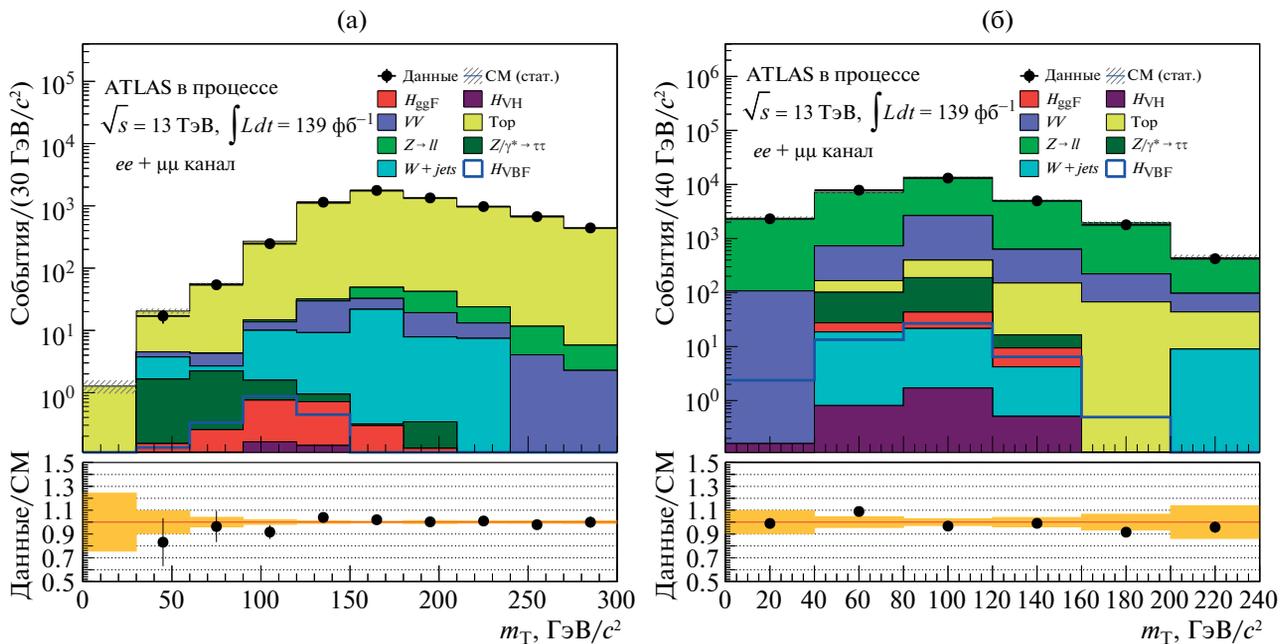


Рис. 4. Распределения по поперечной массе в контрольных областях основных фонов для каналов распада бозона Хиггса СМ $H \rightarrow WW^* \rightarrow (ee\nu\nu + \mu\nu\nu\nu)$. (а) Контрольная область фона от t -кварков. (б) Контрольная область фона от $Z \rightarrow ee/\mu\nu$.

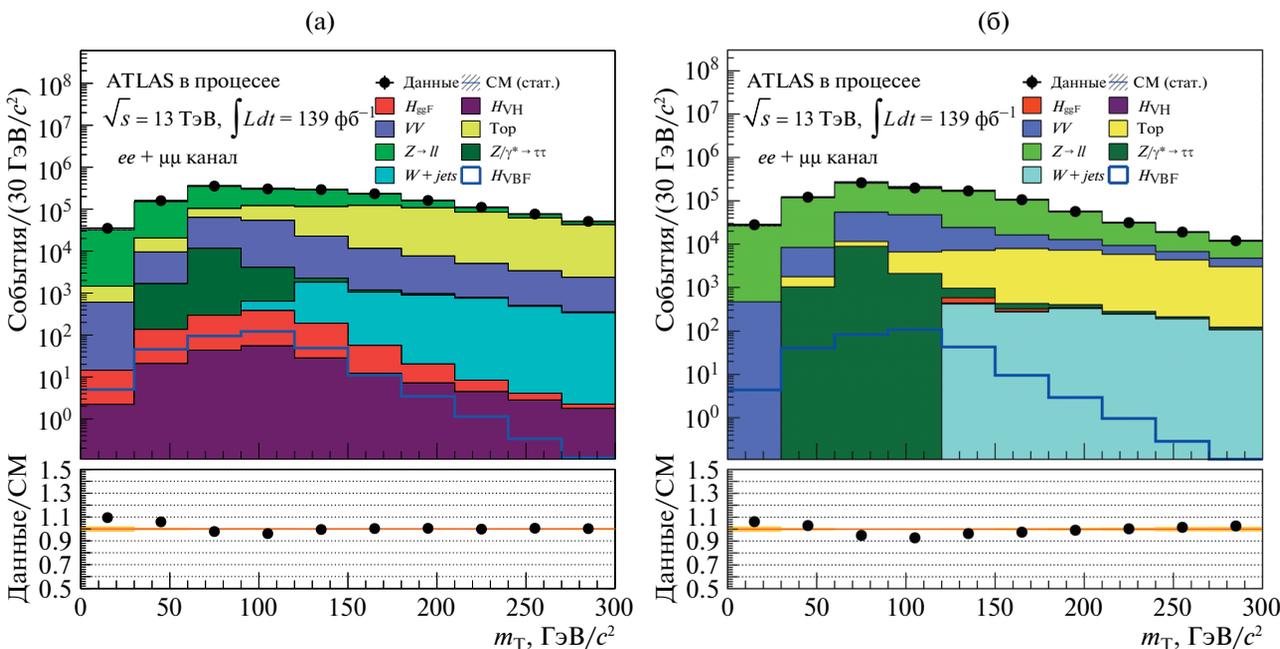


Рис. 5. Распределения по поперечной массе в области сигнала на ранних стадиях отбора для канала распада бозона Хиггса СМ $H \rightarrow WW^* \rightarrow (ee\nu\nu + \mu\nu\nu\nu)$. (а) Стадия отбора событий с двумя и более струями. (б) Стадия запрета на b -струи.

с результатами моделирования, которое предсказывает 23 события сигнала при фоне 195 ± 42 событий, в основном от процессов DY . Ожидаемая значимость сигнала составляет 0.5σ .

Увеличение статистики смоделированных событий DY -фона в 5 раз позволит уменьшить в 2.2 раза указанную погрешность и увеличить значимость сигнала с 0.5 до 1.1σ .

Дальнейшее улучшение этой значимости будет возможно после применения алгоритма мечения сторонних адронных струй, летящими под малыми углами. Ожидается, что таким образом можно будет уменьшить вклад от процессов DY еще в четыре раза [8]. Кроме того, применение нейронной сети может позволить еще сильнее увеличить значимость сигнала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Авторами в составе рабочей группы ATLAS по изучению бозона Хиггса (HWW) завершено изучение событий в контрольных областях и в области сигнала от бозона Хиггса SM в канале распада $H \rightarrow WW^* \rightarrow e\nu\mu\nu$ при 13 ТэВ на полной статистике данных, которое было дополнительным к основному анализу на основе нейронных сетей. Ожидаемая статистическая значимость сигнала в нашем исследовании оказалась равной 5.9σ . Начато сходное изучение событий с двумя мюонами и двумя электронами в конечном состоянии $H \rightarrow WW^* \rightarrow e\nu e\nu/\mu\nu\mu\nu$ и приводятся его первые результаты.

БЛАГОДАРНОСТИ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *ATLAS Collab.* // Phys. Lett. B. 2012. V. 716. P. 1; *CMS Collab.* // Phys. Lett. B. 2012. V. 716. P. 30.
2. *de Florian D. et al.* // Report CERN-2017-002-M. <https://arxiv.org/pdf/1610.07922>.
3. *ATLAS Collab.* // Phys. Rev. D. 2015. V. 91. P. 012006; *CMS Collab.* // J. High Energy Phys. 2014. V. 1. P. 096.
4. *ATLAS Collab.* // Phys. Lett. B. 2019. V. 789. P. 508; *CMS Collab.* // Phys. Lett. B. 2019. V. 791. P. 96.
5. *Particle Data Group* // Prog. Theor. Exp. Phys. 2020. V. 08. P. 083C01.
6. *Ramakoti E.N., Gavriluk A.A., Tsukerman I.I.* // Phys. At. Nucl. 2021. V. 84. P. 1776.
7. *ATLAS Collab.* // Report ATLAS-CONF-2020-045. <https://cds.cern.ch/record/2728055/files/ATLAS-CONF-2020-045.pdf>.
8. *ATLAS Collab.* // Eur. Phys. J. C. 2017. V. 77. P. 590.

A Study of the Standard Model Higgs Boson in the $H \rightarrow WW^* \rightarrow \ell\nu\ell\nu$ Decay Channel in the ATLAS Experiment at the LHC

E. N. Ramakoti¹*, A. A. Gavriluk¹, and I. I. Tsukerman¹

¹National Research Centre “Kurchatov Institute”, Moscow, 123182 Russia

*e-mail: ekaterina.ramakoti@cern.ch

Received September 10, 2021; revised September 15, 2021; accepted September 17, 2021

Abstract—The authors within the Higgs Boson Working Group of the ATLAS experiment at the LHC performed an analysis of events with two leptons and two hadron jets to study Standard Model Higgs boson properties in the $H \rightarrow WW^* \rightarrow \ell\nu\ell\nu$ decay channel in the vector boson fusion production mechanism. The analysis was based on full statistics of proton-proton interactions taken during 2015–2018 year exposures at $\sqrt{s} = 13$ TeV. For the final state with one electron and one muon the study is completed. The observed and expected statistical significances of the signal were calculated without taking into account systematic uncertainties. An investigation of final states with two electrons and two muons and at least two hadronic jets has been started. Signal selection criteria are proposed and a strategy to subtract the main background from Drell–Yan processes was chosen. It is shown that experimental kinematical distributions are reproduced by the MC simulations.

Keywords: Higgs boson, hadronic jets, ATLAS experiment, LHC