

Формулы Фармации. 2024. Т. 6, № 4. С. 52–57

АКТУАЛЬНАЯ ПРОБЛЕМА: ДИСКУССИОННАЯ ТРИБУНА

Краткое сообщение

УДК 574/577: 504.05: 504.06

DOI: <https://doi.org/10.17816/phf633833>

# Экологические и экономические аспекты повышения энергоэффективности жизненного цикла производства вакцин

Е. А. Ячникова<sup>1</sup>, Н. А. Скларова<sup>1</sup><sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный химико-фармацевтический университет Министерства здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, РоссияАвтор, ответственный за переписку: Екатерина Андреевна Ячникова, [ekaterina.yachnikova@spcpcu.ru](mailto:ekaterina.yachnikova@spcpcu.ru)

**АННОТАЦИЯ.** Работа посвящена анализу влияния повышения энергоэффективности на экологические и экономические аспекты жизненного цикла производства вакцин. В условиях растущей потребности в глобальной вакцинации и учитывая значительные потери из-за нарушений холодовой цепи, исследование акцентирует внимание на снижении энергопотребления и оптимизации ресурсного использования. Анализ затрат, выбросов парниковых газов, и влияния на себестоимость вакцин позволит определить экономические и экологические выгоды от внедрения энергоэффективных технологий, способствуя устойчивому развитию и повышению доступности вакцинации.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** вакцины; энергоэффективность; холодовая цепь; устойчивое развитие; экологическое воздействие; экономические показатели; жизненный цикл

## ГЛОССАРИЙ:

Вакцина – биологический препарат, стимулирующий иммунитет к инфекционным заболеваниям; Холодовая цепь – система поддержания заданной температуры для хранения и транспортировки вакцин; Энергоэффективность – эффективное использование энергии для достижения заданных результатов; Углеродный след – общее количество парниковых газов, выброшенных в результате деятельности; Рефрижератор – транспортное средство, оборудованное холодильной установкой; Портативный контейнер – переносной контейнер для хранения и транспортировки вакцин при низких температурах; Сухой лёд – твердая углекислота (CO<sub>2</sub>), используемая в качестве хладагента; Температурный режим – диапазон температур, необходимый для сохранения качества вакцины; Жизненный цикл – все этапы производства, использования и утилизации продукта; Эксплуатационные расходы – затраты на содержание и использование оборудования и технологий; Себестоимость – стоимость производства единицы продукции; Устойчивое развитие – развитие, удовлетворяющее потребности настоящего без ущерба для будущих поколений; Вакцинация – процесс введения вакцины для формирования иммунитета; Эмиссия – выброс загрязняющих веществ в окружающую среду; Холодильная камера – специальное помещение для хранения вакцин при низких температурах; Глобальная вакцинация – масштабная вакцинация населения в мировом масштабе; Иммунитет – способность организма противостоять инфекционным заболеваниям; Логистика – организация доставки и хранения товаров.

В настоящее время энергосберегающие мероприятия на промышленных предприятиях имеют особую значимость [1–4]. Повышение энергоэффективности достигается за счет внедрения инновационных, энергосберегающих технологий. В условиях глобальной вакцинации, особенно в свете недавних пандемий, таких как COVID-19, актуальность этой задачи многократно возрастает. Необходимо не только обеспечить доступность и безопасность вакцин, но и минимизировать их экологический след, оптимизируя затраты на всех этапах жизненного цикла.

Экологические выгоды от повышения энергоэффективности включают снижение выбросов парниковых газов и рациональное использование ресурсов, что способствует смягчению антропогенного воздействия на окружающую среду [5]. Экономически, эффективное использование ресурсов приводит к сокращению расходов на энергию, сырье и логистику, способствуя устойчивому развитию и повышению конкурентоспособности. Снижение себестоимости вакцин благодаря оптимизации жизненного цикла производства повышает их доступность для населения и способствует масштабной вакцинации в глобальном масштабе.

Особое значение имеет совершенствование холодильной цепи, поскольку значительные потери вакцин обусловлены ненадлежащим хранением и транспортировкой [6]. Таким образом, экологическая и экономическая устойчивость производства вакцин – важнейший аспект, представляющий интерес не только для производителей, но и для всего общества в контексте борьбы с пандемиями и сохранения окружающей среды.

Исследование посвящено комплексному анализу влияния повышения энергоэффективности на экологические и экономические показатели жизненного цикла производства вакцин. В рамках работы будут изучены источники энергопотерь, оценено воздействие энергопотребления на окружающую среду и проанализированы экономические выгоды от внедрения энергоэффективных технологий.

Производство вакцин является сложным и ответственным процессом, который подвергается строгому контролю, чтобы гарантировать их безопасность и эффективность. Основными требованиями к производству вакцин являются:

1. Соблюдение стандартов качества: производство вакцин должно соответствовать высоким стандартам качества и безопасности, установленным профильными международными организациями, такими как Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) и Европейское агентство по лекарственным средствам (EMA).

2. Стабильные температурные режимы: многие вакцины требуют хранения при определенных температурах, поэтому производственные процессы должны обеспечивать стабильные температурные режимы для сохранения их эффективности.

3. Специализированное оборудование: биореакторы, системы очистки и обеззараживания воды, холодильные установки.

4. Контроль качества: производство вакцин должно включать систему контроля качества, которая обеспечивает мониторинг всех этапов производства для обнаружения и предотвращения возможных дефектов или загрязнений.

5. Безопасность персонала: сотрудники, занимающиеся производством вакцин, должны соблюдать правила безопасности и использовать соответствующие средства защиты для предотвращения контакта с потенциально опасными веществами.

6. Чистота производственных помещений: производственные помещения, в которых производятся вакцины, должны соответствовать высоким стандартам чистоты и санитарии, чтобы предотвратить загрязнение вакцин и обеспечить их безопасность.

С точки зрения энергоэффективности наиболее значимыми остаются соблюдение стандартов качества, вытекающее отсюда поддержание стабильных температурных режимов, а также использование специализированного оборудования.

Выявление и устранение критических параметров в энергоэффективности производства вакцин является важным шагом для повышения эффективности производства, сокращения затрат и снижения негативного воздействия на окружающую среду. Для этого необходимо рассмотреть, что собой представляет жизненный цикл производства вакцины. Обобщенная схема представлена на рисунке 1.

Жизненный цикл включает в себя разработку и испытания, производство, логистику холодильной цепи, низкотемпературное хранение как временное, так и в пунктах вакцинации, а также утилизацию вакцин. Исходя из этого, мы можем определить основные критические параметры или так называемые узкие места энергоэффективности. К ним можно отнести:

1. Температурные режимы: поддержание строгих температурных режимов во время производства, транспортировки и хранения вакцин требует значительных затрат энергии. Оптимизация систем охлаждения и отопления, а также использование энергоэффективного оборудования для контроля температуры, может помочь снизить энергопотребление.

2. Эксплуатация биореакторов и другого оборудования: процессы, связанные с культивацией и очисткой вакцинных культур, могут потреблять большое количество энергии из-за использования высокотехнологичного оборудования. Улучшение энергоэффективности этих процессов с помощью современных технологий и оптимизации процессов может снизить энергопотребление.

3. Водочистка и обеззараживание: в силу высоких требований к чистоте воды, используемой для производства вакцин, процессы очистки воды также могут оказываться довольно энергоемкими.

4. Управление энергопотреблением: эффективное управление энергопотреблением в производстве вакцин, такое как мониторинг и контроль потребления энергии, может помочь выявить и устранить проблемные места и направить силы на снижение общего энергопотребления.

Главным образом, наибольшие затраты энергии характерны для поддержания необходимых температурных режимов в процессе транспортировки в силу того, что вакцины доставляются по всему миру, а также в отдаленные регионы, а для этого необходимо использование как воздушного транспорта, так и наземного, чему сопутствуют большие затраты энергии и соответственно выбросы углекислого газа.

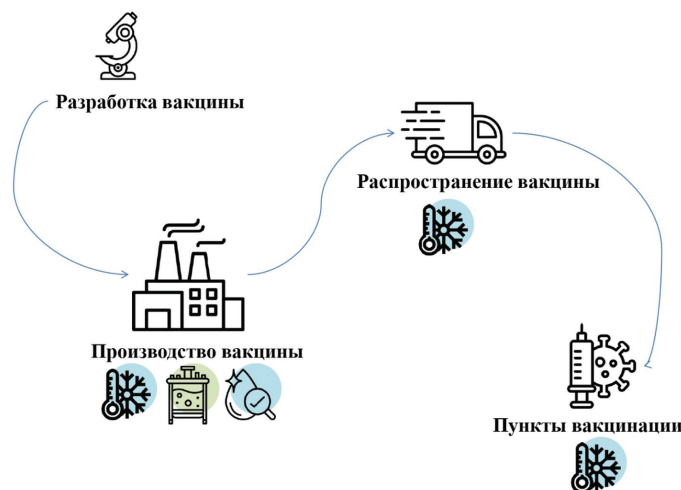


Рис. 1. Схема жизненного цикла производства вакцины  
Fig. 1. The scheme of the vaccine production life cycle

Когда вакцина нагревается или чрезмерно охлаждается, это приводит к снижению ее эффективности или даже к инаktivации. Большинство вакцинных препаратов рассчитано на хранение в холодильнике при температуре от 2 до 8 °C. Некоторые требуют охлаждения до –20 °C, а более современные вакцины должны храниться при крайне низкой температуре –70 °C.

Обычные бытовые холодильники не обеспечивают стабильного поддержания точного температурного режима, поэтому для хранения этих особо ценных вакцинных препаратов требуется специализированное медицинское холодильное оснащение.

Воздействие потребления энергии и выбросов парниковых газов может значительно различаться в зависимости от конкретного варианта вакцины.

По оценкам, вакцины, к которым предъявляются требования по хранению при сверхнизких температурах, оказывают воздействие на окружающую среду в 35 раз большее, чем вакцины, хранящиеся в обычных медицинских морозильных камерах.

Приведенное различие рассматривалось по показателям потребленной энергии и выбросов углекислого газа за 10 лет (усредненный срок службы оборудования), учтенным лишь для хранения вакцин, не беря во внимание производство и транспортировку.

В качестве примера рассмотрим вакцины против COVID-19: Pfizer (хранение при –70 °C), Sputnik V (–18 °C) и CoronaVac (2 °C). Различия в объеме выбросов CO<sub>2</sub> для разных стран обусловлены вариациями в углеродном следе электроэнергетики, используемой для поддержания температурного режима хранения.

К примеру в Бразилии, где этот показатель минимален (0,088 кг CO<sub>2</sub>/кВтч), эмиссия CO<sub>2</sub> значительно ниже. Для России этот показатель составляет 0,348 кг CO<sub>2</sub>/кВтч [7], что меньше среднемирового значения. Помимо финансово-технических аспектов, и учитывая неопределимость человеческой жизни, данные о выбросах CO<sub>2</sub> могут служить дополнительным критерием при принятии решений о выборе вакцины.

Для поддержания необходимой холодовой цепи вакцины транспортируются в специализированном оборудовании, обеспечивающем сохранность препарата. Из аэропорта в холодильную камеру склада вакцины доставляются рефрижераторами. Далее, с использованием портативных контейнеров со льдом, препараты распределяются по региональным центрам и хранятся в холодильниках. При проведении вакцинации за пределами региональных учреждений, для доставки в пункты вакцинации часто требуется повторное использование портативных холодовых контейнеров [8]. Согласно результатам исследования, 60% расхода топлива на транспортировку вакцин приходится на поддержание температурного режима, остальные 40% – на управление транспортным средством [9].

Рассмотрим приблизительное распределение энергозатрат на протяжении всего жизненного цикла производства 1,56 × 10<sup>10</sup> доз вакцины против COVID-19, приведенное в таблице 1. Здесь мы можем заметить, что значительная часть энергии приходится на холодовую цепь и эти энергозатраты составляют почти 70% от суммарных затрат на всю транспортировку. В зависимости от расстояний транспортировки этот процент может меняться и достигать даже 99%.

В целом, исходя из приведенных значений, оказывается, что на одну дозу вакцины требуется примерно 0,69 кВт\*час энергии, что соответствует 329г эквивалентного CO<sub>2</sub>. Для единичной дозы это число выглядит небольшим, но учитывая масштабность вакцинации и разнообразие вакцин, общие затраты могут существенно возрастать [10].

В заключение следует подчеркнуть важность совершенствования холодовой цепи, модернизации и использования специализированного холодильного оборудования для вакцин, а также регулярного технического обслуживания всех установок для обеспечения максимальной эффективности. Это позволит значительно сократить выбросы загрязняющих веществ и уменьшить негативное воздействие на окружающую среду. Более того, внедрение энергоэффективных мер при-

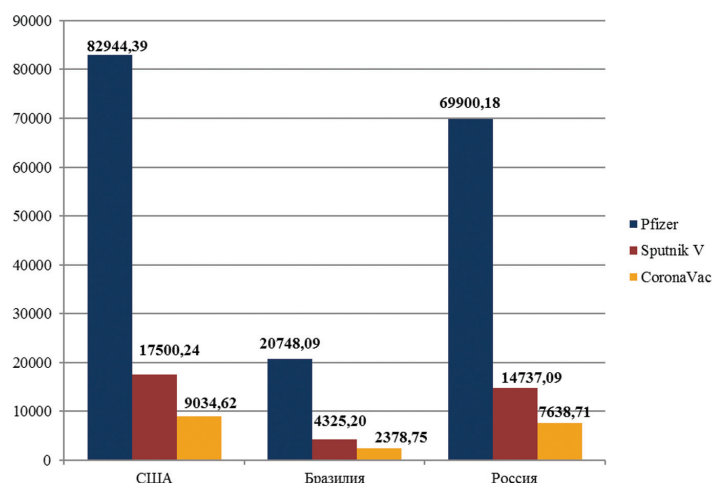


Рис. 2. Эмиссия CO<sub>2</sub> в результате хранения 100 тыс. доз вакцин за 10 лет, кг CO<sub>2</sub>  
Fig. 2. CO<sub>2</sub> emissions as a result of storage of 100 thousand doses of vaccines over 10 years, kg of CO<sub>2</sub>

#### Обобщение предполагаемого глобального потребления энергии и выбросов CO<sub>2</sub>

Табл. 1.

Table 1.

#### Summary of estimated global energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions

| Этап жизненного цикла                                                                        | Оценка потребления энергии и выбросов CO <sub>2</sub>                    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| Производство вспомогательных материалов (шприцев, флаконов, защитной одежды, дезинфектантов) | $1,032 \times 10^{10}$ кВт*ч                                             |
| Производство вакцины                                                                         | $5,2 \times 10^5$ кВт*ч                                                  |
| Холодовая цепь                                                                               | $2,5 \times 10^8$ кВт*ч<br>(=68,9% от общих затрат на транспортировку)   |
| Низкотемпературное хранение                                                                  | $4,5 \times 10^6$ кВт*ч                                                  |
| Пункты вакцинации                                                                            | $1,87 \times 10^8$ кВт*ч                                                 |
| Утилизация отходов                                                                           | $3,7 \times 10^7$ кВт*ч                                                  |
| Потери                                                                                       | $2,1 \times 10^6$ кВт*ч                                                  |
| Предполагаемая сумма                                                                         | $1,08 \times 10^{10}$ кВт*ч ( $5,13 \times 10^6$ т CO <sub>2</sub> -экв) |

ведёт к существенному снижению эксплуатационных расходов на производство вакцин, включая затраты на энергию, сырье и другие ресурсы, что в конечном итоге может привести к снижению цен для потребителей.

Наконец, повышение энергоэффективности стимулирует научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, способствуя технологическому прогрессу в медицинской отрасли.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Littig B. Lebensführung revisited. Zur Aktualisierung eines Konzepts im Kontext der sozial-ökologischen Transformationsforschung. Berlin: Rosa-Luxemburg-Stiftung; 2016.
2. Kettner C., Kletzan-Slamanig D., Köppl A., et al. A Cross-Country Comparison of Sustainable Energy Development in Selected EU Members. J Sustain Res. 2019;11:e190017. doi: 10.20900/jsr20190017.
3. Cullen J. M., Allwood J. M. The efficient use of energy: Tracing the global flow of energy from fuel to service. Energy Policy. 2010; 38: 75–81.

4. TWI 2050. The world in 2050. Annual Report 2017. Laxenburg (Austria): IIASA; 2017. doi: 10.1016/j.enpol.2009.08.054.
5. Перельгин В. В., Слярова Н. А., Мирошниченко Ю. В., Иванов С. В., Сахаров В. А., Драчкова И. М., Жаринов М. В. Обеспечение энергетической эффективности на предприятиях фармацевтической промышленности в парадигме снижения техногенной нагрузки на окружающую среду // Формулы Фармации. – 2020. – Т. 2. – № 4. – С. 104–117. doi: 10.17816/phf50668
6. Santos A. F., Gaspar P. D., de Souza H. J.L. Evaluating the Energy Efficiency and Environmental Impact

of COVID-19 Vaccines Coolers through New Optimization Indexes: Comparison between Refrigeration Systems Using HFC or Natural Refrigerants. *Processes*. 2022; 10(4):790. doi: 10.3390/pr10040790

7. Santos A. F., Gaspar P. D., de Souza H. J.L. Refrigeration of COVID-19 Vaccines: Ideal Storage Characteristics, Energy Efficiency and Environmental Impacts of Various Vaccine Options. *Energies*. 2021; 14(7):1849. doi: 10.3390/en14071849

8. Производство, безопасность и контроль качества / [Электронный ресурс] // Всемирная организация

здравоохранения: [сайт]. – URL: <https://www.who.int/ru/news-room/feature-stories/detail/manufacturing-safety-and-quality-control> (дата обращения: 07.06.2024).

9. Yu. R., Yun. L., Chen. C., Tang. Y., Fan. H., Qin. Y. Vehicle Routing Optimization for Vaccine Distribution Considering Reducing Energy Consumption. *Sustainability*. 2023; 15(2):1252. doi: 10.3390/su15021252

10. Klemes J. J., Jiang P., Fan Y. V., Bokhari A., Wang X. C. COVID-19 pandemics Stage II – Energy and environmental impacts of vaccination. *Renew Sustain Energy Rev*. 2021 Oct;150:111400. doi: 10.1016/j.rser.2021.111400

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Екатерина Андреевна Ячникова** – студент 4 курса Санкт-Петербургского государственного химико-фармацевтического университета Министерства здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия, [ekaterina.yachnikova@spspu.ru](mailto:ekaterina.yachnikova@spspu.ru)

**Наталья Анатольевна СклярOVA** – канд. техн. наук, доцент кафедры промышленной экологии Санкт-Петербургского государственного химико-фармацевтического университета Министерства здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия, [natalia.sklyarova@pharminnotech.com](mailto:natalia.sklyarova@pharminnotech.com)

**Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.**

Статья поступила в редакцию 26.06.2024 г., одобрена после рецензирования 01.11.2024 г., принята к публикации 10.12.2024 г.

Статья доступна по лицензии CC BY-NC-ND 4.0 International © Эко-Вектор, 2024

Pharmacy Formulas. 2024. Vol. 6, no. 4. P. 52–57

ACTUAL PROBLEMS: DISCUSSION TRIBUNE

Short message

# Environmental and economic aspects of improving the energy efficiency of the vaccine production life cycle

Ekaterina A. Yachnikova<sup>1</sup>, Nataliya A. Sklyarova<sup>1</sup><sup>1</sup>Saint Petersburg State Chemical and Pharmaceutical University of the Ministry of Health of the Russian Federation, Saint Petersburg, Russia

Corresponding author: Ekaterina A. Yachnikova, ekaterina.yachnikova@spcpu.ru

**ABSTRACT.** The work is devoted to the analysis of the impact of energy efficiency improvements on the environmental and economic aspects of the vaccine production life cycle. In the context of the growing need for global vaccination and taking into account significant losses due to violations of the cold chain, the study focuses on reducing energy consumption and optimizing resource use. The analysis of costs, greenhouse gas emissions, and the impact on the cost of vaccines will determine the economic and environmental benefits of implementing energy-efficient technologies, contributing to sustainable development and increasing the availability of vaccination.

**KEYWORDS:** vaccines; energy efficiency; cold chain; sustainable development; environmental impact; economic indicators; life cycle

## REFERENCES

1. Littig B. Lebensführung revisited. Zur Aktualisierung eines Konzepts im Kontext der sozial-ökologischen Transformationsforschung. Berlin: Rosa-Luxemburg-Stiftung; 2016.
2. Kettner C., Kletzan-Slamanig D., Köppl A., et al. A Cross-Country Comparison of Sustainable Energy Development in Selected EU Members. *J Sustain Res.* 2019;1: e190017. doi: 10.20900/jsr20190017.
3. Cullen J. M., Allwood J. M. The efficient use of energy: Tracing the global flow of energy from fuel to service. *Energy Policy.* 2010; 38: 75–81.
4. TWI 2050. The world in 2050. Annual Report 2017. Laxenburg (Austria): IIASA; 2017. doi: 10.1016/j.enpol.2009.08.054.
5. Pereygin V. V., Sklyarova N. A., Miroshnichenko Y. V., Ivanov S. V., Sakharov V. A., Drachkova I. M., Zharikov M. V. Ensuring energy efficiency at pharmaceutical enterprises in the paradigm of reducing the technogenic load on the environment // *Pharmacy Formulas.* – 2020. – Vol. 2. – N. 4. – P. 104–117. doi: 10.17816/phf50668. (In Russ.)
6. Santos A. F., Gaspar P. D., de Souza H. J.L. Evaluating the Energy Efficiency and Environmental Impact of COVID-19 Vaccines Coolers through New Optimization Indexes: Comparison between Refrigeration Systems Using HFC or Natural Refrigerants. *Processes.* 2022; 10(4):790. <https://doi.org/10.3390/pr10040790>.
7. Santos A. F., Gaspar P. D., de Souza H. J.L. Refrigeration of COVID-19 Vaccines: Ideal Storage Characteristics, Energy Efficiency and Environmental Impacts of Various Vaccine Options. *Energies.* 2021; 14(7):1849. doi: 10.3390/en14071849.
8. Proizvodstvo, bezopasnost' i kontrol' kachestva / [Elektronnyi resurs] // Vsemirnaya organizatsiya zdoravookhraneniya: [sait]. – URL: <https://www.who.int/ru/news-room/feature-stories/detail/manufacturing-safety-and-quality-control>.
9. Yu. R., Yun. L., Chen. C., Tang. Y., Fan. H., Qin. Y. Vehicle Routing Optimization for Vaccine Distribution Considering Reducing Energy Consumption. *Sustainability.* 2023; 15(2):1252. doi: 10.3390/su15021252.
10. Klemeš J. J., Jiang P., Fan Y. V., Bokhari A., Wang X. C. COVID-19 pandemics Stage II – Energy and environmental impacts of vaccination. *Renew Sustain Energy Rev.* 2021 Oct;150:111400. doi: 10.1016/j.rser.2021.111400.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Ekaterina A. Yachnikova** – 4<sup>th</sup> year student Saint Petersburg State Chemical and Pharmaceutical University, Saint Petersburg, Russia, ekaterina.yachnikova@spcpu.ru

**Nataliya A. Sklyarova** – Ph.D. in Engineering Sciences, Associate Professor at the Industrial Ecology Department, Saint Petersburg State Chemical and Pharmaceutical University, Saint Petersburg, Russia, natalia.sklyarova@pharminnotech.com

The authors declare no conflicts of interests.

The article was submitted June 26, 2024; approved after reviewing November 01, 2024; accepted for publication December 10, 2024.

The article can be used under the CC BY-NC-ND 4.0 license © Eco-Vector, 2024