

Философские и научные проблемы принципа наименьшего действия.

Терехович Владислав Эрикович

Кафедра философии науки и техники, Философский факультет,
Санкт-Петербургский государственный университет
v.terekhovich@gmail.com

Принцип наименьшего действия находится в центре большинства разделов естествознания, являясь одним из самых удобных инструментов для расчетов состояния и движения объектов. С этим принципом связано большое число философских и научных проблем, что не позволяет однозначно определить причины его универсальности, его место в системе научных законов, а также его связь с причинностью и реальностью. В статье сформулировано шестнадцать таких проблем, решение которых может привести к открытию универсального экстремального принципа.

Ключевые слова и фразы: вариационные принципы, аналитическая механика, обобщение физических законов, философия науки.

Введение.

Артур Эддингтон в 1923 году писал о двух великих обобщениях науки – принципе наименьшего действия и втором законе термодинамики [23, с. 149]. В отличие от второго закона, принцип наименьшего действия (далее ПНД) – один из основных экстремальных или вариационных принципов – сегодня явно обделен вниманием философов. Этот принцип находится в центре основных разделов физики – классической, релятивистской и квантовой механики, электродинамики, термодинамики, теории поля, космологии [20]. ПНД претендует на заметное место в теории информации, в биологии, в задачах оптимального управления, то есть в областях, не связанных ни с механическим движением, ни с геометрией, ни с понятием «действия».

Несмотря на достоинства, ПНД не вписывается в философские основания доминирующих научных парадигм. Его не удастся вывести из других принципов, а для описания траекторий и состояний в этом принципе используются понятия, более привычные

для философских трактатов. Возможно, поэтому Р. Фейнман считал ПНД философским принципом, а К. Ланцош предлагал не избегать в научных трактатах философских дискуссий о роли вариационных принципов механики [9, с. 21]. Л. С. Полак с сожалением констатировал, что ученые все еще не знают, почему значительная часть физических явлений природы могут быть описаны через вариационные принципы [15, с. 258]. В. П. Визгин сравнивает непостижимость эффективности аналитической механики, изучающей экстремальные или вариационные принципы, с непостижимостью эффективности математики, и наряду с онтологиями математической и собственно физической предлагает рассматривать отдельную третью онтологию теорфизики – аналитико-механическую [4].

Все экстремальные принципы можно свести к общей форме: действительное движение или состояние системы отличается от всех возможных при данных граничных условиях тем, что некий функционал, характеризующий систему в целом, стационарен и принимает экстремальное значение. Другими словами, любая система ведёт себя так, чтобы одна из ее основных характеристик принимала минимальное или максимальное значение из всех возможных. В ПНД таким функционалом является «действие», которое может выражаться интегралами по времени, по траектории в пространстве-времени или по объему, причем объем может быть любой размерности. Величина действия не всегда минимальна, иногда она максимальна, но всегда стационарна. Стационарность действия означает, что бесконечно малые возмущения некоторой функции не вызывают изменения действия в первом порядке малости. Экстремальные принципы описывают стационарный процесс (траекторию движения) в n -мерном конфигурационном пространстве, к которому стремятся все процессы (траектории), возможные в данных условиях. Частный случай стационарного процесса – процесс равновесный, при котором скорость изменения функционала, характеризующего систему или процесс в целом, равна нулю. Частный случай равновесного процесса – равновесное состояние, когда не только скорость изменения этого функционала, но и скорости изменения других характеристик системы равны нулю.

Существующая неопределенность в отношении одного из фундаментальных принципов науки связана с тем, что ученые не считают философский анализ ПНД своей сферой, а философы, доверяя ученым, видят в нем лишь формальный метод вычислений. Однако, философских и методологических проблем, связанных с ПНД, достаточно много. Их можно объединить в три группы. Первая группа проблем заключена в разнообразии формулировок ПНД, используемых для описания очень разных природных процессов. Вторая группа проблем касается места ПНД в общей системе законов. Третья группа объединяет проблемы соотношения в ПНД разных типов причинности – однозначной,

вероятностной, действующей и целевой, а также проблемы реальности возможных движений и состояний. Каждая из перечисленных далее проблем, будет проиллюстрирована мнением ученых и философов, а в заключении будут обозначены возможные направления их решения.

Разнообразие форм принципа наименьшего действия.

1. *Почему «действие» в стационарных состояниях системы всегда стремится к экстремальным значениям?* Л. Эйлер, считал, что природа повсюду действует согласно некоему принципу максимума и минимума и именно в этом следует искать подлинные основы метафизики [3, с. 746].

2. *Почему в одних случаях «действие» стремится к минимуму, в других – к максимуму?* Учитывая данный факт, У. Гамильтон сделал философское заключение: «Хотя закон наименьшего действия стал, таким образом, в ряд с высочайшими теоремами физики, тем не менее, его претензии на космологическую необходимость на основании экономии во вселенной теперь обычно отвергаются. Среди других причин это вытекает из того, что величина, которая претендует на то, чтобы быть сэкономленной, в действительности часто расточительно расходует» [1, с. 38].

3. *Почему лагранжиан во многих экстремальных принципах выражается через разность двух энергетических характеристик системы?* Например, минимум разности кинетической и потенциальной энергии в принципе Гамильтона Фейнман объяснял равновесием между желанием раздобыть как можно больше потенциальной энергии и желанием как можно сильнее уменьшить количество кинетической энергии [21, с. 100]. Для электромагнитного поля минимизируется разность квадратов напряженностей электрического и магнитного полей. В универсальном экстремальном принципе термодинамики И. Дьярмати максимизируется разность производства энтропии и потенциалов рассеивания [7, с. 167].

4. *В чем заключается физический и философский смысл понятия «действие» в разных формах ПНД?* Г. Лейбниц считал, что Бог наиболее экономичным образом распорядился пространством и временем и при помощи наипростейших средств он произвел наибольшие действия [10, с. 404]. Величину, которая может быть минимальной или максимальной в процессе движения, Лейбниц определил как произведение «живой силы» (кинетической энергии) на время и назвал ее «действием» [3, с. 22]. Минимальность действия сопоставляли то с наименьшей кривизной геодезических линий (Г. Герц), то с максимальной вероятностью (А. Эддингтон), то с суммарной фазой волны вероятности (Р. Фейнман). Но для многих

физиков, действие, в отличие от энергии, вовсе не физическая величина, а математический объект [11].

5. *В чем смысл минимального кванта действия Планка? Как классическое действие связано с действием квантовым?* Л. де Бройль рассматривал квант действия в качестве соединительного звена между корпускулярным и волновым представлениями о материальных частицах [6, с. 135]. Э. Шредингер был уверен, что принцип Гамильтона – аналог принципа Ферма для распространения волн в конфигурационном пространстве, и только при волновом способе рассмотрения принцип Гамильтона раскрывает свое истинное простое значение [1, с. 92]. В методе «интегралов по траекториям» Фейнмана каждая возможная траектория квантовой частицы описывается через ее действие, которое при росте масштаба переходит в действие классическое.

6. *Почему ПНД успешно работает в разных областях науки? Каковы границы применимости разных форм ПНД и чем они обусловлены? Связь между формами ПНД опирается на взаимную выводимость уравнений, на общую размерность функционалов, соответствующих действию и на несколько видов аналогий. В разное время это были оптико-механическая, математическая, геометрическая, и, наконец, вероятностная аналогии. У каждой аналогии есть свои основания. Гамильтон являлся последователем философа Дж. Беркли и пытался вывести физические законы из принципов простоты и гармонии. В своем принципе он обобщил оптический принцип Ферма и механический ПНД, а поскольку новый принцип согласовывался как с волновыми (Х. Гюйгенс), так и с корпускулярными (И. Ньютон) представлениями о природе света, Гамильтон сделал вывод, что ни та, ни другая теория не дает истинного представления о сущности света [1, с. 36]. Связанный с ПНД принцип Якоби стал не только механическим аналогом принципа Ферма, но и обобщил закон инерции Галилея и Ньютона на n-мерное искривленное пространство [9, с. 167]. Одна из возможных причин распространенности ПНД в том, что он описывает переход энергии из одного вида в другой, другая в том, что лагранжиан не зависит от преобразований пространства-времени.*

7. *Можно ли привести формы ПНД из разных областей естествознания к универсальной форме? Можно свести их к чисто философским принципам [1] или использовать другие научные принципы. Например, вероятностная интерпретация ПНД основана на квантовых «интегралах по траекториям» [20].*

Место принципа наименьшего действия в общей системе законов.

8. *Каково положение ПНД в системе законов природы? Из каких законов он следует, какие следуют из него?* М. Планк считал экстремальный ПНД «высшим физическим законом», венцом всей системы законов [14, с. 85]. Д. Гильберт принял ПНД как ключевое понятие в свою аксиоматизацию физических теорий [25]. По мнению Фейнмана, фундаментальные физические законы могут быть выражены в виде ПНД [21, с. 108]. Л. С. Полак считал, что принцип Гамильтона выражает некоторое свойство неорганической природы, общее ряду форм движения [3, с. 864]. В. А. Ассеев указывает на то, что экстремальные принципы почти невозможно вывести из более общих принципов и законов, так как в общей формулировке они сами являются предельно общими [1, с. 195].

9. *Какова связь ПНД с принципами симметрии и законами сохранения?* Л. С. Полак писал, что формула закона сохранения энергии может быть выведена из принципа Гамильтона, обратное же без дополнительных предположений невозможно, поэтому в принципе Гамильтона заключена более общая формулировка реальных соотношений, чем в законе сохранения энергии [3, с. 878]. Глубже и полнее всего физический смысл принципа Гамильтона выражает теорема Э. Нетер, связывающая свойства симметрии и сохранения с действием [3, с. 863]. Фейнман считал, что связь между законами симметрии и законами сохранения объясняется законами квантовой механики, выраженными через ПНД [22, с. 93]. Существует аналогия принципа Гамильтона с законом, говорящим, что всякая система стремится к состоянию с минимумом потенциальной энергии. Например, принцип минимума полной энергии поля говорит, что «правильное поле и есть то единственное, которое из всех полей, получаемых как градиент потенциала, отличается наименьшей полной энергией» [21, с. 115]. Интересно, что это же поле отличается минимальной величиной действия. Вариационный принцип минимума потенциальной энергии лежит в основе исследования задач устойчивого равновесия, и применим, кроме прочего, ко второму началу термодинамики [3, с. 868].

10. *Как понятие «действие» связано с категориями «информация», «вероятность» и «энтропия»?* То, что такая связь существует видно из принципов минимума различающейся информации С. Кульбака и принципа максимума информационной энтропии Э. Джейнса, которые, в свою очередь, связаны с экстремальными принципами термодинамики [5].

11. *Как ПНД связан с принципами простоты и экономии природы, с экономией мышления и оптимизацией?* Э. Мах постулировал принцип экономии мышления, который в частности требует из всех возможных описаний предпочесть наиболее экономное, простое и практичное [12]. М. Борн отмечал, что если даже и принять идею, согласно которой природа

настолько экономна в своих запасах действия, то мы не можем перестать удивляться, почему именно эта непонятная величина оказывается наиболее пригодной для этой цели. Следовательно, истинное значение принципа Гамильтона находится в другой плоскости – «не природа следует экономии, а естествознание» [2, с. 129]. Согласно другой гипотезе, простота природы – частный случай экстремальных принципов [1, с. 218].

12. *Как ПНД связан с законами эволюции живых систем?* К. Гаусс физический смысл своего принципа наименьшего принуждения видел в том, что физическая система движется так, чтобы максимально сохранить свободу всех своих точек от влияния (принуждения) связей системы. На основе объединения экстремальных принципов физики с теорией информации сформулирован принцип максимума биологической информации, согласно которому организм стремится к состоянию динамического информационного равновесия, в котором скорость обмена информации со средой будет минимальна [5].

13. *Каков философский и научный статус ПНД?* Что это – искусственная логическая и языковая конструкция, частный феноменологический принцип или универсальный онтологический принцип существования всех объектов во Вселенной? Гипотезы о статусе ПНД можно объединить в три группы.

Ж. Д'Аламбер, Ж. Лагранж, К. Якоби, М. Борн, А. Эйнштейн, И. Пригожин были уверены, что ПНД – лишь инструмент научного познания, для которого не существует онтологических оснований. Большинство современных физиков считает, что ПНД – это способ записывать физические законы в математической форме удобной для расчетов. Другие смотрят на ПНД, как на методологический и эвристический принцип, искусственную модель, основанную на свойстве мышления максимально экономно описывать наблюдаемые явления.

Согласно второй точке зрения, ПНД – это феноменологический принцип, не имеющий всеобщего характера. Видимое единство форм ПНД вызвано или общей природой механического движения (У. Гамильтон, К. Гаусс), или геометрией искривленного пространства и движением по геодезическим линиям (Г. Герц, Г. Лоренц, Д. Гильберт, А. Пуанкаре), или аналогией классического и квантового действия в методе «интегралов по траекториям» (П. Дирак, Р. Фейнман, Г. Я. Мякишев, В. А. Ассеев, Э. Тейлор, Дж. Огборн).

Третья группа гипотез рассматривает ПНД как следствие универсального метафизического принципа природы. Для одних это принцип мировой божественной экономии усилий, пространства и времени (Г. Лейбниц, П. Мопертюи, Л. Эйлер), для других – принцип экономии природы (Г. Гельмгольц, А. Эддингтон, М. Планк). Экстремальные принципы выводили из диалектических принципов взаимодействия и взаимопревращения

противоположностей [1, с. 210], из философского принципа взаимосвязи категорий наименьшего и наибольшего, из принципов причинности, симметрии и сохранения [18, с. 135].

Причинность и реальность в принципе наименьшего действия.

14. Все экстремальные принципы, так или иначе, связаны с понятием цели. Проблема заключается в том, *каким образом в ПНД, не нарушая научной строгости, совместить причинное (через действующие причины) и целевое (через конечные причины) объяснение? Какое из них первично, а какое вторично?* После П. Мопертюи практически все физики и философы отрицали какое-либо телеологическое содержание ПНД. Наоборот, целесообразность природы пытались вывести из экстремальных закономерностей, выражающих направленность природных процессов [18, с. 135; 1, с. 218-228]. Однако М. Планк осторожно высказался, что ПНД создает впечатление того, что природа управляется разумной, осознавшей цель волей [24, с. 23]. С другой стороны, в неравновесной термодинамике уже общепринято, что экстремумы термодинамических потенциалов (в том числе максимум энтропии) задают конечные «состояния-аттракторы, к которым самопроизвольно стремится система» [17, с. 118].

15. *Почему ПНД одинаково эффективен для описания детерминистических процессов механики, статистических процессов термодинамики и вероятностных процессов квантовой механики?* По словам Э. Маха, ПНД говорит лишь, что в соответствующих случаях происходит только то, что при данных условиях может происходить, что им определено и притом однозначно [12, с. 324]. Критикуя гипотезу о всеобщности экстремальных принципов, И. Пригожин писал, что природа не может быть всемогущим калькулятором, и в ней нет упорядоченной истории [17, с. 185]. Одновременно Пригожин абсолютизировал экстремальный принцип синергетики, согласно которому в диссипативных системах поиск максимальной устойчивости играет роль естественного отбора [16, с. 89]. Говоря о роли действия в квантовом методе «интегралов по траекториям», Г. Я. Мякишев сделал вывод о том, что фундаментальный динамический принцип – принцип наименьшего действия – имеет статистическую природу [13, с. 159].

16. *Каков физический и философский смысл понятия «возможные» применительно к состояниям, траекториям и перемещениям, используемых в формулировках ПНД и в вариационном исчислении в целом? Насколько можно говорить об их реальности?* Принято считать, что приставки «возможные» или «виртуальные» в вариационных принципах имеют условный характер и не содержат физического смысла. Хотя де Бройль утверждал, что

любое тело можно одновременно рассматривать как фазовую волну, а динамически возможные траектории движущегося тела совпадают с возможными лучами фазовой волны [3, с. 861]. Фейнман предположил, что квантовая частица одновременно движется по всем возможным траекториям, чьи амплитуды вероятности складываются так, что максимальная вероятность падает на узкий пучок траекторий вокруг действительного пути, для которого вариация действия равна нулю [21]. Этот подход Фейнман распространял и на обычные объекты. Таким образом, каждый раз, когда мы идем через комнату, наше тело заблаговременно «обнюхивает» все возможные пути, даже те, что ведут к далеким квазарам, а затем все их складывает [8]. Подобный подход может объяснить механизм перехода вероятностной причинности квантовой механики в однозначную причинность классических объектов [19].

Заключение.

В статье сформулированы некоторые проблемы, связанные с одним из ключевых принципов науки – принципом наименьшего действия (ПНД). Чтобы приблизиться к их решению целесообразно, как минимум, выполнить следующие действия:

1. подробно исследовать место ПНД и других экстремальных принципов в развитии основных разделов физики, теории информации и биологии;
2. обобщить сходство и отличия формы и содержания ПНД, из разных областей науки;
3. проанализировать и сравнить научные и философские гипотезы о месте ПНД и других экстремальных принципов в системе законов природы.

Выяснить философское и физическое содержание такого универсального принципа, как ПНД, невозможно в рамках какой-то одной области науки. Не обойтись и без философских обобщений, которые, как это иногда случается в науке, могут потребовать пересмотра общепринятых научных парадигм. Конечной целью подобной работы может быть поиск универсального экстремального принципа, из которого все частные экстремальные принципы, в том числе ПНД, можно будет вывести как частные случаи для определенных граничных условий. Поскольку все дифференциальные законы движения эквивалентны какому-то экстремальному принципу, найденный универсальный экстремальный принцип теоретически мог бы описать универсальную форму движения, объединяющую все частные формы движения любых типов систем.

Список использованной литературы.

1. **Ассеев В. А.** Экстремальные принципы в естествознании и их философское содержание. Л.: ЛГУ, 1977. 232 с.
2. **Борн М.** Физика и метафизика // Физика в жизни моего поколения. Сб. М., 1963. 265 с.
3. **Вариационные принципы механики** / ред. Л. С. Полак. М.: Физматгиз, 1959.
4. **Вязгин В. П.** Непостижимая эффективность аналитической механики в физике // Философия физики: Актуальные проблемы. Материалы научной конференции 17-18 июня 2010 года. М.: ЛЕНАНД, 2010. 400 с.
5. **Голицын Г. А., Левич А. П.** Вариационные принципы в научном знании // Философские науки. 2004. №1, С. 105–136.
6. **Де Бройль Л.** Революция в физике. М.: Атомиздат, 1965. 234 с.
7. **Дьярмати И.** Неравновесная термодинамика. Теория поля и вариационные принципы, пер. с англ., М.: Мир, 1974. 304 с.
8. **Каку М.** Параллельные миры. Об устройстве мироздания, высших измерениях и будущем Космоса. М.: София, 2008. 416 с.
9. **Ланцош К.** Вариационные принципы механики. М.: Физматгиз, 1965. 408 с.
10. **Лейбниц Г.** Начала природы и благодати, основанные на разуме // Соч.: в 4-х т. М.: Мысль, 1982. Т. 1. 636 с.
11. **Липкин А. И.** Место понятий и принципов «парящих над» отдельными разделами физики // Актуальные вопросы современного естествознания. 2010. Вып. 8. С. 51-58.
12. **Мах Э.** Механика. СПб, 1909. 405 с.
13. **Мякишев Г. Я.** Динамические и статистические закономерности в физике. М.: Наука, 1973. 272 с.
14. **Планк М.** Единство физической картины мира. М.: Наука, 1966. 285 с.
15. **Полак Л. С.** Гамильтон и принцип стационарности действия. М.–Л., 1936. 272 с.
16. **Пригожин И., Николис Г.** Познание сложного. Введение. М., 1990. 344 с.
17. **Пригожин И., Стенгерс И.** Порядок из хаоса. Новый диалог человека с природой. М.: Едиториал УРСС, 2003. 240 с.
18. **Разумовский О. С.** Современный детерминизм и экстремальные принципы в физике. М.: Наука, 1975. 248 с.
19. **Терехович В. Э.** Интерференция возможностей или как «интегралы по траекториям» объясняют вероятностную причинность // Философия науки. Новосибирск: СО РАН. 52 №2. 2012. С. 108-120.
20. **Терехович В. Э.** Обобщение экстремальных принципов физики // Альманах современной науки и образования. Тамбов: Грамота, 2012. № 11(66).
21. **Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М.** Фейнмановские лекции по физике. Вып. 6: Электродинамика. М.: Едиториал УРСС, 2004. 352 с.
22. **Фейнман Р.** Характер физических законов. М.: Наука, 1987. 160 с.
23. **Эддингтон А.** Пространство, время и тяготение. М.: Едиториал УРСС, 2003. 216 с.
24. **Plank P.** Religion und Naturwissenschaft. Leipzig, 1952.
25. **Stöltzner M.** The principle of least action as the logical empiricist's Shibboleth // Studies In History and Philosophy of Science. Part B. 2003. 34 (2), P. 285-318.