

УДК 539.171.112

О ПРИМЕНИМОСТИ ГЕНЕРАТОРОВ EPOS4 И UrQMD (LHC) ДЛЯ АНАЛИЗА 7 ТэВ pp -СТОЛКНОВЕНИЙ

© 2025 г. К. В. Размыслов*, В. В. Монахов, Ф. Ф. Валиев, М. А. Жаров

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный университет», Санкт-Петербург, Россия
*E-mail: st097914@student.spbu.ru

Поступила в редакцию 10.02.2025 г.

После доработки 03.04.2025 г.

Принята к публикации 23.04.2025 г.

Выполнено сравнение результатов работы генераторов событий EPOS4 и UrQMD 3.4 (LHC) на примере моделирования pp -столкновений при сверхвысоких энергиях (7 ТэВ). Показано нарушение в EPOS4 законов сохранения барионного и лептонного зарядов, сохранения энергии. Проведено сравнение с экспериментальными данными, изучено влияние фильтрации событий по сохранению энергии и барионного и лептонного зарядов на распределение множественности в диапазоне псевдобыстрот $|\eta| \leq 1.5$.

Ключевые слова: сверхвысокие энергии, моделирование столкновений, генератор событий, EPOS4, UrQMD

DOI: 10.7868/S3034646025080233

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в области физики высоких и сверхвысоких энергий идет изучение столкновений протонов и ядер и планируются новые эксперименты [1–3]. В таких исследованиях для сравнения экспериментальных результатов с теоретическими моделями часто используются генераторы событий, моделирующие столкновения частиц и опирающиеся на различные теоретические предположения. При этом точность и применимость этих генераторов, зачастую, проверяется разработчиками лишь для отдельных значений параметров моделирования.

Иногда наличие проблем в моделях и их реализациях вовсе игнорируется. Примером может являться часто используемая модель Глаубера [4–5], применение которой без учета закона сохранения энергии может стать причиной некорректных выводов. Несмотря на известность данной проблемы и наличие предложений по ее решению, модель часто используется в расчетах без детального рассмотрения ее применимости [6].

В связи с имеющимся опытом анализа проблем при использовании модели Глаубера и необходимости моделирования событий в физике сверхвысоких энергий, в данной работе рассмотрен вопрос о корректности смоделированных данных и применимости генераторов событий EPOS4 [7–8] и UrQMD 3.4 (LHC) [9]. Выбор генераторов обусловлен новизной EPOS4 и декларированием его широких возможностей [10–15], и ча-

стым применением в физике высоких энергий UrQMD.

Нами смоделированы столкновения типа «протон–протон» (pp) при энергии в системе центра масс $\sqrt{S_{NN}} = 7$ ТэВ с помощью генераторов событий EPOS4 и UrQMD 3.4 (LHC) с целью изучения ограничений их применимости в физике сверхвысоких энергий. Возможности модификации заложенных в генераторы EPOS4 и UrQMD 3.4 (LHC) моделей нами не рассматривались.

Нами выявлено невыполнение в EPOS4 и выполнение в UrQMD 3.4 законов сохранения барионного и электрического заряда. Установлено невыполнение в EPOS4 и выполнение в UrQMD 3.4 закона сохранения энергии и проведена попытка фильтрации событий с отбрасыванием событий, в которых не выполняются законы сохранения. Изучено распределение событий по множественности заряженных частиц в диапазонах псевдобыстрот ($|\eta| \leq 0.5$, $|\eta| \leq 1$, $|\eta| \leq 1.5$) и выполнено сравнение с экспериментальными данными. Проведена проверка влияния фильтрации событий с отбрасываниями событий, нарушающих законы сохранения, на эти распределения.

ПРОВЕРКА ЗАКОНА СОХРАНЕНИЯ БАРИОННОГО, ЛЕПТОННОГО И ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗАРЯДА

Проверим сохранение в результатах генерации событий столкновений разности барионно-

го (B) и лептонного (L) чисел, поскольку и в Стандартной модели квантовой теории поля, и в большинстве расширений этой модели разность $B - L$ сохраняется. Рассмотрим столкновения типа «протон–протон». Для одного протона $B = 1$, $L = 0$, поэтому, в соответствии с исходными ставившимися частицами, ожидаемое значение разности составляет $B - L = 2$. Выявлено, что в сгенерированных в EPOS4 событиях $B - L$ не сохраняется. Дальнейшее исследование показало, что несохранение данной величины для генератора EPOS4 обусловлено изменением именно итогового барионного числа. Полученные значения B меняются от -5 до $+8$, при этом ожидаемое значение величины $B = 2$ имели менее 40% событий.

В UrQMD 3.4 выход распределений B и L за пределы погрешностей вычислений с плавающей точкой не обнаружен.

В данных EPOS4 обнаружены и единичные выбросы в пределах ± 1 лептонного числа L , но их число незначительно (порядка 1 на 10^4 сгенерированных событий). Установлено, что в EPOS4 причины уширения распределения по энергиям и уширения распределения по разности $B - L$ различаются, так как соответствующие события не коррелируют. Кроме того, было обнаружено, что в EPOS4 электрический заряд Q также не сохраняется – менее 20% сгенерированных событий имели ожидаемый заряд, а само распределение было достаточно уширенено (в пределах от -30 до 30 с полушириной 2.5). Следует отметить, что в процессе моделирования в файлах таблиц с результатами, расшифрованных нами по исходным файлам EPOS4, присутствуют «неопознанные» частицы и фрагменты с неопределенными значениями B , L , Q . Вероятно, именно из-за их наличия при моделировании происходит нарушение законов сохранения барионного и электрического зарядов.

ПРОВЕРКА ЗАКОНА СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ

Для генератора EPOS4 на примере pp -столкновений при энергии в системе центра масс $\sqrt{s_{NN}} = 7$ ТэВ обнаружено нарушение закона сохранения энергии (рис. 1).

Для EPOS4 вместо ожидаемого узкого пика при начальной энергии столкновения $E = 7$ ТэВ обнаружено заметное уширение распределения событий по суммарной энергии итоговых продуктов столкновения. По этой причине в дальнейшем изучалась возможность отбрасывания событий с сильно отличными от ожидаемых энергиями. Фильтрация осуществлялась путем удаления событий из первоначально сгенерированного набора на основе результатов в выходных файлах EPOS4.

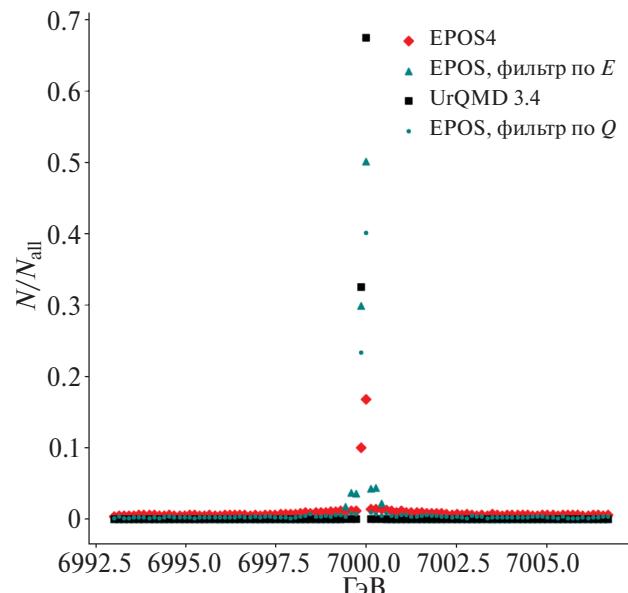


Рис. 1. Распределение по суммарной энергии столкновения в EPOS4 и UrQMD 3.4 (LHC).

На рисунке 1 показана зависимость отношения числа событий N с заданной энергией к полному числу N_{all} сгенерированных событий для pp -столкновений при энергии в системе центра масс $\sqrt{s_{NN}} = 7$ ТэВ. Вертикальными ромбами показано распределение для нефильтрованных событий EPOS4, треугольниками – фильтрованных с отбрасыванием событий, не сохраняющих электрический или барионный заряд, квадратами – распределение для UrQMD.

Необходимо отметить, что в статистике также присутствовали выбросы распределения на десятки и сотни ГэВ, но их количество незначительно относительно основного распределения.

Для генератора UrQMD 3.4 уширения распределения по энергии за пределами погрешностей вычислений с плавающей точкой обнаружено не было.

ИЗУЧЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МНОЖЕСТВЕННОСТИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ПО ПСЕВДОБЫСТРОТАМ

Распределения событий по числу заряженных вылетающих частиц по диапазонам псевдобыстро-
тот, полученные с помощью моделирования в EPOS4 и UrQMD 3.4, сравнивались с данными ALICE [16] (рис. 2). На графике рассмотрен только диапазон $|\eta| \leq 1.5$, но рассматривались в том числе диапазоны $|\eta| \leq 1$ и $|\eta| \leq 0.5$. Результаты во всех диапазонах оказались схожими. Наибольший диапазон псевдобыстро-
тот для рис. 2 выбран нами из-за большего числа экспериментальных точек. Видно, что наилучшее совпадение имеет распределение, созданное при помо-
щи EPOS4 без фильтрации событий, нарушаю-
щих законы сохранения. Для удовлетворительно-

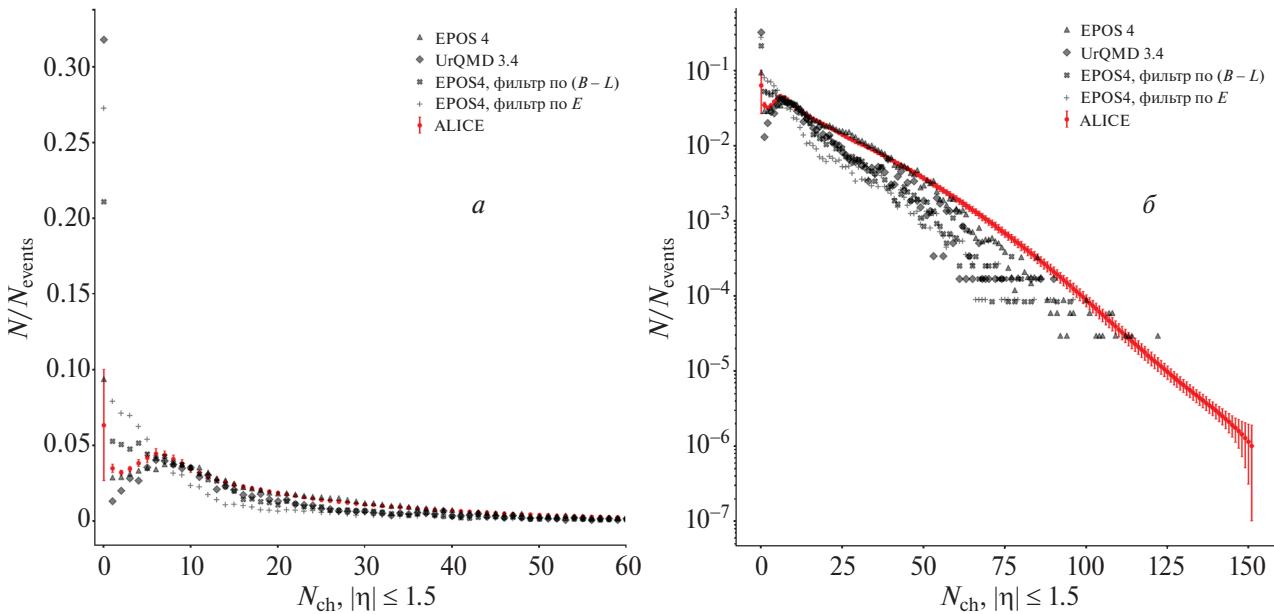


Рис. 2. Распределение событий (N_{events}) по числу исходящих заряженных частиц (N_{ch}) в заданном диапазоне псевдобыстрот. Сравнение с данными ALICE: линейный масштаб (а), логарифмический (б).

го описания экспериментальной зависимости генератором EPOS4 потребовалось не менее 12000 событий.

Генератор UrQMD 3.4 в данном случае показал заметно худшие результаты по сравнению с EPOS4, что соответствует аналогичному исследованию, проведенному для предыдущей версии EPOS 3.4 и генераторов UrQMD 3.4, Pythia 8.306, SMASH 2.0.1 [17]. Интересно отметить недодоценку генератором UrQMD 3.4 вылета заряженных частиц в рассмотренном диапазоне псевдобыстрот $|\eta| \leq 1.5$, предположительно, π^\pm и K^\pm мезонов [17]. Сгенерированные им события дают очень высокий пик вблизи нуля $|\eta|$, который пусть и имеется в экспериментальном распределении (рис. 2), но должен быть в несколько раз меньше. В остальных областях полученные с помощью UrQMD 3.4 значения лежат заметно дальше от полученных экспериментально значений числа рождающихся заряженных частиц, чем полученные с помощью EPOS4.

Установлено, что попытки отбрасывания сгенерированных EPOS4 событий, в которых законы сохранения (энергии, электрического и барионного зарядов) не выполняются, не позволяют улучшить данное распределение. Было сделано предположение, что точность расчета понижается из-за отбрасывания при фильтрации заметной части событий. Поэтому для увеличения точности процедура фильтрации событий была проделана, в т.ч. на большом числе событий ($35 \cdot 10^5$). Однако увеличение объема данных не улучшило распределение. Поэтому нами был сделан вывод, что отклонение модельного распределения от экспериментальных точек не связано напря-

мую с причинами, вызывающими нарушение в EPOS4 законов сохранения.

О ПРИЧИНАХ РАСПЛЫВАНИЯ В EPOS4 РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ПО ЭНЕРГИЯМ И ЗАРЯДАМ

Как было указано, вероятной причиной несохранения в EPOS4 электрического и барионного зарядов является наличие неопознанных частиц и фрагментов с неопределенными значениями Q и B .

Возможной причиной полученных уширенных распределений EPOS4 по энергии и неудачных результатов попыток фильтрации является особенность модели генератора [11, 12], из-за которой в процессе расчетов может «забываться» начальное состояние системы, и накапливание из-за этого погрешностей. Этой же особенностью может объясняться ухудшение при фильтрации распределения событий по числу заряженных частиц, рассмотренное в предыдущем разделе.

Мы предположили, что нарушение законов сохранения могло быть вызвано в том числе особенностями вычисления квантовых гидродинамических эффектов [11, 12], возникающих только в определенных условиях. При этом отбрасывание «неправильных» с точки зрения законов сохранения событий ведет к нарушению пропорции событий, в которых такие условия образовались. В связи с этим нами была проведено сравнение результатов моделирования 7 ТэВ рр-столкновений с включенной и с отключенной опцией учета гидродинамических эффектов. В результате не было обнаружено отличий в

выполнении рассмотренных законов сохранения для pp -столкновений. Данный результат показывает необходимость дальнейших поисков причин, вызывающих в генераторе EPOS4 уширение распределения по энергии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате анализа генерируемых EPOS4 событий в диапазоне псевдобыстрот $|\eta| \leq 1.5$ при столкновениях протон-протон с энергией в системе центра масс $\sqrt{S_{NN}} = 7$ ТэВ было выявлено, что, несмотря на удовлетворительное соответствие распределения событий по множественности рождающихся заряженных частиц с экспериментальными данными, в генераторе EPOS4 наблюдаются нарушения законов сохранения энергии, барионного и электрического заряда.

Обработка результатов работы генератора UrQMD 3.4 при тех же параметрах столкновений показала выполнение рассмотренных законов сохранения, но, вместе с тем, гораздо худшее совпадение распределения множественности рождающихся заряженных частиц с экспериментальными данными.

Отклонена идея фильтрации событий генератора EPOS4 путем отбрасывания событий, нарушающих законы сохранения, поскольку такая фильтрация ухудшает сопоставление с экспериментальными данными по множественности.

Гипотеза о непосредственном влиянии квантовых гидродинамических эффектов на уширение распределения барионного заряда и энергии не подтвердилась.

Работа выполнена при поддержке СПбГУ (шифр проекта 103821868).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Власников А.К., Жеребчевский В.И., Лазарева Т.В. // Изв. РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85. № 5.

С. 614; *Vlasnikov A.K., Zherebchevsky V.I., Lazareva T.V.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2021. V. 85. No. 5. P. 469.

2. Галоян А., Рибон А., Ужинский В. // Изв. РАН. Сер. физ. 2024. Т. 88. № 11. С. 1759; *Galoyan A., Ribon A., Uzhinsky V.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2024. V. 88. P. 1782.
3. Малаев М.В., Рябов В.Г. // Изв. РАН. Сер. физ. 2024. Т. 88. № 8. С. 1274. *Malaev M.V., Rjabov V.G.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2024. V. 88. P. 1286.
4. Glauber R.J. Lectures in Theoretical Physics. New York: Interscience, 1959.
5. Miller M.L., Reiglers K., Sanders S.J., Steinberg P. // Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. 2007. V. 57. P. 205.
6. Иванов А.С., Феофилов Г.А. // Вестн. СПб ун-та. Сер. 4. 2009. № 3. С. 117.
7. Pierog T., Karpenko I., Katz J.M. et al. // Phys. Rev. C. 2015. V. 92. No. 3. Art. No. 034906.
8. <https://klaus.pages.in2p3.fr/epos4>.
9. <https://urqmd.org>.
10. Werner K., Guiot B. // Phys. Rev. C. 2023. V. 108. No. 3. Art. No. 034904.
11. Werner K. // Phys. Rev. C. 2023. V. 108. No. 6. Art. No. 064903.
12. Werner K. // Phys. Rev. C. 2024. V. 109. No. 1. Art. No. 014910.
13. Werner K. // Phys. Rev. C. 2024. V. 109. No. 3. Art. No. 034918.
14. Jahan J., Werner K., Vintache D. // EPJ Web Conf. 2024. V. 295. Art. No. 05007.
15. Jahan J., Ratti C., Stefaniak M., Werner K. // Phys. Rev. C. 2024. V. 110. Art. No. 035201.
16. Adam J. et al. (ALICE Collaboration) // Eur. Phys. J. 2017. V. 77. P. 1.
17. Азаркин М.Ю., Киракосян М.Р. // ЖЭТФ. 2023. Т. 164. № 5(11). С. 731. *Azarkin M.Y., Kirakosyan M.R.* // JETP. 2023. V. 137. P. 630.

On the applicability of the EPOS4 and UrQMD (LHC) generators for the analysis of 7 TeV pp -collisions

K. V. Razmyslov*, V. V. Monakhov, F. F. Valiev, M. A. Zharov

St. Petersburg State University, Saint-Petersburg, 198504 Russia

*e-mail: st097914@student.spbu.ru

We compared the results of the EPOS4 and UrQMD 3.4 (LHC) event generators using the example of pp -collisions at ultra-high energies (7 TeV). Violation of the laws of conservation of baryon and lepton charges and conservation of energy in EPOS4 is shown. A comparison with experimental data is made, the influence of event filtering by conservation of energy and baryon and lepton charges on the multiplicity distribution in the pseudorapidity range $|\eta| \leq 1.5$ is studied.

Keywords: ultra-high energies, collision simulation, event generator, EPOS4, UrQMD