УДК 115+519.87

ОНТОЛОГИЯ ОПЕРАТОРА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В ТЕОРИИ АСИММЕТРИИ ВНУТРЕННЕГО ВРЕМЕНИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

В. А. Острейковский[1], Е. Н. Шевченко[2]
Сургутский государственный университет,
[1]ova@surgu.ru, [2]elenan_27@mail.ru

Классические методы анализа и оценки показателей долговечности сложных высокоответственных и критически важных систем, таких как ядерные энергетические установки атомных станций и ледоколов, магистральных нефте- и газопроводов, космических станций, систем защиты Земли от опасных космических объектов, не позволяют корректно прогнозировать значения показателей долговечности и безопасности. Поэтому необходимы дальнейшие исследования новых теоретических методов в этой области. Чрезвычайно актуальными остаются вопросы по проблеме «время» вообще и «внутреннее время» в частности. В статье анализируется сущность оператора преобразования в теории асимметрии внутреннего времени. Существующие методы оценки асимметрии времени потребовали разработки и применения в первую очередь операторов микроскопической энтропии и внутреннего времени, которые к настоящему времени исследованы достаточно глубоко. Оператору же преобразования уделялось меньше внимания, хотя его важность очень велика. Поэтому целью данной работы является обобщение достижений в оценке сущности оператора преобразования для круга задач в проблеме асимметрии внутреннего времени в модусах «прошлое – настоящее – будущее». Для достижения поставленной цели используются ставшие уже классическими детерминированные и вероятностно-статистические подходы теории операторов функционального анализа, которые широко применяются в отечественной и зарубежной литературе [1–13]. Расширены рамки существующих подходов к оценке роли оператора преобразования в теории операторов функционального анализа с учетом различной асимметрии времени в модусах «прошлое – настоящее – будущее».

Ключевые слова: внутреннее время, асимметрия времени, оператор преобразования.

ONTOLOGY OF TRANSFORMATION OPERATOR IN THEORY OF INTERNAL TIME ASYMMETRY OF COMPLEX SYSTEMS

V. A. Ostreikovsky, E. N. Shevchenko
Surgut State University,
ova@surgu.ru, elenan_27@mail.ru

Classical methods for analyzing and evaluating the longevity indicators of mission-critical systems such as nuclear power units of nuclear power plants and icebreakers, main oil and gas pipelines, space stations, Earth protection systems from dangerous space objects, do not allow correctly predicting the values of longevity and safety indicators. Therefore, further studies of new theoretical methods in this area are needed. Consequently, the problem of “Time” in general and “Internal time” in particular remains extremely relevant. This article analyzes the essence of the transformation operator in the theory of asymmetry of internal time. Existing methods for assessing the asymmetry of time primarily required the development and application of operators of microscopic entropy and internal time, which have been studied deeply enough so far. The transformation operator received less attention, although its importance is very great. Hence, the purpose of this article is to generalize the achievements in evaluating the essence of the transformation operator for a problems variety of asymmetry of internal time in the past-present-future modes. To achieve this goal, the article uses the deterministic and probabilistic-statistical approaches of the theory of functional analysis operators that are already widely described in Russion and foreign literature [1–13]. The scope of existing approaches to assessing the role of the transformation operator in the theory of functional analysis operators has been expanded taking into account various asymmetries of time in the past-present-future modes.

Keywords: internal time, time asymmetry, transformation operator.

Введение. Нарушение симметрии времени является внутренним состоянием объекта и должно быть универсальным во всех динамических теориях, будь то классическая механика, квантовая механика или теория относительности.

Прошло уже более 30 лет после первых публикаций И. Р. Пригожина, в которых было обращено внимание на то, что оператор преобразования Λ состоит из двух полугрупп операторов, отображающих эволюцию во времени энтропии W_t и W_t'. Первая полугруппа W_t отображает возрастание энтропии при $t \geq 0$, а вторая W_t' – в противоположном направлении при $t \leq 0$. И в соответствии с этим операторы преобразования Λ и Λ' существенно отличаются друг от друга, определены на разных множествах времени и, как следствие, порождают совершенно разные физически реализуемые состояния объекта.

В результате второе начало термодинамики является принципом отбора, и эволюция состояний исследуемых объектов зависит от соответствующей полугруппы W_t и W_t': в одном и том же фазовом пространстве всех состояний объекта образуются два различных многообразия, одно из которых сжимающееся при $t \geq 0$, а другое – растягивающееся при $t \leq 0$.

Естественно, что если такие многообразия существуют, то объекты в растягивающихся и сжимающихся многообразиях обладают внутренней асимметрией во времени.

Причины нарушения симметрии времени в модусах «прошлое – настоящее – будущее». Классическая динамика со времен Ньютона описывает происходящие изменения как детерминированные эволюционирующим начальным состоянием объекта. Достижения квантовой механики и теории относительности не затронули этой установки классической физики. Даже в реляционной динамике нет ничего, что позволяло бы отличить прошлое от будущего.

Только с появлением второго начала термодинамики Клаузиуса и введением в 20-е годы XIX века новой физической величины – энтропии – появилась возможность наделить этот эволюционирующий показатель «стрелой времени» и установить различие между прошлым и будущим. Поэтому именно термодинамика, в отличие от динамики Ньютона, выдвинула новую концепцию времени как внутреннюю переменную, которой обладает любой объект природы. Именно такая интерпретация времени как внутреннего состояния любой системы или объекта делает возможным отличать прошлое от будущего. Таким образом закон возрастания энтропии во времени стал фундаментальным фактом в физике и динамике.

Для принятия закона возрастания энтропии в качестве фундаментального постулата динамики необходимы два условия:

1) введение новых понятий: внутреннее время T и микроскопический оператор M;

2) существование подходящего механизма, который бы нарушал инвариантность обычного динамического описания относительно обращения времени.

Относительно второго условия необходимо подчеркнуть следующее. Так как далеко не все способы нарушения инвариантности относительно обращения времени соответствуют второму началу термодинамики (например, распад K-мезонов), нарушение симметрии должно быть внутренним, то есть не связанным с существованием новых взаимодействий. Но оно должно обязательно быть универсальным: возможным во всех динамических теориях – классической механики и теории относительности.

Следовательно, такие общая и внутренняя разновидности нарушения симметрии должны соответствовать не всем возможным причинам физической реализуемости состояний или начальных условий, допустимых при динамическом описании, а лишь организованному набору состояний, обладающих асимметрией требуемого типа.

Таким образом, должны рассматриваться только нарушения симметрии времени, которые происходят вследствие асимметричной природы физически допустимых состояний.

Прежде чем перейти к формулировке оператора преобразования необходимо кратко остановиться на основных понятиях классической динамики, которые необходимы для наведения моста между динамикой и термодинамикой [4, с. 192–199].

Основные соотношения классической динамики и необратимости. Как известно, существуют два описания эволюции динамических систем [4, с. 188–217]. *Первое описание:* прослеживание динамических точек по траекториям в фазовом пространстве Г, показанное на рис. 1.

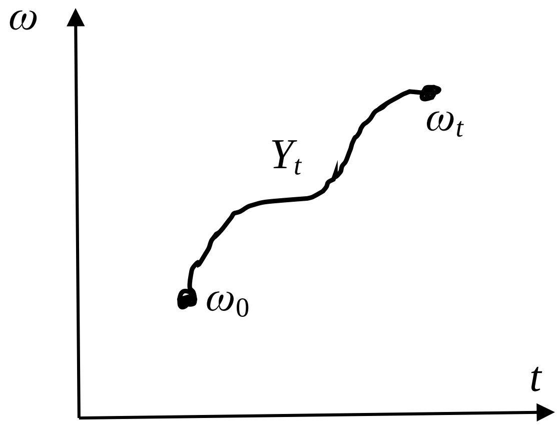

Рис. 1. Фазовая траектория для $\omega_0 \to \omega_t$ в фазовом пространстве Г под действием динамической группы U_t

Второе описание (Гиббса – Эйнштейна) вводит в фазовом пространстве функции распределения состояния системы ρ. При этом поток в фазовом пространстве сохраняет объем (или меру).

Эволюцию функции распределения ρ во времени описывает унитарный оператор U_t

$$U_t = e^{-iLt}, \tag{1}$$

где L – оператор Лиувилля $i\frac{\partial \rho}{\partial t} = L\rho$ и

$$\rho_t(\omega) = U_t \rho(\omega). \tag{2}$$

Унитарность оператора U_t определяется так же, как и в квантовой механике, где физическим величинам соответствуют операторы. Основополагающее значение имеют самосопряженные (эрмитовы) операторы

$$A = A^+, \tag{3}$$

важность которых обусловлена тем, что эти операторы имеют вещественные собственные значения и порождают ортонормированный набор собственных функций, удовлетворяющих условию

$$\Psi = \sum c_n u_n . \tag{4}$$

При этом функции u_n или Ψ – элементы, или векторы гильбертова пространства. Функция Ψ, задающая квантовое состояние, является амплитудой вероятности [1]. Если операторы удовлетворяют соотношению

$$A^{+}A = 1, \tag{5}$$

они носят название «унитарных».

Следует отметить, что существует различие между оператором U_t в классической механике и подходом Гиббса – Эйнштейна: в классической механике операторы U_t действуют на функции $Y(t)$ в фазовом пространстве и сводятся к точечным преобразованиям, поэтому лишь «кажутся» операторами. Тогда соотношение (1) можно записать в виде

$$\rho(t) = (U_t)\rho(\omega) = \rho(Y_{-t}\omega). \tag{6}$$

В нашем же случае унитарный оператор порождает динамическую группу

$$U_t U_s = U_{t+s} \tag{7}$$

при любых вещественных значениях времени t и s.

Далее вспомним предложенный Больцманом подход, включающий учет фактора необратимости [4, с.104]. Для этого динамике необходимо добавить вероятностное описание, основой которого могут служить вероятности перехода марковского процесса $P(t, \omega, \Delta)$, характеризующие вероятности перехода из точки ω_0 в область Δ [6].

Так как рассматривается поведение системы в фазовом пространстве, в крайнем вырожденном случае вероятность системы может быть равна

$$P(t,\omega,\Delta) = \begin{cases} 1, \omega_t \in \Delta, \\ 0, \omega_t \notin \Delta. \end{cases} \tag{8}$$

Соотношение (8) характеризует детерминированное описание состояний объекта. В случае же вероятностного подхода (например, цепи Маркова) значения вероятностей перехода системы не равны ни 1, ни 0, а заключены между ними, поэтому описание объекта становится нелокальным, существует функция распределения вида

$$\tilde{\rho}_t(\omega) = W_t \tilde{\rho}_0(\omega) \tag{9}$$

и появляется возможность вместо соотношения (7) иметь полугруппу

$$W_t W_s = W_{t+s}, \tag{10}$$

где $t, s \geq 0$. Это означает, что если динамический процесс не позволяет отличать прошлое от будущего, то применение вероятностного подхода вместо детерминистического позволяет учитывать эволюцию состояний объекта во времени. И, самое главное, операторы полугруппы, ориентированные в прошлое при $t, s \leq 0$, удовлетворяют соотношению

$$W'_t W'_s = W'_{t+s}. \tag{11}$$

Именно этой цели и служит оператор преобразования Λ, связывающий динамическое описание с вероятностным:

$$\tilde{\rho} = \Lambda\rho. \tag{12}$$

Сущность оператора преобразования. В работах И. Р. Пригожина и его последователей [4, 13–18] раскрыты связь динамического описания с вероятностным и роли оператора Λ в этом переходе. В этих работах показано, что «преобразование Λ носит гораздо более радикальный характер, чем простая замена координат, и поэтому не представимо в виде комбинации унитарных операторов». Приняв соотношение (12), получаем диаграмму, показанную на рис. 2.

$$\begin{tikzcd}
\rho_0 \arrow[r] \arrow[d, "\Lambda"'] & \rho_t \arrow[d, "\Lambda"] \\
\widetilde{\rho}_0 \arrow[r] & \widetilde{\rho}_t
\end{tikzcd}$$

Рис. 2. Роль оператора преобразования в связи между динамическим U_t и вероятностным W_t описаниями

Так как $\widetilde{\rho}_t = W_t \widetilde{\rho}_0$, независимо от ρ_0 имеет место соотношение

$$\Lambda U_t \rho_0 = W_t \Lambda \rho_0 \tag{13}$$

и при $t \geq 0$ справедливо операторное равенство

$$\Lambda U_t = W_t \Lambda. \tag{14}$$

Далее, если для преобразования Λ существует обратное преобразование Λ^{-1}, то, имея в виду что преобразование Λ не унитарно, можно записать:

$$W_t = \Lambda U \Lambda^{-1}. \tag{15}$$

Таким образом, центральная проблема, с которой мы сталкиваемся при попытке навести мост между динамикой и вероятностями, состоит в построении преобразования Λ. Если U_t соответствует локальному описанию (точечному преобразованию), то преобразованию Λ также должен быть присущ некоторый элемент нелокальности. Решающую роль при этом играет фактор движения.

Следовательно, вместе с преобразованием Λ, порождающим полугруппу эволюции W_t с возрастанием энтропии при $t \geq 0$, существует другое преобразование Λ', порождающее другую полугруппу эволюции

$$\Lambda' U \Lambda'^{-1} = W_t', \tag{16}$$

где W_t' удовлетворяет соотношению (11) с возрастанием энтропии в противоположном направлении времени $t \leq 0$. А это свидетельствует о следующем важнейшем выводе: преобразования Λ и Λ' сильно отличаются друг от друга и определены на различных множествах. Поэтому формулировка второго начала термодинамики является «принципом отбора»: из двух преобразований Λ и Λ' образуются совершенно разные физически реализуемые состояния системы, и эволюция состояний во времени зависит от соответствующей полугруппы. Одна из них приводит к возрастанию энтропии в положительном направлении, а другая – в противоположном. Это позволяет классифицировать системы с совершенно различными свойствами: на внутренне случайные и внутренне необратимые. Для внутренне случайных систем вероятность обретает внутренний смысл. А для другого класса внутренне необратимых систем кроме существования оператора преобразования Λ выполняется еще и принцип отбора.

Следующим важным результатом исследования онтологии оператора преобразования является утверждение, что вышеприведенная формулировка второго начала термодинамики возможна лишь в двух случаях: система сильно неустойчива или имеет высокую чувствительность к начальным условиям. Это становится возможным, если система подвержена фактору «перемешивания» (необходимое условие) и описывается вероятностными методами (в частности, в виде К-потока) как достаточным свойством. Только в этих случаях динамические системы могут иметь в каждой точке фазового пространства два многообразия: одно сжимается под действием динамики движения при возрастающем времени, а другое растягивается.

Заключение:

1. Современный подход к проблеме асимметрии времени в философском и инструментальном научном мышлении основывается на законе возрастания энтропии и вытекающей из его существования «стреле времени». Второе начало термодинамики постулируется как фундаментальный физический факт.

2. Для принятия второго начала в качестве фундаментального постулата динамики вводятся новые понятия: внутреннее время T, микроскопический оператор энтропии M и механизм, который бы нарушал инвариантность обычного динамического описания относительно обращения времени в модусах «прошлое – настоящее – будущее».

3. Нарушение симметрии времени является внутренним состоянием объекта и должно быть универсальным во всех динамических теориях, будь то классическая механика, квантовая механика или теория относительности.

4. Установлено, что преобразование Λ порождает две полугруппы эволюции во времени: 1) полугруппу эволюции W_t с возрастанием энтропии при $t \geq 0$ и 2) полугруппу W'_t с возрастанием энтропии при $t \leq 0$ в противоположном направлении времени. Это означает, что эти преобразования Λ и Λ' существенно различны и определены на разных множествах времени, то есть порождают разные физически реализуемые состояния объекта. В этом смысле второе начало термодинамики можно сформулировать как принцип отбора, а эволюция состояний объекта определяется соответствующей полугруппой W_t и W'_t.

5. В силу вывода № 4 все системы классифицируются: 1) «внутренне случайные», в которых вероятность обретает внутренний смысл, и 2) «внутренне необратимые», в которых существует оператор Λ и, кроме того, выполняется *принцип отбора*.

6. Существование нарушающего преобразования Λ с указанными в выводе № 5 свойствами возможно при выполнении двух условий: 1) динамическое движение сильно неустойчиво; 2) динамическое движение обладает высокой чувствительностью по отношению к начальным условиям.

7. Динамические системы, в которых преобладает элемент случайности, имеют важное свойство: в каждой точке фазового пространства существуют два многообразия (меньшей размерности, чем все фазовое пространство): одно сжимается под действием динамического движения при возрастающих значениях t, другое – растягивается.

8. Внутренняя асимметрия присуща объектам во времени при условии существования сжимающихся и растягивающихся многообразий. В этом случае для таких объектов удается построить нарушающее симметрию преобразование Λ, и тогда роли, отводимые растягивающимся и сжимающимся многообразиям, неэквивалентны.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ №№ 17-01-00244, 18-07-00391.

Литература

1. Born M., Green H. S. A general Kinetic Theory of Liquids. Cambridge : University Press, 1949.

2. Боголюбов Н. Н. Проблемы динамической теории в статистической физике. М. : Гостехиздат, 1946. 117 с.

3. Хокинг С. От большого взрыва до черных дыр. Краткая история времени. М. : Мир, 1990. 168 с.

4. Пригожин И. От существующего к возникающему: время и сложность в физических науках : пер. с англ. ; под ред. Ю. Л. Климонтовича ; изд. 2-е, доп. М. : Едиториал УРСС, 2002. 288 с.

5. Больцман Л. Избранные труды. М. : Наука, 1984. 590 с.

6. Марков А. А. Известия физико-математического общества Казанского университета. 1906. № 4, Т. 15. С. 135–156.

7. Марков А. А. Избранные труды. М. : Л., 1948. 410 с.

8. Колмогоров А. Н. О сохранении условнопериодических движений при малом изменении функции Гамильтона // Доклады АН СССР. 1954. Т. 98, № 4. С. 527–530.

9. Арнольд В. И. Особенности, бифуркации и катастрофы. УФН, 1983. Т. 141. С. 569–590.

10. Лихтенберг А., Либерман М. Регулярная и стохастическая динамика. М. : Мир, 1984. 536 с.

11. Бергсон А. Творческая эволюция ; пер. с фр. М. : КАНОН-Пресс, 1998. 382 с.

12. Климонтович Ю. Л. Статистическая физика. М. : Наука, 1982. 608 с.

13. Леонтович М. А. Основные уравнения кинетической теории сточки зрения случайных процессов. ЖЭТФ, 1935. Т. 5. 211 с.

14. Острейковский В. А., Денисова Т. Ю., Шевченко Е. Н. Асимметрия времени в теории прогнозирования состояния сложных динамических систем : моногр. Сургут : Печатный мир, 2018. 574 с.

15. Острейковский В. А. Феномен асимметрии времени в теории неустойчивых и необратимых процессов сложных динамических систем: моногр. Сургут : Печатный мир, 2017. 268 с. Сер. «25 лет СурГУ».

16. Острейковский В. А., Шевченко Е. Н. Математическое моделирование эффекта асимметрии внутреннего времени в теории долговечности структурно и функционально сложных критически важных систем // Итоги науки. Вып. 37. Избран. тр. Междунар. симпозиума по фундамент. и приклад. проблемам науки. М. : РАН, 2018. С. 69–111.

17. Острейковский В. А., Шевченко Е. Н. Феномен «время» в теории прогнозирования техногенного риска сложных динамических систем // Надежность и качество сложных систем. 2016. № 4. С. 3–12.

18. Острейковский В. А., Денисова Т. Ю., Шевченко Е. Н. Феномен асимметрии внутреннего времени при прогнозировании состояния сложных динамических систем // Вестник кибернетики. 2017. № 4 (28). С. 181–188.