



НАНОСТРУКТУРЫ

математическая физика и моделирование



НАНОСТРУКТУРЫ

математическая физика и моделирование

Nanostructures.
Mathematical Physics & Modelling

2018, volume 18(2)

Наноструктуры. Математическая физика и моделирование

Редколлегия:

В.А. Аветисов, И.В. Волович, В.В. Гусаров, П.Н. Дьячков, Р.Г. Ефремов, М.В. Карасев (зам. главного редактора), Ю.Е. Лозовик, М.А. Мазо, В.П. Маслов (главный редактор), А.В. Махиборода (ответственный секретарь), А.Ю. Морозов, С.А. Никитов, Г.Э. Норман, Р.А. Сурис, В.А. Тулин, В.Е. Фортгов, А.С. Холево, А.Р. Хохлов, А.В. Чаплик, Л.А. Чернозатонский, К.В. Шайтан

Электронная версия журнала размещается на сайте
<http://nano-journal.ru>

Адрес редакции:

123458, Москва, ул. Таллинская, д. 34, каб. 429
+7 (495) 916-88-76
nanostructures@hse.ru

Москва

© 2018, Европейский центр по качеству

Содержание

В.А. Морозов Математическое моделирование динамики заселенности состояний двухуровневой наночастицы при бихроматическом облучении	5
Проблемы моделирования нейронных сетей	
Е.Д.Сорокоумов, А. Л.Проскура, Т. А.Запара, А. С.Ратушняк Физические основы функционирования эволюционные истоки биологических информационных систем	23
Актуальные публикации прошлых лет	
Э. Мах Популярные лекции по физике. О волокнах Корти в ухе. Принцип сохранения энергии	45
Информация и правила для авторов	81

Contents

V.A. Morozov

Mathematical modeling of the population dynamics of the states of a composite system of a two-level nanoparticle and quantum bichromatic electromagnetic field5

Problems of neural network modeling

E. D. Sorokoumov, A. L. Proskura, T. A. Zapara, A. S. Ratushnyak

Physical basis of functioning and evolutionary origins of biological information systems23

Actual matter published in the last years

E. Mach

Popular Lectures on Physics.45

The information and rules for authors81

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЗАСЕЛЕННОСТИ СОСТОЯНИЙ ДВУХУРОВНЕВОЙ НАНОЧАСТИЦЫ ПРИ БИХРОМАТИЧЕСКОМ ОБЛУЧЕНИИ

В.А. Морозов

*Институт органической химии им. Н.Д. Зелинского
Российской академии наук, Москва
E-mail: morozov@mail.ioc.ac.ru*

Поступила 10.12.2018

Получены выражения, в аналитическом виде описывающие динамику заселенности состояний составной системы из двухуровневой частицы и квантованного бихроматического электромагнитного поля, обратимо обменивающегося энергией с этой частицей, для случая, когда средняя частота монохроматических компонент поля совпадает с частотой собственного перехода частицы, а амплитуды колебаний электрического поля этих компонент одинаковы при произвольной разности их начальных фаз. Полученные выражения существенно отличаются от известных из литературы выражений для зависимости от времени заселенности соответствующих состояний частицы, которые различными способами получены разными авторами на основе использования классической теории при описании бихроматического поля, действующего на частицу как на замкнутую квантовую систему. Отмечаются также значительные отличия характера установленной динамики заселенности состояния системы, соответствующего возбужденному состоянию частицы, от характера динамики заселенности возбужденного состояния частицы, которая определена численными решениями соответствующих оптических уравнений Блоха. Приведены рисунки, иллюстрирующие эти отличия на примерах ряда конкретных случаев бихроматического облучения с разной интенсивностью и разной относительной начальной фазы его монохроматических компонент.

УДК 535.14

DOI: 10.31145/2224-8412-2018-18-2-05-21

Введение

Результаты теоретического и экспериментального изучения возбуждения вещества светом, содержащим когерентную совокупность двух монохроматических волн с разными частотами, отражены во многих работах, ссылки на которые приведены, например, в обзорах [1, 2] и монографиях [3, 4]. В этих работах отмечаются различные особенности спектральных характеристик вторичного излучения отдельной частицы при ее бихроматическом облучении,

отличающие их от известных соответствующих характеристик при облучении частицы монохроматическим светом, и такие новые эффекты, как когерентное пленение населенностей состояний вещества и когерентный фотогальванический эффект. Изменение характера динамики возбуждения частицы в зависимости от разницы начальных фаз монохроматических компонент облучения в ряде работ предложено рассматривать как одну из возможностей выбора того или иного возможного варианта фотопревращения вещества. Список из 46 наименований работ по теоретическому изучению и практическому применению такого «метода управления фотореакциями» приведен в [4].

Заметим, что в приведенных в [1–4] работах зависимость от времени заселенности возбуждаемого состояния двухуровневой частицы бихроматическим полем («динамики возбуждения») описывалась при применении классической теории электромагнитного поля, хотя использовалась терминология квантовой теории поля излучения: однофотонное, двухфотонное и т. д. поглощение облучения. Среди таких работ отметим работы [5–7], в которых приводятся выражения для динамики заселенности состояний частицы, полученные на основе решения уравнения Шредингера для амплитуд заселенности состояний частицы как замкнутой квантовой системы в том или ином приближении с принятием ряда упрощающих расчеты допущений, и работу [8], в которой выражение для динамики заселенности возбужденного состояния частицы получено решением (при использовании теоремы Флоке) системы оптических уравнений Блоха («ОУБ»).

Более последовательное и полное представление о возбуждении частицы бихроматическим электромагнитным полем может быть составлено на основе использования теории, рассматривающей частицу как открытую квантовую систему в составной (общей) системе из частицы и обменивающегося с ней энергией квантованного поля излучения (см., например, в [9] и приведенную в этом обзоре литературу). Представляет интерес сопоставить результаты моделирования динамики заселенности состояний такой составной системы с результатами моделирования динамики заселенности состояний частицы на основе формализма полуклассической теории, которые получены в [5–8] и использованы при описании данных экспериментального изучения динамики возбуждения атомов Ва в работе [10] и атомов Yb в работе [11].

Отметим, что в работах [12,13] проведено сравнение аналитических выражений для зависимости от времени заселенности состояний составной системы из двухуровневой частицы и монохроматического поля облучения с выражениями для временной зависимости соответствующих состояний частицы, которые получены на основе формализма полуклассической теории. Эти выражения существенно различаются. Анализ причин и результатов такого различия позволяет, например, более обоснованно относить какую-либо рассматриваемую фотореакцию или к обычно происходящему процессу

преобразования одного из фотонов облучения, описываемому результатами моделирования такого процесса на основе формализма квантовой теории составной системы («КТСС»), или к процессу каскадного преобразования частицей фотонов многофотонного облучения, описываемому результатами моделирования такого процесса на основе формализма ОУБ (см. в [12,13]).

Анализ сравнения результатов моделирования динамики возбуждения двухуровневой частицы при *бихроматическом* облучении на основе формализма КТСС и на основе формализма полуклассической теории применительно к интерпретации соответствующих экспериментальных данных позволит составить более полное и более точное представление о механизме происхождения перечисленных выше новых эффектов возбуждения вещества светом, содержащим когерентную совокупность двух монохроматических волн, и составить более обоснованную интерпретацию известных экспериментальных данных отмеченных выше работ [10,11]. Получение такого представления можно рассматривать как вклад в развитие и совершенствование теоретических основ метода управления фотопревращениями вещества выбором начальной относительной фазы монохроматических компонент бихроматического облучения.

Заметим, что при использовании формализма КТСС получение в аналитическом виде решения уравнения Шредингера для амплитуд заселенности состояний составной системы из частицы, сфазированного бихроматического облучения и вторичного излучения, связано с решением комплексного алгебраического уравнения третьей степени, мнимые коэффициенты которого отражают учет радиационного распада возбуждаемого собственного состояния частицы при «непрерывной» регистрации состояний поля излучения за счет поглощения фотонов естественным макроскопическим окружением или специально устанавливаемыми детекторами счета фотонов (см. в [9]). Нахождение решения такого уравнения сопряжено с громоздкими вычислениями. Однако для часто рассматриваемых случаев бихроматического облучения двухуровневой частицы, когда разность частот монохроматических компонент облучения много больше радиационной ширины резонансно возбуждаемого уровня частицы, начальные общие представления о сходстве или различия результатов моделирования динамики возбуждения частицы при использовании формализма КТСС и формализма полуклассической теории, можно относительно легко получить, не принимая во внимание радиационный распад возбуждаемого состояния частицы. Это обусловлено тем, что при моделировании динамики возбуждения частицы с таким допущением об обратимом обмене энергией между бихроматическим полем и частицей, отмеченное выше комплексное уравнение третьей степени становится действительным и к тому же так упрощается, что его решения можно относительно легко получить в аналитическом виде. На основе использования

такого решения в настоящей работе получены выражения для зависимости от времени заселенности состояний рассматриваемой составной системы применительно к случаю бихроматического облучения, при котором средняя частота его монохроматических компонент совпадает с частотой собственного перехода частицы, а амплитуды колебаний электрического поля этих компонент одинаковы при произвольной разности их начальных фаз. Соответствующая модель составной системы и постановка задачи описана в следующей, второй части работы. Получение выражений, описывающих зависимость от времени заселенности состояний составной системы описано в третьей части работы. В четвертой части – описан подход к рассмотрению динамики заселенности состояний частицы на основе формализма оптических уравнений Блоха. В пятой части выражение для зависимости от времени заселенности состояния системы, при котором поле содержит на один фотон меньше поля облучения в момент включения взаимодействия с частицей, а частица находится в возбужденном состоянии, сравнивается с временной зависимостью заселенности возбужденного состояния частицы, полученной численным решением соответствующей системы ОУБ. Заканчивается работа заключительным замечанием.

Модель составной системы

Будем полагать, что место расположения частицы характеризуется центром декартовой системы координат (X, Y, Z) . Пусть, для определенности, облучение направлено по оси Z и поляризовано по оси X .

Как уже отмечено во Введении, в работах [5–8] рассматривалось возбуждение частицы бихроматическим облучением, амплитуды монохроматических компонент которого одинаковы, а их частоты $\omega_L \pm \Omega$ таковы, что $\omega_L \gg \Omega$. Вводился в рассмотрение относительный начальный фазовый сдвиг этих компонент.

Напряженность электрической составляющей поля такого облучения в месте расположения частицы запишем в виде

$$e(t) = e_0 \{ \sin[(\omega_L + \Omega)t + \varphi] - \sin[(\omega_L - \Omega)t - \varphi] \} = 2e_0 \sin(\Omega t + \varphi) \cos(\omega_L t), \quad t \geq 0,$$

так что 2φ – это разность начальных фаз монохроматических компонент поля облучения, φ начальная фаза амплитуды полной «синусоидальной» модуляции амплитуды поля облучения, Ω – частота этой модуляции.

Для среднего по «быстрому» времени $t \approx \omega_L^{-1}$ значения интенсивности (плотности потока энергии) облучения частицы имеем следующее выражение:

$$I_{кл}(t) = ce_0^2 (4\pi)^{-1} [1 - \cos(2\Omega t + 2\varphi)],$$

отражающее зависимость начальной интенсивности в момент $t = 0$ этого облучения от разницы начальных фаз его монохроматических компонент.

Схема относительного положения уровней энергии модели частицы и монохроматических компонент облучения представлена на рисунке 1.

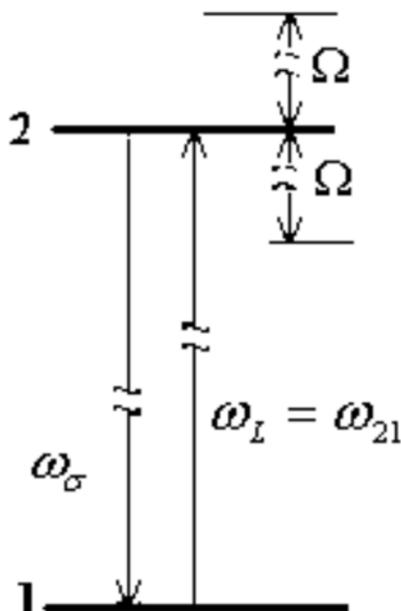


Рис. 1. Схема относительного положения уровней энергии модели частицы и монохроматических компонент облучения.

Основное собственное состояние двухуровневой модели частицы пронумеровано цифрой 1, а возбужденное собственное состояние – цифрой 2. Энергии этих состояний обозначим E_1 и E_2 ; $E_2 - E_1 \equiv \hbar\omega_{21}$. Матричный элемент оператора взаимодействия поля облучения и частицы по состояниям 1 и 2 в дипольном приближении запишем в виде: $V_{12} = -(ed_x)_{12}$, где d_x – проекция вектора дипольного момента частицы на ось X ; $(d_x)_{12} \equiv e_0^{-1}\hbar\Omega_R$, Ω_R – частота Раби; для простоты записи опущено указание на зависимость от времени функции $e(t)$ и соответственно $V(t)$.

Прежде чем привести описание состояния квантованного бихроматического поля, зависимость от времени интенсивности которого – обозначаемую как $I_{кв}(t)$ – имеет такой же вид, как приведенная функция $I_{кл}(t)$, отметим некоторые общие характеристики квантованного электромагнитного поля.

Прежде всего заметим, что электромагнитное поле, соответствующее состоянию с определенным числом фотонов («фоковское» состояние), характеризуется полностью неопределенным значением его фазы, (т.е. равновероятным между значениями 0 и 2π – см., например, в [14]), а в работе [15] приведено доказательство «отсутствия определенного значения разности фаз у фотонов в фоковских состояниях», так что интенсивность соответствующего электромагнитного поля не зависит от времени. Для описания

поля, интенсивность которого меняется со временем, можно использовать представление о суперпозиционном состоянии фотона. Например, полю, состояние которого представляет собой суперпозицию двух однофотонных состояний

$$|\phi\rangle = A_\lambda |\phi_\lambda\rangle + A_\nu |\phi_\nu\rangle, \quad |A_\lambda|^2 + |A_\nu|^2 = 1,$$

соответствует интенсивность (квантовое среднее значение плотности потока энергии в центре куба периодичности объема L^3) такого вида:

$$I_{\kappa\sigma}(t) \approx cL^{-3}\hbar\omega_L [1 + 2 \operatorname{Re} A_\lambda A_\nu^* \exp(-2i\Omega t)],$$

где $|\phi_\lambda\rangle, |\phi_\nu\rangle$ – однофотонное состояние, $\lambda(\nu)$ – набор квантовых чисел, характеризующих направление распространения и состояние поляризации фотона «сорта» $\lambda(\nu)$ при предположении, что векторы поляризации линейно поляризованных фотонов λ и ν параллельны, а их частоты таковы, что $\omega_L = \omega_\lambda - \Omega = \omega_\nu + \Omega$, $\Omega \ll \omega_L$.

В работе [16] показано, что интенсивность поля, каждый из $N > 1$ фотонов которого находится в приведенном выше суперпозиционном состоянии, равна $NI_{\kappa\sigma}(t)$. Используя это заключение, будем полагать, что в рассматриваемом нами бихроматическом поле состояние каждого из N фотонов представляет собой суперпозицию однофотонных состояний $|\phi_\lambda\rangle$ и $|\phi_\nu\rangle$ следующего вида:

$$|\phi(\varphi)\rangle = (\sqrt{2})^{-1} [\exp(i\varphi) |\phi_\lambda\rangle - \exp(-i\varphi) |\phi_\nu\rangle],$$

так что при $\omega_L = \omega_{21}$ интенсивность этого поля определяется таким выражением

$$I_{\kappa\sigma}(t) \approx cNL^{-3}\hbar\omega_{21} [1 - \cos(2\Omega t + 2\varphi)],$$

и при $NL^{-3}\hbar\omega_{21} = e_0^2(4\pi)^{-1}$ имеем $I_{\kappa\sigma}(t) = I_{\kappa\lambda}(t) \equiv I_0(t)$.

Ограничимся рассмотрением поглощения частицей, находящейся в начальный момент времени $t = 0$, одного из фотонов бихроматического поля, состояние которого определяется приведенной выше суперпозицией однофотонных состояний. Рассматриваемые состояния составной системы обозначим индексами $\lambda 1, \nu 1, 02, \sigma 1$ ($\sigma \neq \lambda, \nu$). Состояние $\lambda 1$ означает, что частица находится в состоянии 1, а поле облучения содержит N фотонов сорта λ ; состояние $\nu 1$ означает, что частица находится в состоянии 1, а поле облучения содержит N фотонов сорта ν ; состояние 02 означает, что частица находится в состоянии 2, а поле излучения содержит $N - 1$ фотонов облучения; состоя-

ние $\sigma 1$ означает, что частица находится в состоянии 1, а поле содержит $N - 1$ фотонов облучения и фотон сорта σ вторичного излучения.

Матричный элемент оператора V по состояниям $\lambda 1$ и $0 2$ записываем в виде: $V_{\lambda 1}^{0 2} = iL^{-3/2} \sqrt{2\pi N \hbar \omega_\lambda} (d_\lambda)_{12} \equiv i\hbar \bar{\Omega}_R$, где d_λ – проекция оператора дипольного момента частицы на направление поляризации фотона λ . Аналогично выглядит выражение для матричного элемента оператора V по состояниям $\nu 1$ и $0 2$. Учитывая принятое соотношение $\omega_\lambda \equiv \omega_\nu \equiv \omega_L = \omega_{21}$ и полагая, что $d_\lambda = d_\nu = d_x$, будем считать, что $V_{\lambda 1}^{0 2} = V_{\nu 1}^{0 2}$. При сопоставлении результатов моделирования динамики заселенности состояний частицы на основе формализма ОУБ с результатами моделирования динамики заселенности состояний рассматриваемой составной системы, проведенного на основе формализма КТСС, будем полагать, что $\bar{\Omega}_R = \Omega_R$.

Использование теории составной системы

Уравнение Шредингера для амплитуды вероятности $b_k(t)$ заселенности собственного состояния k составной системы в представлении взаимодействия запишем в виде

$$i\hbar \dot{b}_k(t) = \sum_j b_j(t) \cdot V_{kj} \exp(i\omega_{kj} t) + i\hbar \delta_{ki} \delta(t) b_k(0),$$

где i, j, k – индексы собственных состояний составной системы с энергией соответственно E_i, E_j, E_k ; i – одно из начальных собственных состояний $\lambda 1$ или $\nu 1$, взятого с множителем $(\sqrt{2})^{-1} \exp(i\varphi)$ или, соответственно, с множителем $-(\sqrt{2})^{-1} \exp(-i\varphi)$; $\omega_{ki} = \hbar^{-1}(E_k - E_i)$; $\delta_{ki} = 0$ при $k \neq i$ и $\delta_{ki} = 1$ при $k = i$ (символ Кронекера); t – время, отсчитываемое от значения $t = 0$; $\delta(t)$ – функция Дирака.

Фурье-представление функции $b_k(t)$ запишем в виде

$$b_k(t) = i(2\pi)^{-1} \int_{-\infty}^{+\infty} G_{ki}(E) \cdot \exp[i(E_k - E)t / \hbar] dE,$$

где E – энергетическая переменная.

Функции $G_{ki}(E)$ для рассматриваемых состояний составной системы в резонансном приближении (см. [17]) записываются (опуская для простоты записи индекс начального состояния) в виде:

$$(E - E_{\lambda 1})G_{\lambda 1}(E) = V_{\lambda 1}^{0 2} G_{0 2} + (\sqrt{2})^{-1} \exp(i\varphi),$$

$$(E - E_{\nu 1})G_{\nu 1}(E) = V_{\nu 1}^{0 2} G_{0 2} - (\sqrt{2})^{-1} \exp(-i\varphi),$$

$$(E - E_{0 2})G_{0 2}(E) = V_{0 2}^{\lambda 1} G_{\lambda 1} + V_{0 2}^{\nu 1} G_{\nu 1} + \sum_{\sigma} V_{0 2}^{\sigma 1} G_{\sigma 1},$$

$$(E - E_{\sigma 1})G_{\sigma 1}(E) = V_{\sigma 1}^{0 2} G_{0 2}.$$

При решении этой системы уравнений используем обычно вводимое обозначение: $\gamma = i\hbar^{-1} \sum_{\sigma} |V_{\sigma 1}^{02}|^2 \zeta(E - E_{\sigma 1})$, где $\zeta(E) = P/E - i\pi\delta(E)$, P/E – главное значение функции $1/E$. Реальная часть γ представляет собой радиационную ширину уровня 2 частицы, а мнимая часть («лэмбовский сдвиг» уровня энергии возбужденного состояния частицы) не учитывается (см. [17]). При этом решение, например, $G_{02}(E)$ имеет вид:

$$G_{02}(E) = \frac{\sqrt{2}\Omega_R}{\hbar} \frac{\omega \sin\varphi + i\Omega \exp(i\varphi)}{\omega(\omega - 2\Omega)(\omega - \Omega + i\gamma) - 2\Omega_R^2(\omega - \Omega)},$$

где $\omega \equiv \hbar^{-1}(E - E_{\lambda 1})$.

При вычислении соответствующей амплитуды $b_{02}(t)$, например, методом контурного интегрирования, необходимо представить знаменатель функции $G_{02}(E)$ в виде произведения $(\omega - \omega_1)(\omega - \omega_2)(\omega - \omega_3)$, где $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ – корни алгебраического уравнения третьей степени с комплексными коэффициентами. Нахождение этих корней требует проведения громоздких вычислений. Если, однако, ограничиться рассмотрением динамики возбуждения состояния 02 при облучении, которое характеризуется неравенством $\Omega \gg \gamma$, и полагать $\gamma = 0$, т.е. пренебрегать рассеянием фотона в моды свободного (нулевого) поля излучения и учитывать только обратимый процесс обмена энергией между двухмодовым полем облучения и частицей, тогда знаменатель функции $G_{02}(E)$ и функций $G_{\lambda 1}(E), G_{\nu 1}(E)$ можно представить в следующем виде:

$$F(\omega) = \hbar(\omega - \Omega)[\omega(\omega - 2\Omega) - 2\Omega_R^2] = \hbar(\omega - \Omega)(\omega - \Omega - \tilde{\Omega})(\omega - \Omega + \tilde{\Omega}),$$

где $\tilde{\Omega} \equiv \sqrt{\Omega^2 + 2\Omega_R^2}$, и в качестве решения системы уравнений для $G_{ki}(E)$ получаем следующие выражения:

$$G_{\lambda 1}(\omega) = [(\sqrt{2})^{-1} \exp(i\varphi)(\omega - \Omega)(\omega - 2\Omega) - \sqrt{2}\Omega_R^2 \cos\varphi] / F(\omega),$$

$$G_{\nu 1}(\omega) = [-(\sqrt{2})^{-1} \exp(-i\varphi)\omega(\omega - \Omega) + \sqrt{2}\Omega_R^2 \cos\varphi] / F(\omega),$$

$$G_{02}(\omega) = -i\sqrt{2}\Omega_R [i\omega \sin\varphi - \Omega \exp(i\varphi)] / F(\omega).$$

При переходе к комплексному представлению $\omega \rightarrow \omega + i\varepsilon \equiv z$ функция $F(z)$ имеет три полюса первого порядка при $z_1 = -i\varepsilon + \Omega$, $z_2 = -i\varepsilon + \Omega + \tilde{\Omega}$, $z_3 = -i\varepsilon + \Omega - \tilde{\Omega}$.

Используя полученные при таком переходе функции $G_{\lambda 1}(z), G_{02}(z), G_{\nu 1}(z)$, и применяя правила контурного интегрирования, находим с учетом перехода

$\varepsilon \rightarrow 0$ соответствующие амплитуды рассматриваемых состояний, являющиеся решением уравнения Шредингера для составной системы:

$$b_{\lambda_1}(t) = \frac{\exp(-i\Omega t)}{\sqrt{2} \tilde{\Omega}^2} \{2\Omega_R^2 \cos\varphi + [\tilde{\Omega}^2 \exp(i\varphi) - 2\Omega_R^2 \cos\varphi] \cos \tilde{\Omega} t, \\ + i\Omega \tilde{\Omega} \exp(i\varphi) \sin \tilde{\Omega} t\} = -b_{v_1}^*(t) \\ b_{0_2}(t) = -i\sqrt{2} \frac{\Omega_R}{\tilde{\Omega}^2} [\Omega \cos\varphi(1 - \cos \tilde{\Omega} t) + \tilde{\Omega} \sin\varphi \sin \tilde{\Omega} t].$$

Динамика заселенности начального состояния частицы в процессе поглощения ею фотона облучения определяется следующим выражением:

$$P_1(t) = |b_{\lambda_1}(t)|^2 + |b_{v_1}(t)|^2 = 1 - P_{0_2}(t),$$

где $P_{0_2}(t)$ – динамика состояния системы из частицы в возбужденном состоянии и поля излучения, содержащего $N - 1$ фотонов. Функция $P_{0_2}(t)$ имеет следующий вид:

$$P_{0_2}(t) = |b_{0_2}(t)|^2 = \\ = 2\Omega_R^2 \tilde{\Omega}^{-4} [\Omega^2 (1 - \cos \tilde{\Omega} t)^2 \cos^2 \varphi + \Omega \tilde{\Omega} (1 - \cos \tilde{\Omega} t) \sin 2\varphi \sin \tilde{\Omega} t + \tilde{\Omega}^2 \sin^2 \varphi \sin^2 \tilde{\Omega} t].$$

Как следует из сравнения приведенных выше функций $I_0(t)$ и $P_{0_2}(t)$, зависимость от времени заселенности возбужденного состояния частицы отличается от зависимости от времени интенсивности облучения частицы. Отличие этих зависимостей определяется тем, что частота $\tilde{\Omega}$ отличается от частоты Ω , так что в зависимости от условия облучения, характеризуемого отношением $\alpha = \Omega_R / \Omega$ и значением начальной фазы φ , частота осцилляций функции $P_{0_2}(t)$ меньше частоты осцилляций функции $I_0(t)$ при $\Omega_R < \Omega$ (в предельном случае $\Omega_R \ll \Omega$ – в два раза меньше), и больше – при $\Omega_R > \Omega$.

Полученные выражения $P_1(t)$ и $P_{0_2}(t)$ существенно отличаются от выражений, определяющих зависимости от времени заселенности состояний частицы, которые получены разными способами в работах [5–7] на основе использования полуклассической теории преобразования света частицей при принятых выше допущениях относительно параметров классически описываемого поля облучения и при пренебрежении рассеянием фотона в моды свободного поля излучения.

Оптические уравнения блоха

Систему ОУБ для элементов $\rho_{nm}(t)$ матрицы плотности частицы как замкнутой квантовой системы, возмущаемой внешним полем $e(t)$, без учета радиационного распада ее возбужденного состояния запишем в виде:

$$\dot{\rho}_{mm} = i\hbar^{-1} \sum_{l \neq m} (V_{lm} \rho_{ml} - V_{ml} \rho_{lm}),$$

$$\dot{\rho}_{nm} = i\hbar^{-1} \sum_{l=n,m} (V_{lm} \rho_{nl} - V_{nl} \rho_{lm}), \quad (n \neq m).$$

Здесь для простоты записи опущено указание на зависимость элементов $\rho_{nm} = b_n b_m^*$ от времени; n, m и l – номера собственных состояний частицы, которые принимают значения 1 или 2; оператор энергии взаимодействия частицы с полем $V = -e(t)d_x$; b_n и b_m – амплитуды вероятности заселенности состояний n и m .

Пренебрегая в приведенной системе ОУБ слагаемыми, которые содержат множители, осциллирующие с частотой $2\omega_{21} + \Omega$ и $2\omega_{21} - \Omega$ по сравнению со слагаемыми, осциллирующими с частотой Ω , имеем систему ОУБ для рассматриваемой частицы в «приближении вращающейся волны»:

$$\dot{\rho}_{11} = i\Omega_R \sin(\Omega t + \varphi) (\rho_{21} - \rho_{12}) = -\dot{\rho}_{22},$$

$$\dot{\rho}_{21} = i\Omega_R \sin(\Omega t + \varphi) (\rho_{22} - \rho_{11}) = -\dot{\rho}_{12}.$$

Такое приближение соответствует «резонансному приближению», использованному при решении уравнения Шредингера для составной системы в предыдущей части работы.

Согласно формализму ОУБ зависимость $\rho_{22}(t)$ описывает динамику возбуждения частицы как замкнутой квантовой системы, находящейся под действием поля облучения, состояние которого не изменяется. Согласно же используемым представлениям формализма КТСС (подробности см. в [9] [13]) – выражение $P_{02}(t)$ отражает информацию не только о заселенности возбужденного состояния частицы, но и информацию о состоянии поля излучения. Такая информация определяется возможностью «непрерывной», в каждый момент времени t , «мгновенной» регистрации поглощения фотона естественным макроскопическим окружением частицы или специальным детектором счета фотонов, а также возможностью регистрации «нулевого измерения неизменившегося состояния поля облучения». При этом возбуждение частицы описывается как результат редукции («коллапса») ее суперпозиционного состояния, при которой частица «скачком», в момент времени t переходит из начального состояния 1 в состояние возбуждения 2 при поглощении фотона облучения и регистрации состояния поля, соответствующего отсутствию одного из фотонов облучения. По [18] – это суперпозиционное состояние частицы следует считать реально существующим в этот момент времени и такой скачок предложено называть «скачок по Гейзенбергу». Полученное же на основе формализма ОУБ выражение $\rho_{22}(t)$ описывает вероятность найти частицу в возбужденном состоянии в момент времени t при том, что она – безотносительно к регистрации состояния поля – скачком пе-

решла в это состояние в какой-то момент времени в интервале от включения взаимодействия частицы с облучением до рассматриваемого момента t . По [18] – это «скачок по Шредингеру». Как отмечено, например, в [9,13,14], в литературе можно встретить различные мнения относительно приведенных выше представлений о квантовых скачках при спектроскопических переходах частицы. Во всяком случае, представляется справедливым утверждение, что зависимость $P_{02}(t)$ можно рассматривать, как описание динамики возбуждения частицы, дополненное информацией о динамике соответствующего состояния поля излучения. Так как формализм КТСС точнее отражает механизм взаимодействия света с частицей по сравнению с формализмом ОУБ, то следует считать, что такое «дополненное» описание динамики заселенности возбужденного состояния частицы при регистрации состояния поля излучения, соответствующего отсутствию одного из фотонов облучения, является более полным и более последовательным описанием динамики возбуждения частицы, чем то, которое дает зависимость $\rho_{22}(t)$.

Поэтому, как уже отмечено и во Введении, представляет интерес сравнить полученную зависимость $P_{02}(t)$ с зависимостью $\rho_{22}(t)$.

Как отмечено выше, в работе [8] приведены выражения $\rho_{mn}(t)$, являющиеся решением этой системы ОУБ, полученные при использовании формализма теоремы Флоке. Эти выражения, содержащие Бесселевы функции первого рода от параметра α , довольно громоздки, и для сравнения приведенной выше функции $P_{02}(t)$ с функцией $\rho_{22}(t)$, будут использованы численные решения приведенной системы ОУБ при соответствующих значениях α и φ .

Сравнение динамики возбуждения частицы с динамикой соответствующего состояния составной системы

Сравнение полученных функций $P_{02}(t)$ с соответствующими зависимостями $\rho_{22}(t)$, определенными в результате численных решений системы уравнений Блоха, отражено на приводимых ниже четырех рисунках для трех случаев облучения, характеризуемых значениями α и φ . На этих рисунках по оси абсцисс отложено «безразмерное время» t в единицах τ ($\tau = \Omega t$), а по оси ординат – значения полученных функций $P_{02}(t)$ и определенных численным решением ОУБ зависимостей от времени $\rho_{22}(t)$. Приведены также функции $I_0(t)$, изображенные тонкими сплошными кривыми синего цвета. Функции $P_{02}(t)$ изображены утолщенными сплошными кривыми красного цвета, а функции $\rho_{22}(t)$ – еще более утолщенными штриховыми кривыми зеленого цвета.

Рисунок 2 иллюстрирует отличие вида полученных функций $P_{02}(t)$ и $\rho_{22}(t)$ для случая облучения частицы, характеризуемого значениями $\alpha = 0.5$, $\varphi = 0$. Цифры по оси ординат означают значения вычисленной функции $\rho_{22}(t)$ (если не оговорено – как это сделано для рис. 3 и рис. 5). Для удобства сравнения вида

рассматриваемых функций на этом рисунке значения функции $P_{02}(t)$ откладываются в единицах $2^{-1}\alpha^2(1+2\alpha^2)^2$, а функции $I_0(t) = cNL^{-3}\hbar\omega_{21}[1 - \cos(2\Omega t)]$ – в единицах $8cNL^{-3}\hbar\omega_{21}$.

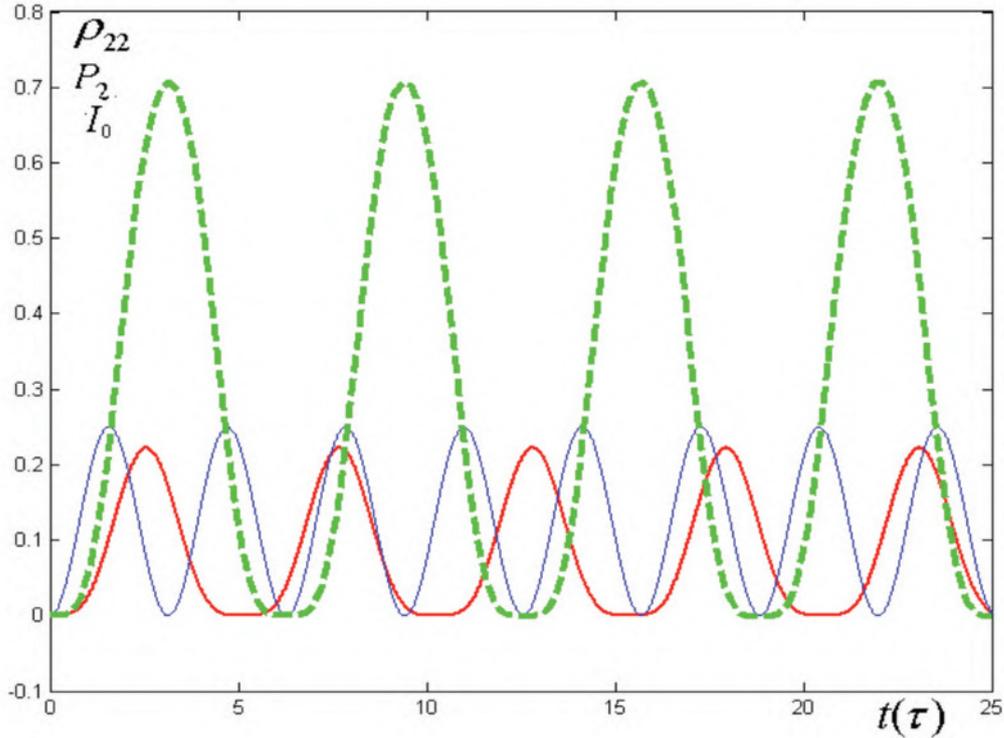


Рис. 2. Зависимости от времени $P_{02}(t)$, $\rho_{22}(t)$ и $I_0(t)$ для случая облучения частицы, характеризуемого параметрами $\alpha = 0.5$, $\varphi = 0$ (пояснение см. в тексте).

Как видно из рис. 2, импульсы рассматриваемых функций имеют приблизительно одинаковую форму, однако появление максимумов импульсов $P_{02}(t)$ отстает от появления максимумов $I_0(t)$. Еще больше отставание появления максимумов функции $\rho_{22}(t)$, так что, например к моменту времени $\approx 25\tau$, когда частица облучена 8-мью импульсами $I_0(t)$, заселенность возбужденного состояния частицы согласно моделированию на основе формализма КТСС проявляется 5-тью импульсами $P_{02}(t)$, а согласно моделированию на основе оптических уравнений Блоха – 4-мя импульсами $\rho_{22}(t)$.

Такого же характера отличие рассматриваемых функций иллюстрирует Рис. 3 для случая облучения частицы, характеризуемого значениями $\alpha = 0.5$ и $\varphi = 0.25\pi$, и Рис. 4 для случая облучения частицы, характеризуемого значениями $\alpha = 0.5$ и $\varphi = 0.5\pi$. На рисунке 3 значения функции $\rho_{22}(t)$ отложены в единицах $(\sqrt{2})^{-1}$, значения функции $P_{02}(t)$ – в единицах $2^{-1}\alpha^2(1+2\alpha^2)^2$, а значения функции $I_0(t) = cNL^{-3}\hbar\omega_{21}[1 + \sin(2t)]$ – в единицах $4cNL^{-3}\hbar\omega_{21}$. На рисунке 4 значения функции $P_{02}(t)$ отложены в единицах $2\alpha^2(1+2\alpha^2)$, а значения функции $I_0(t) = cNL^{-3}\hbar\omega_{21}[1 + \cos(2\Omega t)]$ – в единицах $8cNL^{-3}\hbar\omega_{21}$.

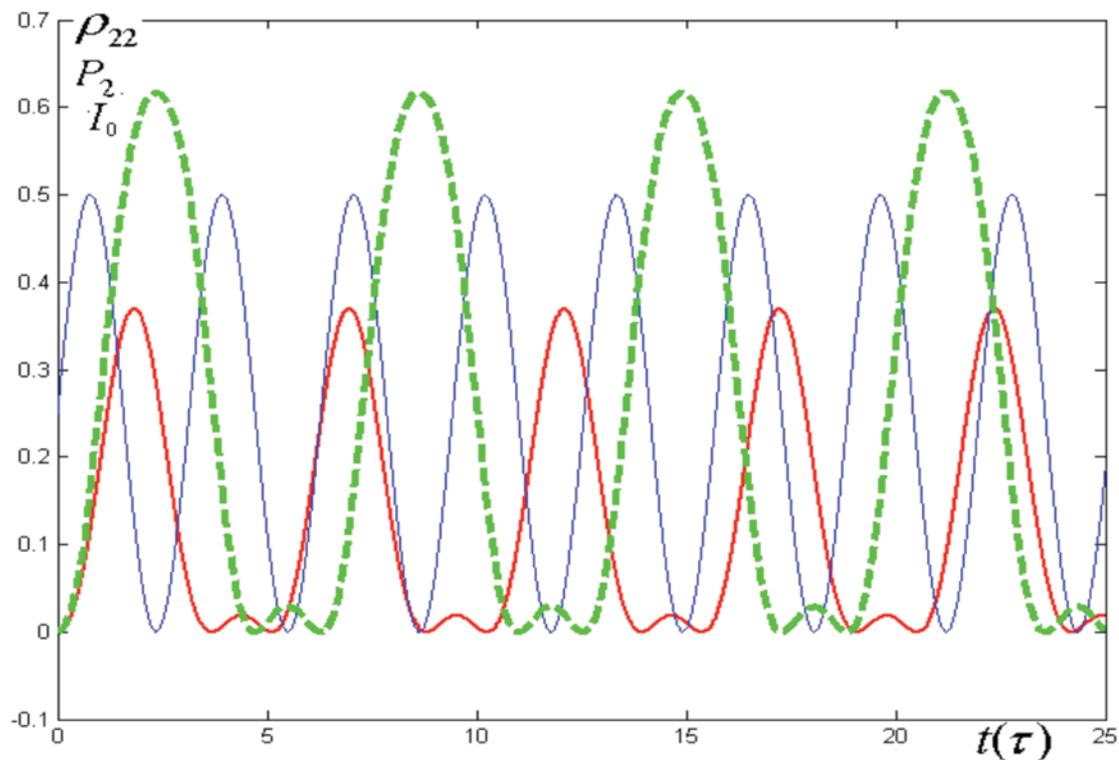


Рис. 3. Зависимости от времени $P_{02}(t)$, $\rho_{22}(t)$ и $I_0(t)$ для случая облучения частицы, характеризуемого параметрами $\alpha = 0.5$, $\varphi = 0.25\pi$ (пояснение см. в тексте).

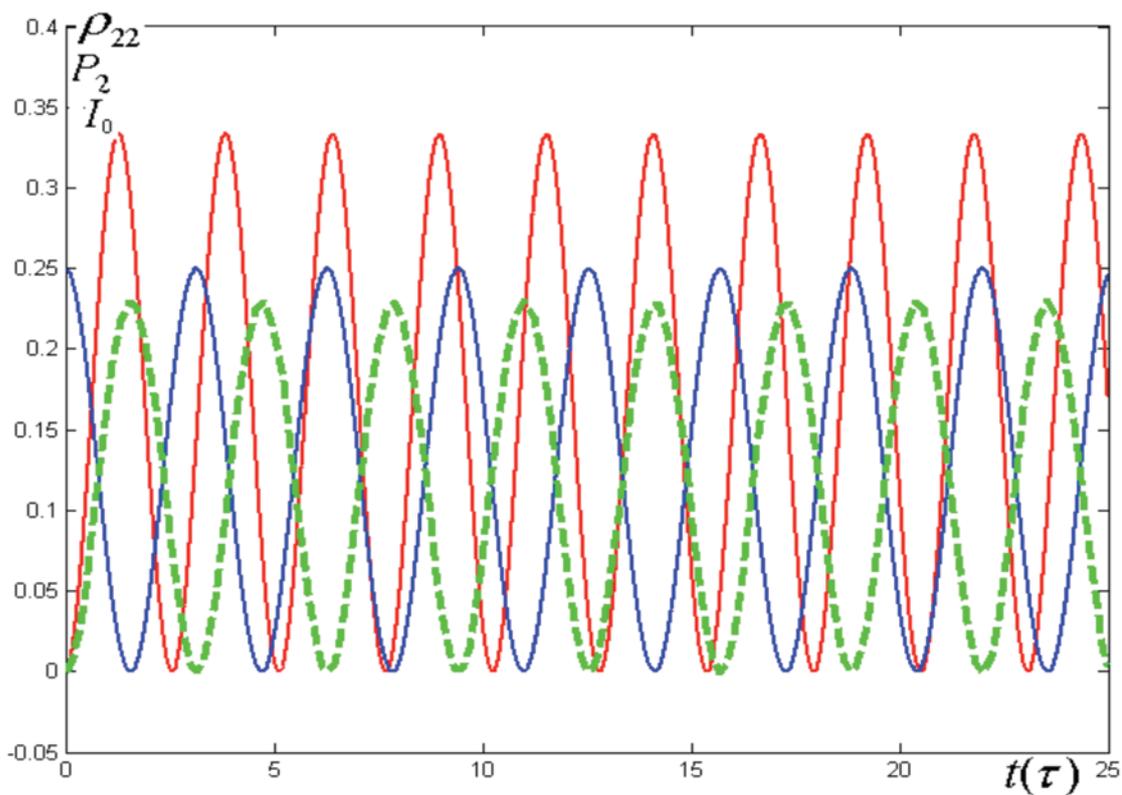


Рис. 4. Зависимости от времени $P_{02}(t)$, $\rho_{22}(t)$ и $I_0(t)$ для случая облучения частицы, характеризуемого параметрами $\alpha = 0.5$, $\varphi = 0.5\pi$ (пояснение см. в тексте).

Отметим, что – как видно на этих рисунках – на каждые два импульса функции $I_0(t)$ приходится один импульс функции $\rho_{22}(t)$, максимум которого приходится на провал до нуля значения функции $I_0(t)$ между двумя последовательными импульсами. Такая же закономерность для относительного появления импульсов заселенности возбужденного состояния классического осциллятора, возбуждаемого классически описываемым бихроматическим полем, установлена в [19,20].

Как показали результаты дополнительных рассмотрений, отмеченное различие вида функций $P_{02}(t)$ и $\rho_{22}(t)$ проявляется менее заметно по сравнению с приведенными случаями, соответствующими значению $\alpha = 0.5$, если интенсивность облучения (Ω_R) меньше при тех же значениях расстройка резонанса частоты каждой из монохроматических компонент облучения Ω (так что $\alpha < 0.5$), или если значение Ω больше при тех же значениях Ω_R . Этого и следовало ожидать, имея в виду установленную в [13] такую же закономерность различия результатов моделирования двумя использованными методами заселенности возбужденного состояния частицы при облучении монохроматическим облучением. При облучении, характеризующимся значением $\alpha > 0.5$, различия вида функций $P_{02}(t)$ и $\rho_{22}(t)$ могут иметь совершенно другой характер, по сравнению с отмеченными выше различиями. Пример таких различий при облучении, характеризуемом значениями $\alpha = 1$ и $\varphi = 0.25\pi$, иллюстрирует Рис. 5.

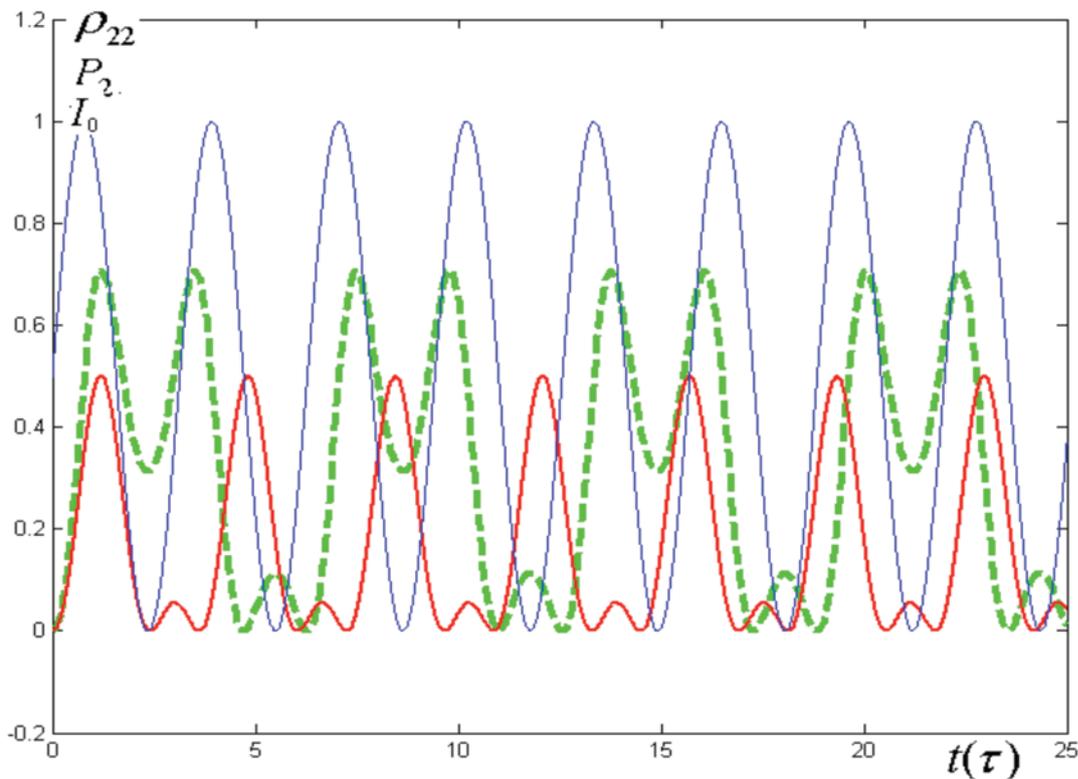


Рис. 5. Зависимости от времени $P_{02}(t)$, $\rho_{22}(t)$ и $I_0(t)$ для случая облучения частицы, характеризуемого параметрами $\alpha = 1$, $\varphi = 0.25\pi$ (пояснение см. в тексте).

На рисунке 5 для удобства сравнения значения функции $\rho_{22}(t)$ отложены в единицах $(\sqrt{2})^{-1}$, функции $P_{02}(t)$ – в единицах $2^{-1}\alpha^2(1+2\alpha^2)^2$, а функции $I_0^{K6}(t) = cNL^{-3}\hbar\omega_{21}[1 + \sin(2\Omega t)]$ – в единицах $2cNL^{-3}\hbar\omega_{21}$. Как видно на этом рисунке, уже в результате возбуждения первыми импульсами облучения вид функции $P_{02}(t)$ существенно отличается от вида функции $\rho_{22}(t)$. Так, в течение действия первого импульса облучения обе эти функции практически в одно и то же время достигают своего максимального значения, а на спаде этого импульса облучения функция $P_{02}(t)$ спадает до нуля, в то время как функция $\rho_{22}(t)$ к этому моменту времени спадает примерно на половину своего максимального значения. Со временем соотношение между значениями функции в одно и то же время меняется, так что, например, в области провала до нуля функции $I_0^{K6}(t)$ после ее 7-го импульса функция $P_{02}(t)$ имеет слабый максимум, тогда как функция $\rho_{22}(t)$ имеет минимум, глубина которого составляет примерно половину максимального значения, достигнутого после действия 7-го импульса.

Заключительное замечание

Итак, установлено, что по своему характеру рассмотренная на основе формализма теории составной системы динамика возбуждения частицы значительно отличается от динамики возбуждения частицы, определенной на основе формализма оптических уравнений Блоха. Поскольку формализм теории составной системы является более полным и точным по сравнению с формализмом оптических уравнений Блоха, то есть основания рекомендовать полученные в настоящей работе выражения использовать для уточнения интерпретации механизма фотовозбуждения вещества бихроматическим полем (которая приведена в ряде работ, отмеченных во Введении), для корректного описания упомянутых во Введении эффектов преобразования веществом бихроматического поля и для изучения возможности совершенствования методов оптимального квантового управления ходом фотопревращений молекул выбором разности начальных фаз монохроматических компонент бихроматического облучения.

Литература

1. Shore B.W. Coherent manipulations of atoms using laser light. // Acta physica Slovaca. 2008. **58**(3). 243–486.
2. Ehlitzky F. Atomic phenomena in bichromatic laser fields // Physics Reports 2001. **345**. 175–264.
3. Скалли М.О., Зубайри М.С. Квантовая оптика. // М.: ФИЗМАТЛИТ 2003. 504 с.
4. Астапенко Валерий. Взаимодействие вещества с бихроматическим электромагнитным полем. // LAP LAMBERT Academic Publishing RU. Saarbrucken. 2012. 225с.

5. *Guccione-Gush R., Gush H. P.* Two-level system in a bichromatic field. // *Phys. Rev. A.* 1974. **10**. 1474–1487.
6. *Гореславский С.И., Крайнов В.П.* Двухуровневый атом в резонансном бихроматическом поле. // *ЖЭТФ.* 1979. **76**. 26–33.
7. *Goreslavsky S. P., Delone N. B., Krainov V. P.* The dynamics and spontaneous radiation of a two-level atom in a bichromatic field. // *J. Phys. B: Atom. Molec. Phys.* 1980. **13**. 2659–2669.
8. *Feneuille S., Schweighofer M-G., Oliver G.* Response of a two-level system to a narrow-band light excitation completely modulated in amplitude. // *J. Phys. B: Atom. Molec. Phys.* 1976. **9**. 2003–2009.
9. *Менский М.Б.* Диссипация и декогеренция квантовых систем. // *Успехи физ. наук.* 2003. **173**(11). 1199–1219.
10. *Silverans R.E., Borghs G., De Bisshop P., Van Hove M.* Phase Effects in Bichromatic Field. // *Phys Rev Lett* 1985. **55**(10). 1070–1073.
11. *Wu Q., Gauthier D.J., Mossberg T.W.* Phase-sensitive dynamics of bichromatically driven two-level atoms. // *Phys. Rev.* 1994. **A. 49**(3). R 1519–1522.
12. *Осадько И.С.* Флуктуирующая флуоресценция наночастиц. // М.: ФИЗМАТЛИТ 2011. 320 с.
13. Морозов В.А. Моделирование динамики заселенности состояний наночастицы. // LAP LAMBERT Academic Publishing RU. Beau Bassin. Mauritius. 2018. 132 с.
14. Лоудон Р. Квантовая теория света. // М.: «МИР» 1976. 488 с.
15. *Белинский А.В.* Квантовая неопределенность и контрпример нелокального классического «реализма». // *Опт. и спектр.* 2017. **123**(3). 393–399.
16. *Морозов В.А., Шорыгин П.П.* Резонансное преобразование двухуровневыми молекулами многофотонного бихроматического нестационарного излучения. // *Опт. и спектр.* 1987. **63**(3). 693–695.
17. *Гайтлер В.* Квантовая теория излучения. // М.: Изд-во иностр. лит. 1956. 491 с.
18. *Макомбер Дж.,* Динамика спектроскопических переходов. // М.: МИР, 1979, 347 стр.
19. *Морозов В.А., Шорыгин П.П.* Резонансное преобразование молекулами полихроматического излучения, имеющего вид периодической последовательности импульсов. Временные характеристики вторичного излучения. // *Опт. и спектр.* 1981. **51**(6). 992–1001.
20. *Морозов В.А., Шорыгин П.П., Гутон Ю.В.* Формирование импульсов вторичного излучения света молекулами (релеевское рассеяние и флуоресценция). // *Опт. и спектр.* 1985. **58**(2). 324–330.

MATHEMATICAL MODELING OF THE POPULATION DYNAMICS OF THE STATES OF A COMPOSITE SYSTEM OF A TWO-LEVEL NANOPARTICLE AND QUANTUM BICHROMATIC ELECTROMAGNETIC FIELD

V.A. Morozov

*Institute of Organic Chemistry. N.D. Zelinsky
Russian Academy of Sciences, Moscow*

E-mail: morozov@mail.ioc.ac.ru

Received 10.12.2018

Mathematical modeling of the population dynamics of the states of a composite system of a two-level particle and a quantized bichromatic electromagnetic field reversibly exchanging energy with this particle has been carried out. Expressions are obtained that describe this dynamics analytically for the case when the average frequency of the monochromatic components of the irradiation field coincides with the frequency of the particle's own transition, and the amplitudes of the electric field oscillations of these components are the same for an arbitrary difference of their initial phases. The obtained expressions differ significantly from the expressions known from the literature for the time dependence of the population of the corresponding particle states, which were obtained by various authors using various methods of the classical theory to describe a bichromatic field acting on a particle as a closed quantum system. There are also significant differences in the nature of the established excitation dynamics of the composite system from the character of the particle excitation dynamics determined by numerical solutions of the corresponding optical Bloch equations. Figures are given that illustrate these differences with examples of a number of specific cases of bichromatic irradiation with different intensities and different relative initial phases of its monochromatic components.

ПРОБЛЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Настоящим номером мы начинаем новую рубрику «Проблемы моделирования нейронных сетей». Важнейшей проблемой моделирования нейронных сетей мы считаем поиск и разработку концептуальной основы устройства и базовых функций нервной ткани. Тематическое направление новой рубрики определяется двумя тезисами. Тезис первый – в биологических системах на молекулярном уровне функционируют специфические функционально полные знаковые системы, определяющие детерминированные алгоритмические формы химического поведения макромолекул. Часть из них доступна для наблюдения и в настоящее время интенсивно исследуется в экспериментальной биохимии и в определённых разделах супрамолекулярной химии. Тезис второй – нервная ткань воспроизводит алгоритмические формы поведения, унаследованные от предшествующих молекулярных уровней.

В октябре 2018 года в Москве состоялась XX международная конференция «Нейроинформатика 2018». Часть докладов была посвящена проблеме разработки концептуальной основы функционирования нервной ткани. Наиболее интересным нам представился доклад Сорокоумова Е.Д., Проскуры А.Л., Запары и Т.А., Ратушняк А.С. «Физические основы функционирования и эволюционные истоки биологических информационных систем». В докладе содержится оригинальная трактовка фундаментальной проблемы становления молекулярной информатики, даётся ответ на вопрос – в каких ситуациях и при каких условиях элементарные акты молекулярных взаимодействий целесообразно трактовать как информационные, а динамику их поведения описывать в терминах функционирования алгоритмических систем. В целом доклад носит программный характер и, открывая новую рубрику журнала, мы сочли целесообразным не ограничиться цитированием отдельных положений, а воспроизвести доклад целиком. Перепечатка доклада производится по первоисточнику:

Сорокоумов Е.Д., Проскура А.Л., Запара Т.А., Ратушняк А.С. Физические основы функционирования и эволюционные истоки биологических информационных систем // Сборник «Лекции по нейроинформатике» / Отв. ред. д.т.н. Ю.В. Тюменцев. М.: НИЯУ МИФИ. – 2018. – С.112-137.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ И ЭВОЛЮЦИОННЫЕ ИСТОКИ БИОЛОГИЧЕСКИХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ*

**Е.Д.СОРОКОУМОВ¹⁻², А. Л.ПРОСКУРА¹, Т. А.ЗАПАРА¹,
А. С.РАТУШНЯК¹⁻³**

¹ Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск, Россия

*² Федеральный исследовательский центр Институт цитологии и генетики
СО РАН, Новосибирск, Россия*

*³ Новосибирский национальный исследовательский государственный университет,
Россия*

E-mail: Ratushniak.Alex@gmail.com

Попытки создать теорию работы мозга, в силу их разрозненности, не привели пока к принципиально значимым результатам. Для понимания принципов и механизмов работы такой биологической информационной системы, вероятно, необходимо исходить из эволюционных истоков и физических основ существования негэнтропийных систем. При таком подходе уровень сложности задачи становится соизмеримым с существующими теоретическими и экспериментальными возможностями. Учитывая структурное и функциональное подобие систем от молекулярного уровня до уровня всего мозга, можно надеяться на эффективность этого подхода. В этом исследовании предпринята попытка формирования парадигмы работы биологических информационных систем на базе объединения существующей мозаики данных.

УДК 001(06)+004.032.26 (06)

* Представленные в этой работе данные были получены в ходе реализации базового проекта фундаментальных исследований РАН VI.35.2.6 и РФФИ № 17-04-01440 а.

Печатается по первоисточнику: Сборник «Лекции по нейроинформатике» /

Отв. ред. д.т.н. Ю.В. Тюменцев. М.: НИЯУ МИФИ. – 2018. – С.112-137.

Расширение и углубление разнообразных отраслей знания в течение последних ста замечательных лет поставило нас перед странной дилеммой. Мы ясно чувствуем, что только теперь начинаем приобретать надежный материал для того чтобы объединить в одно целое все, что нам известно; но с другой стороны, становится почти невозможно для одного ума полностью овладеть более чем какой-либо одной небольшой специальной частью науки. Я не вижу выхода из этого положения (чтобы при этом наша основная цель не оказалась потерянной навсегда), если некоторые из нас не рискнут взяться за синтез фактов и теорий, хотя бы наше знание в некоторых из этих областей было неполным и полученным из вторых рук и хотя бы мы подвергались опасности показаться невеждами.

Эрвин Шрёдингер Что такое жизнь с точки зрения физики?
Дублин, сентябрь, 1944

Введение

Для создания новой парадигмы принципов и механизмов работы биологических информационных систем (БИС) необходимо понимание физических принципов, на которых базируется их существование. Одной из проблем, появляющихся на пути разработки концептуальных основ возникновения и существования живых систем, является представление, что основным функциональным свойством таких систем является саморепликация (воспроизведение). Такая «генетическая» теория жизни, несмотря на очевидные противоречия, достаточно распространена. Главной проблемой в рамках этой концепции являются значительные трудности в попытках представить естественно-научную теорию возникновения систем с достаточно сложной системой самовоспроизведения. Кроме того, как правило не учитывается, что далеко не все биологические системы наделены таким свойством. Как правило, не используется размножение, например, у нейронов. В большинстве своем эти клетки, возникающие в период эмбриогенеза, не самореплицируются на протяжении всей жизни организма. Можно предположить, что и на начальном этапе эволюции при возникновении простейших молекулярных конструкций такие протоклетки существовали достаточно

долго в условиях отсутствия систем самокопирования. Функция воспроизводства могла возникнуть на базе существовавшего, на этих этапах эволюции, простого слияния и дробления.

Главной особенностью, следствием которой являются все известные функции биологических систем, является возможность понижать внутреннюю энтропию. Такая возможность, существующая у информационно и термодинамически открытых систем, может быть реализована только на базе прогностики будущих событий (опережающего отображения действительности основанного на познании, обучении, приобретении информации). Это позволяет таким системам в соответствии с негэнтропийным принципом повышать внутреннюю упорядоченность с использованием получаемой из внешней среды информации и энергии [1-3]. Аспект причинности отражен и в рамках принципа Хебба. Подчеркнуто, что генерация потенциала действия в пресинаптической клетке должна предшествовать, опережать срабатывание постсинаптической клетки. Только в этом случае может произойти изменение эффективности этого стимула. Такой предшествующий стимул можно рассматривать как сигнальный для постсинаптической клетки. Изменение эффективности такого сигнала (запоминание) позволяет в дальнейшем постсинаптической клетке использовать его в прогностических целях [4]. Можно предположить возможность спонтанного формирования простейших молекулярных структур, способных организовываться в систему, уменьшающую внутреннюю энтропию на основе процессов «супромолекулярного обучения» [5, 6]. Использование приобретаемой при таком «обучении» информации для прогноза будущего состояния среды позволяет увеличивать упорядоченность системы, дает возможность получения дополнительной энергии и/или избегания условий ее потери. Одним из крупных обобщений, касающихся роли прогностики в биологии, является представление об опережающем отражении действительности, сформулированное *П. К. Анохиным* [7]. Его суть состоит в том, что многие поколения живых систем, сталкиваясь с определенной последовательностью повторяющихся внешних событий (смена времен года, дня и ночи и т. д.), не только отражали последовательность этих событий, но и фиксировали ее в цепях химических реакций. Молекулярные системы, обладающие такими качествами, создают зону устойчивости, пространство жизни. Первичные молекулярные системы, послужившие основой эволюционного процесса, вероятно, возникли на базе такого принципа. Слияния и дробления таких протоклеток, ароморфоз под контролем обратных связей со средой, вероятно, приводил к совершенствованию взаимодействия рецепторно-эффекторных систем. Более эффективные и развитые рецепторно-эффекторные молекулярные ансамбли приобретали преимущество, и на их основе формировались гомеостатические свойства, «мотивационные» и саморепликационные подпрограммы.

Таким образом, парадигма работы биологических информационных систем сводится к негэнтропийному принципу. Этот принцип, связывающий энтропийные и информационные процессы, формулировался многими авторами (например [1-3]). Информация может вносить отрицательный вклад в энтропию. То есть, негэнтропия может переходить в информацию и обратно. На этом физическом принципе основано существование биологических систем как зоны устойчивости структурно-функциональных молекулярных ансамблей. Такие ансамбли, используя накопленную информацию способны прогнозировать будущее состояние внешней и внутренней среды. Включение на основе такого прогноза того или другого алгоритма реакции позволяет этим системам увеличить вероятность избегания неблагоприятных (повышающих энтропию системы) воздействий окружающей среды.

Внешнее воздействие на такую систему приводит к уменьшению этой упорядоченности, и суммарная негэнтропия уменьшается, но приобретается информация о среде. Если при этом воздействие привело к образованию (химической, пространственной) связи между молекулами, воспринявшими воздействие, – «рецепторами» и выполнившими некоторое действие – «эффекторами», по сути ассоциативной, то изменение одной из молекул становилось сигнальным, т.е. несущим информацию. Эта приобретенная информация в дальнейшем позволяет молекулярной системе включать эффекторы при более низком, опережающем основное воздействие сигнале. То есть, уменьшать энтропию с некоторым коэффициентом, создавая дополнительный запас негэнтропии («прибавочная стоимость»).

Таким образом, формируется ассоциативная связь событий. Запоминание (образованием межмолекулярных связей или конформации молекул) факторов-сигналов, опережающих основное воздействие. При этом воздействия среды будут селективировать те молекулярные системы, в которых алгоритмы ответа на воздействие позволяют избежать или минимизировать неблагоприятные последствия, т. е. уменьшение негэнтропии.

Подходы и методы моделирования БИС

При моделировании БИС применяется онтологический и нейросетевой подход. Эти подходы благодаря существенному продвижению в вычислительных технологиях привели в последние годы к значимым практическим результатам. Однако это не приблизило понимание принципов работы мозга. При выборе уровня организации систем используется два основных подхода – сверху вниз и снизу вверх. Предпочтение, как правило, отдается первому подходу, ориентированному на системы большой сложности. Такая методология исследований приводит к попытке решения задач уровня сложности, которых далеко выходит за пределы существующих возможностей теоретического и экспериментального анализа. В БИС сложность си-

стемы определяется огромным количеством переменных. При попытках их моделирования нарушаются условия разрешимости системы уравнений [8]. Поэтому такие попытки обычно сводятся к уменьшению количества переменных, как правило, на несколько порядков. Допустимость такого подхода не представляется достаточно обоснованной. В молекулярной информационной машине, которой по существу является любая БИС за много миллиардов лет эволюции все несущественные элементы и процессы давно отсеяны. При имитационном и экспериментальном моделировании таких информационных устройств разбиение их на отдельные блоки без учета их интеграции в единую систему приводит зачастую к необоснованным затратам и выводам.

Подход снизу вверх изначально представляется чрезвычайно сложным, однако только анализ базовых принципов, лежащих на молекулярно-клеточном уровне, позволит приблизиться к пониманию работы системы в целом. Учитывая наличие принципа эмерджентности можно предполагать, что основа всех жизненных процессов неизменна на всех уровнях организации БИС. К появлению новых качеств, в том числе когнитивности приводят, в основном, только значительные количественные различия.

Многие из существующих направлений моделирования БИС базируются, в основном, на чрезвычайно упрощенных, давно устаревших представлениях о физических принципах, функциях и молекулярных механизмах работы базовых единиц мозга – нервных клеток. Одной из таких распространенных и до настоящего времени широко используемой концепцией является постулат о принципе работы синаптического сенсора нейрона —правило Хебба [9]. Однако существующие сейчас знания далеко выходят за рамки этих представлений. Показано, что в пределах синапса кроме рецепторов к традиционным нейротрансмиттерам присутствуют рецепторы к множеству других сигнальных молекул. Можно предположить, что уже в рамках этой рецепторной зоны клетки достаточно простой молекулярной машиной осуществляется первичная обработка полисенсорной информации и, возможно, принятие решений о реакции на такую матрицу сигналов. В силу того, что учет известных данных о принципах работы таких молекулярных машин зачастую не учитывается, значительных продвижений к созданию информационных систем соизмеримых по возможностям с мозгом пока не произошло. Соответственно, существенно ограничиваются возможности решения и всех базирующихся на этой основе задач в области комплекса нейронаук, информатики, профилактики, диагностики и коррекции патологических и посттравматических состояний и т. д. Для приближения к возможности решения этих проблем необходимо рассмотреть те первичные предпосылки, которые привели к возникновению БИС, и провести биоинформационный анализ молекулярной организации существующих сейчас систем. Опреде-

лить их элементы наиболее функционально близкие к первичным негэнтропийным прогностическим комплексам.

Условия возникновения (существования) и характеристики БИС

Одним из главных условий и факторов возникновения биологических систем можно считать наличие в среде градиентов, которые могут позволить возникающим молекулярным системам концентрировать энергию в некотором внутреннем пространстве. Это могут быть градиенты температур, концентраций, давлений, освещенности и т. д. Примеры существования биологических систем в таких условиях встречаются повсеместно. Черные курильщики (как и другие места наличия устойчивых градиентов) можно рассматривать как наглядный пример возможных условий возникновения и существования сообществ БИС.

В стартовой точке развития таких систем могли флюктуационно формироваться предельно простые молекулярные конструкции уже с некоторым «запасом», избытком упорядоченности (негэнтропии). Возникающие конструкции-протобионты для успешного существования должны были обладать рядом характеристик. В их конструкцию должны были входить молекулы, взаимодействующие с факторами среды – рецепторы и молекулы, осуществляющие активное воздействие на среду – эффекторы. Кроме того в состав комплексов должны входить молекулы интегрирующие рецепторы с эффекторами и обладающие возможностью менять собственное состояние (конформацию) «ассоциативно запоминать» состояния повышающие устойчивость всей такой молекулярной конструкции. При этом реакция на факторы внешней среды должна была зависеть от направления градиента. «Запоминание состояния» могло позволять при следующем совпадении репетируемых факторов среды как бы «прогнозировать» следующие события во внешней среде. Это позволяло таким системам с большей вероятностью избегать неблагоприятных факторов или приобретать дополнительную энергию и информацию. Нарастивание таких комплексов при слиянии (взаимопопущении) приводило к увеличению запасов энергии, негэнтропии. Увеличение количества рецепторов и эффекторов способствовало расширению спектра репетируемых факторов среды и возможных реакций на их комбинацию.

Простота таких молекулярных комплексов позволяет предположить возможность их спонтанного формирования. При этом в таких молекулярных системах формируется возможность баланса между затратами энергии на получение информации и ее использованием для приобретением негэнтропии. В этих конструкциях возникают условия, при которых более слабый сигнал приходящий ранее более сильного (с неблагоприятными последстви-

ями) ассоциативно фиксируется и в дальнейшем вызывает реакцию сходную с потенциально неблагоприятным. То есть, по сути, такая простая молекулярная конструкция приобретает прогностические свойства.

При формировании многоклеточности возникли специализированные на информационных процессах (познавательная мотивация) клетки-нейроны и специализированный орган – мозг. Это позволило существенно увеличить количество репетируемых параметров внешней (и внутренней) среды и увеличить временной отрезок прогнозируемых событий, т. е. расширить зону устойчивости таких систем. При этом в основе работы молекулярных гиперкомплексов по-прежнему лежит свойство понижения энтропии благодаря прогностике в результате информационных взаимодействий со средой. Выявление и анализ достаточно простых внутриклеточных информационных систем, сохранившихся в эволюции клетки [10, 11] позволит конкретизировать молекулярные процессы, лежащие в основе когнитивности и их биофизическую функцию.

Роль среды

Одним из важнейших факторов приведшим к существующим формам БИС являются свойства той среды, в которой возникают и эволюционируют биосистемы. При моделировании БИС необходимо наряду с созданием их моделей и создание модели среды, в которой предполагается их существование. Как правило, это мало учитывается. Модификации БИС возможны при наличии в окружающей среде свойства вариабельности. Такая вариабельность может быть индуцирована энтропийными и другими процессами. Важным является набор факторов, которые могут играть сигнальную роль для БИС. Существенное значение имеет анизотропия среды (прозрачности для звука, света, вязкости, электропроводности, теплопроводности и др.). При этом биосистемы подстраиваются под изменяющиеся условия на основе обратных связей. В этих условиях возможно возникновение, как новых свойств биообъектов, так и разных форм занимающих определенные ниши.

Логика элементарных негэнгорпийных прогностических БИС

Таким образом, можно предположить, что простейшие негэнтропийные БИС по существу являются логическими устройствами, обладающими прогностической функцией, на базе информации полученной при взаимодействии с окружающей средой (рис. 1).

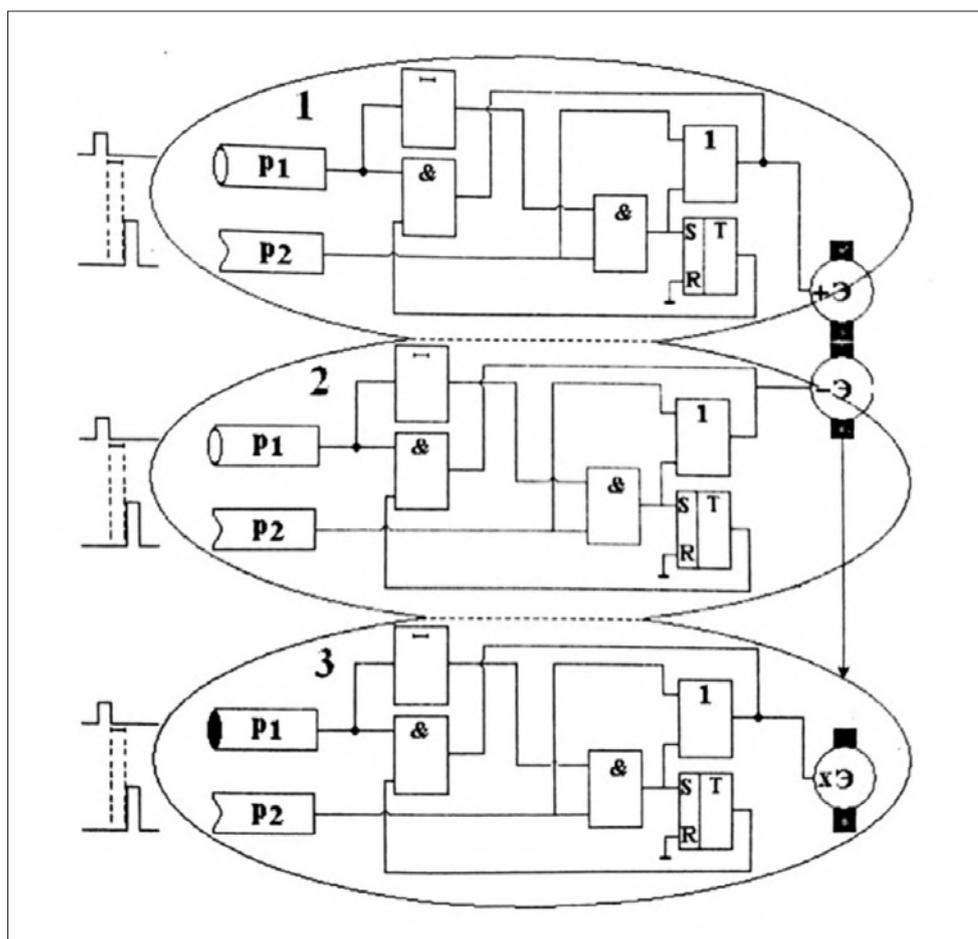


Рис. 1. Схема логических операций выполняемых элементарной молекулярной негэнтропийной прогностической БИС: **P1** и **P2** – рецепторы внешних сигналов;
3 – элемент задержки сигнала; **&** – элемент, выполняющий логическую операцию «И»;
1 – элемент, выполняющий логическую операцию «ИЛИ»;
T – элемент памяти-триггер; **+Э** – эффектор «положительного сигнала»;
-Э – эффектор «отрицательного» сигнала

Каждый из трех блоков такой информационной системы выполняет простую функцию. При действии сигнала на рецептор **P1** сигнал с него поступает на элемент, выполняющий логическую операцию **И**, и линию задержки. На выход элемента **И1** сигнал не поступает. С линии задержки сигнал поступает на элемент **И2**. Выходной сигнал на **+Э** не поступает. При наступлении сигнального события возбуждающего рецептор **P2** сигнал распространяется на элемент **И2** и при совпадении с задержанным сигналом с **P1** поступает на элементы **ИЛИ** и **T** триггер. С элемента **ИЛИ** сигнал включает эффектор **+Э**. При этом блок этой молекулярной машины совершает действие определяемое функцией эффектора. После первой комбинации сигналов, пришедших на рецепторы **P1** и **P2**, кроме эффектора срабатывает триггер **T**, переходя во второе устойчивое состояние, обеспечивающее постоянное присутствие сигнала на втором входе логического элемента **И1**.

При возникновении второго сигнала на **P1** сразу возникнет сигнал на +Э и произойдет соответствующая функциональная реакция. То есть, если комбинация сигналов состоит из светового (на **P1**) и звукового, ударного (на **P2**), а функция +Э будет состоять в перемещении всего устройства в направлении укрытия от фактора детектируемого **P2**, то после первой комбинации сигналов вторая их комбинация позволит избежать воздействия фактора **P2**. Разница в работе блока 1 и блока 2 состоит в различии сигналов, детектируемых рецепторами, и в функции эффектора. Например, при уменьшении освещенности на **P1** и незначительных колебаниях давления на **P2** эффектор перемещает систему в направлении пониженной освещенности. Если такая комбинация сигналов произошла в результате перемещения вблизи данной молекулярной системы подобной молекулярной конструкции, то может произойти их слияние (взаимопоглощение). При этом вновь образовавшийся молекулярный комплекс получит дополнительные возможности рецепции внешних факторов и реагирования на них. То есть, в результате этого процесса и отбора на основе обратных связей с внешней средой повысится устойчивость такой системы. Функции логических элементов могут выполнять достаточно простые молекулы, а возникновение таких простых ансамблей может происходить спонтанно.

Изложенная гипотетическая схема формирования молекулярных комплексов, обладающих негэнтропийными свойствами, естественно, требует экспериментальных доказательств. Представляется малопродуктивным поиск таких конструкций в существующей среде наполненной биологическими системами способными к их быстрому поглощению. Хотя, возможно, такое поглощение может являться одним из факторов эволюционного процесса на молекулярном уровне. Попытки конструирования таких систем тоже не привели пока к существенно значимым результатам. Возможным вариантом решения проблемы поиска таких конструкций является нахождение подобных систем в существующих сейчас клетках как молекулярных комплексах собранных в процессе эволюции из простых молекулярных ансамблей. Наибольший интерес в этой задаче представляется анализ молекулярных конструкций в нервных клетках специализированных именно на решении информационных задач. Биоинформационный анализ молекулярного интерактома нейронов позволяет надеяться на приближение к решению этой проблемы.

Синапс как молекулярная информационная система

Одним из структурно-функциональных элементов нейрона, опосредующих осуществление им основных информационных функций, являются синапсы – рецепторно-эффекторные зоны вынесенные, как правило, достаточно далеко от тела клетки. Эти молекулярные машины осуществляют

достаточно сложные функциональные процессы. В настоящее время доминирующие представления сводят эти функции к осуществлению межнейронных связей. Предполагается, что такие контакты в мозге образуются, усиливаются и становятся более обширными в результате синаптических модуляций, зависящих от опыта [12]. Посредством синаптических контактов нейроны формируют между собой сети взаимодействий. Сети могут ассоциироваться между собой. Отдельный нейрон имеет множество синапсов и может быть членом многих ассоциативных сетей и, следовательно, многих элементов знания. В основе формирования постсинапсов как рецепторно-эффекторных зон лежат молекулярные процессы, которые инициируются внешними воздействиями, что приводит к перестройкам внутриклеточных молекулярных систем. Все это, в конечном счете, служит базисом обучения и запоминания на молекулярном уровне, а также опосредует анализ и дополнение образа внешнего сигнала, обеспечивая опережающее отражение внешней среды.

Синапс образуется из пресинаптической (аксональной) и постсинаптической частей. Подавляющее большинство синапсов млекопитающих – химические, в которых нейротрансмиттерная передача осуществляется через выброс из пресинаптической части нейромедиатора, который связывается с рецептивными молекулами на постсинаптической части. Это приводит к изменению потенциала мембраны, что может вызвать срабатывание эффекторных молекул и формированию импульсного синаптического потенциала. При определенных условиях это способствует передаче импульса по дендритной мембране к соме нейрона и далее к формированию потенциала действия и его передаче по аксону к другим клеткам. Однако условия возникновения такого постсинаптического потенциала не ограничиваются приходом медиаторного сигнала.

Синапсы разделяются по нейромедиаторам (серотонергические, глутаматергические, дофаминергические и пр.). При этом вместе с основным медиатором может выбрасываться и другой тип нейромедиатора/ов, который выступает в роли модулятора. Взаимодействие медиатора с рецептором приводит к запуску целого каскада межбелковых взаимодействий, путей сигнальной трансдукции от мембраны синапса в дендрит и далее в сому нейрона к ядру. Изменение уровня синаптической передачи (эффективность синаптической передачи) зависит от множества пре- и постсинаптических механизмов, многие из которых детально изучены. Долговременные изменения эффективности синаптической передачи являются, как принято считать, ключевым физиологическим механизмом обучения и памяти.

Постсинаптическая часть ряда нейронов в мозге сформирована специализированным компартментом — дендритным типиком. Дендритные ши-

пики часто встречаются в высших отделах головного мозга, различны по своей форме. Эти структуры богаты актином, и патология в их морфологии и плотности сопутствует ряду психических расстройств [13]. Установлено, что по мере взросления животного возрастает общая плотность шипиков в мозге. Так, у крысы на 5 день после рождения половина синапсов мозга формируется на дендритных стволах, тогда как через три недели развития таких синапсов остается примерно 20%, а в мозге взрослых животных они встречаются довольно редко [14]. Также показано, что начиная с 15 дня жизни животного до его полного взросления происходит удвоение плотности шипиков в CA1 поле гиппокампа, что, как считается, опосредует увеличение уровня нейротрансмиссии нейронов этого отдела в течение развития [15]. Возникновение и исчезновение дендритных шипиков является постоянным, высоко динамичным процессом в мозге взрослых животных. По-видимому, так происходит формирование ассоциативных связей среди группы шипиков одного дендрита, причем сила контакта может, как усиливаться, так и ослабляться в зависимости от значимости приходящего импульса [16]. Возникающие шипики подразделяют на три группы. Первая группа – короткоживущие шипики (элиминируются в течение нескольких дней после приобретения нового опыта). Вторая группа – средне живущие (от одного до двух месяцев). Третья – долгоживущие шипики (сохраняются пожизненно) [16].

В настоящее время нет единого мнения о роли дендритных шипиков в процессах обучения и хранения информации в мозге. С одной стороны, эти структуры обеспечивают стабильные контакты между нейронами [17, 18], с другой, известна высокая динамика их появления/исчезновения в процессе приобретения нового опыта [16]. Эта противоречивость данных делает высоко актуальной задачу изучения межбелковой организации протеома дендритного шипика в процессах нейрональной синаптической пластичности.

Шипиковые синапсы хорошо представлены в гиппокампе и выступают постсинаптической частью несимметричных аксо-дендритных синапсов (между коллатеральными Шаффера поля CA3 гиппокампа и дендритными шипиками пирамидных клеток поля CA1 гиппокампа), обеспечивая возбуждающую нейротрансмиссию. Нейромедиатором при этом выступает глутаминовая кислота, к которой чувствительны глутаматные рецепторы нескольких типов, подразделяющиеся на ионотропные (НМДА (чувствительны к действию N-метил-D-аспарагиновой кислоты), АМПА (агонистом выступает α -амино-3-гидрокси-5-метил-4-изоксазолпропионовой кислота) рецепторы) и метаботропные рецепторы (mGluR). Помимо глутаматных рецепторов различных типов на мембране дендритных шипиков располагаются разнообразные медиаторные и не медиаторные рецепторы

– ростовых и нейротрофических факторов, некоторых гормонов (инсулин (InsR рецепторы), лептин (OB-R рецепторы), грелин (GHSR1a рецепторы), рецепторы иных медиаторных систем (дофамин (D1/D5 рецепторы), серотонин (5HT рецепторы)). В качестве эффекторов выступают ионные каналы (калиевые, натриевые, кальциевые).

По современным данным, НМДА-рецепторы опосредуют быструю возбуждающую нейротрансмиссию, играя важную роль в функционировании центральной нервной системы (ЦНС) млекопитающих [19]. Этот тип глутаматных рецепторов вносит существенный вклад в обеспечение пластичности мозга и способен конвертировать специфические паттерны нейрональной активности в долговременные изменения синаптической структуры и функций, что, как предполагают, лежит в основе высших когнитивных функций [20, 21]. Их особенностью является то, что у них, в отличие от других типов глутаматных рецепторов, медленная динамика запуска вследствие того, что для их активации необходимо совпадение химического сигнала (нейромедиатор глутамат) с определенным потенциалом на мембране. То есть, для проведения ионов через канал НМДА-рецептора плазматическая синаптическая мембрана должна быть деполяризована, что, собственно, опосредует отсоединение блокирующих его ионов магния [22, 23]. Деполяризация происходит за счет АМПА рецепторов.

НМДА-рецепторы формируют макрокомплексы с белками постсинапса. Имеются данные, что их молекулярная масса может достигать до 2000 кДа [24]. На синаптической мембране дендритных шипиков комплексов НМДА-рецепторов варьирует в диапазоне 1-5. Они являются обязательным составляющим элементом глутаматного синапса и объединяются в центре синаптической мембраны [25], что, как предполагают, обеспечивает строгую локализацию в пространстве входящего через них потока ионов (кальция и натрия) [26].

Дендритный шипик имеет упорядоченную организацию на горизонтальном и вертикальном уровнях. Горизонтальная часть включает зоны мембраны шипика – синаптическая (собственно, постсинапс в синаптическом контакте), перисинаптическая, экстрасинаптическая. Вертикальный уровень представлен межбелковой сетью сигнальных, структурных белков и постсинаптическим уплотнением (ПСУ) [25,27]. ПСУ имеет подобие ортогональной решетки, в которой закрепляются разнообразные мембранные белки [25]. ПСУ обеспечивает четкое пространственное позиционирование рецепторов, протеинкиназ и фосфатаз, обеспечивающих регулирование их активности и передачу сигнала от мембраны клетки в цитоплазму. ПСУ связано с актиновым цитоскелетом шипика, который с одной стороны обеспечивает транспортную логистику белков, с другой – динамическое равновесие белок-белковых взаимодействий в макрокомплексах.

НМДА-рецепторы собираются из гликопротеин-липидных субъединиц, которые формируют несколько подтипов рецепторно-ионофорных комплексов. Все подтипы НМДА-рецепторов представляют комплексы двух копий (гомомеров) субъединиц GluN1 (NR1), GluN2 (NR2A, NR2B, NR2C, NR2D), GluN3 (NR3A, NR3B), каждая из которых кодируется отдельным геном (Grin1 (субъединица zeta), Grin2a-2d (субъединицы epsilon 1-4), Grin3a-3b) [28]. Субъединичный состав варьирует в различных отделах мозга и регулируется в процессе развития [19].

В субъединицах НМДА-рецепторов выделяют несколько доменов. Внеклеточный модуль доменов отвечает за их объединение, связывание с агонистами. Трансмембранный домен обеспечивает ионную селективность. Внутриклеточный (цитоплазматический) домен вовлечен в транспортровку рецепторов, их закрепление на мембране, связь с сигнальными молекулами [19]. Цитоплазматические домены НМДА-рецепторов через взаимодействие с белками шипика обеспечивают формирование макрокомплексов, состав которых варьирует в ответ на внешние сигналы. В ПСУ обнаружено около 620 белков, более 450 из которых объединяется с НМДА-рецепторами [29].

В одной из своих предыдущих работ мы разбирали макрокомплексы НМДА-рецепторов в зависимости от их субъединичного состава [30]. Известно, что по мере взросления в гиппокампе, в частности, в поле CA1, растет доля синаптических НМДА-рецепторов, в состав которых входит субъединица NR2A. Рецепторы с субъединицей NR2B во взрослом гиппокампе локализованы преимущественно в перисинаптической и экстраинаптической областях мембраны дендритных шипиков [19].

NR2A- и NR2B-содержащие НМДА-рецепторы отличаются по своим основным характеристикам – ионной проводимости, чувствительности к глутамату и агонистам, ионам магния, времени деактивации. Субъединичный состав определяет включенность НМДА-рецептора в постсинаптические процессы, запускаемые интенсивной активацией синапса (например, в результате индукции долговременной потенциации). NR2A-содержащие НМДА-рецепторы, обеспечивают возможности формирования функциональных взаимодействий с немедиаторными рецепторами синапсов. Наиболее представлены в данных макрокомплексах регуляторы ремоделирования цитоскелета, что в очередной раз демонстрирует тесную связь функциональной (изменение силы синапса) и структурной пластичности (изменение формы, размера ПСУ и постсинапса в целом) глутаматергических синапсов гиппокампа взрослых животных.

На мембране дендритных шипиков присутствуют глутаматные рецепторы других типов. В зоне синаптических контактов находятся АМПА-рецепторы, которые после взаимодействия с глутаматом проводят внутрь

шипика ионы натрия, обеспечивая, в том числе, необходимую для активации НМДА-рецепторов деполяризацию плазматической мембраны.

В нейронах CA1 поля гиппокампа встречаются АМПА-рецепторы различного субъединичного состава. Большинство рецепторов состоят из субъединиц GluR1-3: GluR2/GluR3, меньшая часть состоит из GluR1/GluR2 и GluR1/GluR1 (GluR1-АМПАР) [31]. Субъединичный состав данного типа рецепторов определяет их клеточную логику и ионную селективность. Рецепторы, в состав которых входит субъединица GluR2, GluR2-АМПАР, проводят ионы натрия, тогда как GluR1-АМПАР проводят в синапс также ионы кальция.

При базовых условиях нейротрансмиссия определяется высоко динамичным процессом обмена АМПА-рецепторами, содержащими GluR2 субъединицы, между синапсами и везикулярными пулами дендрита для обеспечения устойчивой плотности рецепторов в синаптической зоне [32, 27]. Синаптическая активность может значительным образом сдвинуть баланс плотности АМПА-рецепторов между различными микродоменами шипика и дендрита, приводя либо к увеличению, либо к уменьшению плотности рецепторов на синаптической мембране и, соответственно, к увеличению или уменьшению уровня синаптической эффективности [33]. Зависимое от активности изменение числа синаптических АМПА-рецепторов регулируется целым комплексом регуляторных взаимодействий на различных уровнях нейрона в ответ на пришедший сигнал и, как полагают, является механизмом сохранения информации в нейрональных сетях [34].

В нейронах CA1 поля гиппокампа существует два пути регулирования плотности АМПА-рецепторов. Один из них не зависит от состояния активности синапса, протекает постоянно и направлен, главным образом, на поддержание существующей плотности рецепторов на синаптической мембране. Такой механизм называют конститутивным кругооборотом (рециркулированием) рецепторов АМПА типа, который поддерживает плотность рецепторов GluR2/3 субъединичного состава. Другой путь запускается при активации синапса и направлен как на изменение субъединичного состава, так и плотности АМПА-рецепторов в зависимости от механизма синаптической пластичности [32]. Установлено, что скорость доставки GluR1-АМПАР из внутриклеточных компартментов к нейрональной поверхности при базовых условиях низка [35]. Мощный кратковременный выброс нейротрансмиттера (глутамата в синапсах поля CA1 гиппокампа) в синаптическую щель приводит к увеличению эффективности синаптической передачи и долговременному сохранению нового стационарного состояния синаптической передачи. Известно, что быстрое изменение (в секундном интервале) эффективности синаптической передачи обусловлено, наряду с прочими событиями, встраиванием в синаптическую зону АМПА-рецепторов с субъединицей GluR1 (GluR1/1, GluR1/2) [36].

В пределах преинаптических зон (непосредственно рядом с зоной синаптического контакта) располагаются метаботропные глутаматные рецепторы (mGluR1a/5) [37]. Через скаффолд-белки данный тип рецепторов включается в макрокомплекс НМДА-рецепторов вместе с рианодиновыми рецепторами, которые расположены на мембране эндоплазматического ретикулума и ответственны за выброс ионов кальция из внутриклеточного депо, [12, 38]; обеспечивая, таким образом, функциональную организацию mGluR1a/5-InsP3R-Ca²⁺ сигнального пути в дендритных шипиках, который задействован в поддержании конститутивного рециклинга АМПА-рецепторов [39-42]. Через скаффолдные белки также происходит физическое объединение макрокомплексов НМДА-рецепторов с белками эндоцитозных зон, расположенных в зоне экстрасинаптической мембраны дендритных шипиков [43-45].

Одним из ключевых событий, обеспечивающий закрепление на синапсах GluR1 -АМПАР, является их фосфорилирование по серину S845 протеинкиназой А (РКА) [46]. РКА, в свою очередь, должна быть активирована локально синтезируемым цАМФ. Синтез цАМФ осуществляется благодаря аденилатциклазе (АДЦ), которая локально закреплена на мембране (перисинаптическая мембрана) и активируется входящими через НМДА-рецептор ионами кальция [47].

Метаботропные глутаматные рецепторы поля CA1 гиппокампа связаны с Gg/11 белковым комплексом, который влияет на активность фосфолипазы С, обеспечивающей производство диацилглицерола (ДАГ) и инозитола-3-фосфата (ИЗФ). ДАГ активирует протеинкиназу С, которая опосредует выведение из синаптической зоны GluR2/3. ИЗФ активирует рианодиновые рецепторы, что, в конечном счете, обеспечивает выброс кальция из внутриклеточного депо. Одним из молекулярных событий при этом является активирование кальциона, который способствует формированию кластринового покрытия эндосом в эндоцитозной зоне [48]. Таким образом, активирование метаботропных рецепторов можно рассматривать как петлю обратной негативной регуляции, которая будет сдерживать излишнее увеличение плотности АМПАР после активирования НМДА-рецепторов.

В перисинаптических зонах мембраны шипика располагаются: различные медиаторные и не медиаторные рецепторы. После активирования НМДА-рецепторов происходит их функциональная ассоциация с интерактомом шипика, контролирующим изменение эффективности синаптического контакта в ответ на пришедший сигнал. Известно, что рецепторы нейротрофических факторов формируют временную связь с белками макрокомплексов UK2A-11НМДА-рецепторов, что важно для запуска ERK-киназного сигнального каскада после индукции долговременной потенциации [49, 50].

Дофаминовые рецепторы (D1/D5 типа) присутствуют на шипиках синапсов в поле CA1 гиппокампа. Данный тип рецепторов относится к Gs связанным белкам. Они усиливают активность аденилатциклазы, что, в конечном счете, приводит к увеличению концентрации цАМФ [51]. Установлено, что дофаминовые рецепторы D1/D5 типа модифицируют зависимую от НМДА-рецепторов долговременную синаптическую пластичность в синапсах поля CA1 у взрослых животных. При этом блокада дофаминовых рецепторов не препятствовала работе НМДА-рецепторов [52]. Таким образом, дофаминовые рецепторы работают в шипиках скоординировано с НМДА-рецепторами [53]. В экспериментах показано, что новая среда фа-силицировала индукцию НМДАР-зависимой ДВП у взрослых животных и данный эффект напрямую зависел от активности дофаминовых рецепторов [54]. Таким образом, можно сделать вывод о том, что дофамин запускает регуляторный контур в функциональной системе зависящего от НМДА-рецепторов изменения эффективности синаптической передачи с положительной обратной связью.

Гормон лептин задействован в регулировании энергетического обмена, секретируется адипоцитами. Концентрация лептина играет роль физиологического сигнала о достаточности энергетических ресурсов организма, и он может проникать через гематоэнцефалический барьер. В течение развития ДВП субъединица GluR1 АМПА-рецепторов подвергается фосфорилированию на двух сайтах S845 протеинкиназой А и S831 протеинкиназой С (РКС) [46]. Лептин через свой рецептор запускает цепь молекулярных реакций, в результате которых пролонгируется активность РКС [55]. Таким образом, лептин также обеспечивает петлю положительной регуляции ДВП, опосредуя увеличение плотности GluR1-АМПА-рецепторов в зоне синаптических контактов.

Таким образом, в дендритном шипике может быть сформирована функциональная система, ориентированная на принятие решения о значимости матрицы сигналов и закреплении этого решения в изменении эффективности сенсорного входа нейрона путем изменения плотности АМПА-рецепторов. Можно предположить следующую последовательность событий:

1. Медиаторный сигнал от пресинаптической клетки (глутамат).
2. Активирование GluR2/3.
3. Деполяризация синаптической мембраны.
4. Активирование НМДА-рецепторов (в присутствии глутамата и других сигнальных молекул, агонистов, в частности, глицина).
5. Вход ионов кальция
6. Активирование ключевых протеинкиназ/фосфатаз, малых ГТФаз и пр.
7. Ремоделирование цитоскелета шипика в зоне синапса, выведение из зоны синапса GluR2/3 и их эндоцитоз, введение в зону синапса АМПА-рецепторов с субъединицей GluR1.

8. Ускорение экзоцитоза АМПА-рецепторов и их встраивания в мембрану.

9. Формирование новой плотности АМПА-рецепторов.

При этом комплекс пришедших сигналов должен быть достаточным для деполяризации синаптической мембраны и активирования НМДА-рецепторов, дирижирующих запуском регуляторных каскадов, которые, с одной стороны, обеспечивают проведение сигнала по мембране дендрита к телу клетки и далее к аксону, а с другой – меняют плотность АМПА-рецепторов. При этом через пути сигнальной трансдукции сигнал передается в дендрит и сому, что в конечном итоге регулирует транскрипцию в ядре и, вероятно, может определять долговременное поддержание эффективности сенсорного входа к опознанию матрицы сигналов приходящих на данный синапс, к прогнозированию дальнейших сигналов и принятию решения о выборе реакции.

Заключение

Таким образом, для успешного решения задач реинженеринга, создания новых архитектур информационных устройств, коррекции работы биологических систем при патологиях представляется необходимым формирование новой концепции работы БИС, основанной на понимании физической сущности и эволюционных истоков возникновения базовых свойств мозга как биологической информационной системы. При этом создание моделей простых биологических информационных систем возможно путем формирования алгоритмов логических устройств, реализующих негэнтропийный принцип. Конструирование из таких устройств систем более высоких уровней можно вести опираясь на знания об эволюции биосистем. По сути, моделируя эволюцию в направлении известном из истории этого процесса. Возможность создания теории устойчивости таких систем за счет информационных прогностических процессов, их моделей на данном этапе обусловлена существующим огромным массивом аналитических материалов, требующих теоретико-экспериментального анализа и конвергенции от уровня разрозненных данных к уровню знаний, теорий и комплекса технологий— складывание паззла теории (знаний) из мозаики данных. При этом, учитывая преемственность принципов и свойств биологических систем от уровня к уровню, законов эмерджентности, создание модели молекулярноинформационной организации базовых систем (клеточный уровень) позволит в значительной мере применять ее и для анализа систем на более высоких уровнях. Принципы, возникшие на молекулярном уровне при формировании молекулярных негэнтропийных прогностических систем, остаются неизменными, а функциональные возможности увеличиваются благодаря их объединению в клеточные ансамбли,

за счет количественного наращивания таких элементов. При этом внутри более сложно организованных ансамблей могут формироваться системы различной функциональной направленности. Одной из функций таких клеток или их ансамблей может быть моделирование и контроль работы всей системы в целом, т. е. выполняющих функции, подобные сознанию [56]. Можно надеяться, что проблема эволюционного построения концепции общей теории крупномасштабных информационных систем путем их самоорганизации может быть решена при реальных затратах усилий, ресурсов и времени.

Общая концепция работы БИС, как в свое время, например, формирование представлений о молекулярной основе передачи генетической информации, не являясь решением всех проблем, позволит целенаправленно решать базовые задачи бионейроинформатики.

Разработка новой парадигмы, естественно, требует дальнейших исследований и конвергенции усилий специалистов из широкого круга областей науки, интеграции гуманитарных и естественнонаучных подходов в изучении информационных процессов в биологических системах.

Литература

1. *Schrodinger E.* What is life. The physical aspect of the living cell. – Cambridge University Press, 1944. – 92 pp.
2. *Brillouin L.* Science and information theory. – Academic Press, 1962. – 351 pp.
3. *Крушинский А.* Плата за решение задачи: биофизические предпосылки и возможные эволюционные последствия // Российский журнал когнитивной науки. -2015.-Т. 2, № 1.-С. 52-61.
4. *Caporale N, Dan Y.* Spike timing-dependent plasticity: a Hebbian learning rule // Annual Review of Neuroscience. – 2008. – v. 31. – pp. 25-46.
5. *Лен Ж.-М.* Супрамолекулярная химия: концепции и перспективы / Пер. с англ. Е. В. Болдыревой. – Новосибирск: Наука, 1998. -334 с.
6. *Andrew R.H., Beatriu E., Juan F.M., David K.S.* High-tech applications of selfassembling supramolecular nanostructured gel-phase materials: from regenerative medicine to electronic devices// Angew. Chem. Int. Ed. – 2008. – v. 47. – pp. 8002- 8018.
7. *Анохин П. К.* Опережающее отражение действительности И Вопр. философии. – 1962.- №6.-С.97-109.
8. *Хованский А. Г.* Топологическая теория Галуа. Разрешимость и неразрешимость уравнений в конечном виде. – М.: Изд-во МЦНМО, 2008. – 296 с.
9. *Hebb D. O.* The organization of behavior. – New York: Wiley & Sons, 1949. – 335 pp.
10. *De Bo G., Leigh D A.* A molecular machine mimicking the ribosome: a molecule that makes molecules // Med. Sci. Paris. – 2013. – v. 29, No. 5. – pp. 452-454.
11. *Root-Bernstein M., Root-Bernstein R.* The ribosome as a missing link in the evolution of life // J. Theoretical Biology. – 2015. – v. 367. – pp. 130-158.
12. *Alkon D.L., Nelson T.J., Zhao W., Cavallaro S.* Time domains of neuronal Ca²⁺ signaling and associative memory: steps through a calyculin, ryanodine receptor, K⁺ channel cascade // Trends Neurosci. – 1998. – v. 12. – pp. 529-537.

13. Kasai H., Fukuda M., Watanabe S., Hayashi-Takagi A., Noguchi J. Structural dynamics of dendritic spines in memory and cognition // Trends. Neurosci. – 2010. v.33, No.3.-pp. 121-129.
14. Boyer C., Schikorski T, Stevens C. F. Comparison of hippocampal dendritic spines in culture and in brain // J. Neurosci. – 1998. – v. 18, No. 14. – pp. 5294-5300.
15. Harris K.M., Stevens J.K. Dendritic spines of CA 1 pyramidal cells in the rat hippocampus: serial electron microscopy with reference to their biophysical characteristics // J. Neurosci. – 1989. – No. 9. – pp. 2982-2997.
16. Yang G., Pan F., Gan W.B. Stably maintained dendritic spines are associated with lifelong memories // Nature. – 2009. – v. 462, No. 7275. – pp. 920-924.
17. Kasai It., Matsuzaki M., Noguchi J., Yasumatsu N, Honkura N. Structure-stability- function relationships of dendritic spines // Trends. Neurosci. – 2003. – v. 26, No. 7. pp. 360-368.
18. Smrt R., Zhao X. Epigenetic regulation of neuronal dendrite and dendritic spine development // Front. Biol. – 2010. – v. 5, No. 4. – pp. 304-323.
19. Paoletti P. Bellone C» Zhou Q. NMDA receptor subunit diversity: impact on receptor properties, synaptic plasticity and disease H Nat. Rev. Neurosci. – 2013. – v. 14, No. 6. pp. 383-400.
20. Lau C. G., Zukin R. S. NMDA receptor trafficking in synaptic plasticity and neuropsychiatric disorders // Nature Rev. Neurosci. – 2007. – v. 8, No. 6. – pp. 413— 426.
21. Traynelis S. F., Wollmuth L. P, McBain C. J., Menniti F. S., Vance K. M., Ogden K. K., Hansen K. B., Yuan H, Myers S. J., Dingledine R. Glutamate receptor ion channels: structure, regulation and function // Pharmacol. Rev. – 2010. – v. 62, No. 3. pp. 405-496.
22. Nowak L., Bregestovski P, Ascher P, Herbet A., Prochiantz A. Magnesium gates glutamate-activated channels in mouse central neurons // Nature. – 1984. – v. 307, No. 5950. – pp. 462-465.
23. Сергеев П.В., Шимановский Н.Л., Петров В. И. Рецепторы физиологически активных веществ: монография. – Волгоград: Семь ветров, 1999. – 640 с.
24. Husi H, Grant S. G. Isolation of 2000-kDa complexes of N-methyl-D-aspartate receptor and postsynaptic density 95 from mouse brain // J. Neurochem. – 2001. – v. 77. -pp. 281-291.
25. Chen X., Winters C., Azzam R., Li X, Galbraith J. A., Leapman R.D., Reese T.S. Organization of the core structure of the postsynaptic density // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. – 2008. – v. 105, No. 11. – pp. 4453-4458.
26. Raghuram V., Sharma Y., Kreutz M. R. Ca(2+) sensor proteins in dendritic spines: a race for Ca(2+) // Front. Mol. Neurosci. – 2012. – v. 5. – p. 61.
27. Newpher T. M., Ehlers M. D. Glutamate receptor dynamics in dendritic microdomains // Neuron. – 2008. – v, 58, No. 4. – pp. 472-497.
28. Nagasawa M., Sakimura K., Mori K. J., Bedell M. A., Copeland N. G., Jenkins N. A., Mishina M. Gene structure and chromosomal localization of the mouse NMDA receptor channel subunits // Brain. Res. Mol. Brain. Res. – 1996. – v. 36, No. 1. – pp. 1-11.
29. Collins M. O., Ilusi II., Yu L., Brandon J. M., Anderson C. N, Blackstock W. P, Choudhary J. S., Grant S. G. Molecular characterization and comparison of the components and multiprotein complexes in the postsynaptic proteome // J. Neurochem. – 2006. – v. 97. – pp. 16-23.
30. Проскура А. Л, Вечканова С. О., Запара Т.А., Ратушняк А.С. Реконструкция молекулярного интерактома в системе глутаматных синапсов И Вавиловский журнал генетики и селекции. – 2014. – Т. 18, №4-3. – С. 1205-1218.
31. Wenthold R.J., Petralia R.S., Blahos J. II, Niedzielski A.S. Evidence for multiple AMPA receptor complexes in hippocampal CA1/CA2 neurons // J. Neurosci. – 1996. -v. 16, No. 6,-pp. 1982-1989.

32. *Shepherd J. D., Huganir R. L.* The cell biology of synaptic plasticity: AMPA receptor trafficking // *Annu. Rev. Cell. Dev. Biol.* – 2007. – No. 23. – pp. 613-643.
33. *Opazo P, Choquet D.* A three-step model for the synaptic recruitment of AMPA receptors // *Mol. Cell Neurosci.* – 2011. – v. 46, No. 1. – pp. 1-8.
34. *Martin S. J., Grimwood P. D., Morris R. G.* Synaptic plasticity and memory: an evaluation of the hypothesis H *Annu. Rev. Neurosci.* – 2000. – v. 23. – pp. 649-711.
35. *Passafaro M., Piech V, Sheng M.* Subunit-specific temporal and spatial patterns of AMPA receptor exocytosis in hippocampal neurons H *Nat. Neurosci.* – 2001. – v. 4, No. 9. – pp. 917-926.
36. *Miyamoto E.* Molecular mechanism of neuronal plasticity: induction and maintenance of long-term potentiation in the hippocampus // *J. Pharmacol. Sci.* – 2006. – v. 100, No. 5. – pp. 433-442.
37. *Lujan R., Roberts J.D., Shigemoto R., Ohishi H., Somogyi P* Differential plasma membrane distribution of metabotropic glutamate receptors mGluR1 alpha, mGluR2 and mGluR5, relative to neurotransmitter release sites // *J. Chem. Neuroanat.* – 1997. -v. 13, No. 4.-pp. 219-241.
38. *Cai W., Hisatsune C., Nakamura K., Nakamura T, Inoue T, Mikoshiba K.* Activity-dependent expression of inositol 1,4,5-trisphosphate receptor type 1 in hippocampal neurons // *J. Biol. Chem.* – 2004. – v. 279, No. 22. – pp. 23691-23698.
39. *Maher B.J., Mackinnon R.L. 2nd, Bai J., Chapman E.R., Kelly P. T.* Activation of postsynaptic Ca(2+) stores modulates glutamate receptor cycling in hippocampal neurons // *J Neurophysiol.* – 2005. – v. 93, No. 1. – pp. 178-188.
40. *TuH., TangT.S., Wang Z.* Association of type 1 inositol 1,4,5-trisphosphate receptor with AKAP9 (Yotiao) and protein kinase A // *J. Biol. Chem.* – 2004. – v. 279, No. 18. -pp. 19375-19382.
41. *TuJ. C., Xiao B., Naisbitt S., Yuan J. P, Petralia R. S., Brakeman P, Doan A., Aakalu V. K., Lanahan A. A., Sheng M., Worley P. F.* Coupling of mGluR/Homer and PSD-95 complexes by the Shank family of postsynaptic density proteins // *Neuron.* – 1999. v. 23, No. 3. – pp. 583-592.
42. *Shiraishi-Yamaguchi Y, Sato Y, Sakai R., Mizutani A., Kn?pfe T, Mori N, Mikoshiba K., Furuichi T.* Interaction of Cupidin/Homer2 with two actin cytoskeletal regulators, Cdc42 small GTPase and Drebrin, in dendritic spines // *BMC Neurosci.* – 2009. – v. 10.-p.25.
43. *Petrini E. M., Lu J., Cognet L., Lounis B., Ehlers M. D., Choquet D.* Endocytic trafficking and recycling maintain a pool of mobile surface AMPA receptors required for synaptic potentiation // *Neuron.* – 2009. – v. 63, No. 1. – pp. 92-105.
44. *lu J., Helton T. D., Blanpied T.A., R?cz B., Newpher T. M., Weinberg R.J., Ehlers M. D.* Postsynaptic positioning of endocytic zones and AMPA receptor cycling by physical coupling of dynamin-3 to Homer // *Neuron.* – 2007. – v. 55, No. 6. – pp. 874-889.
45. *Jaskolski F, Martin S., Henley J. M.* Retaining synaptic AMPARs // *Neuron.* – 2007. v. 55, No. 6. – pp. 825-827.
46. *Lee H.K., Barbarosie M., Kameyama K., Bear M.F., Huganir R. L.* Regulation of distinct AMPA receptor phosphorylation sites during bidirectional synaptic plasticity // *Nature.* – 2000. – v. 405, No. 6789. – pp. 955-959.
47. *Kim M., Park A. J., Havekes R., Chay A., Guercio L.A., Oliveira R.F, Abel T, Blackwell K. T.* Colocalization of protein kinase A with adenylyl cyclase enhances protein kinase A activity during induction of long-lasting long-term-potentiation // *PloS. Comput. Biol.* – 2011. – v. 7, No. 6. – p. e1002084.

48. Davidson H. T, Xiao J., Dai R., Bergson C. Calcyon is necessary for activity- dependent AMPA receptor internalization and LTD in CA1 neurons of hippocampus // Eur. J. Neurosci. – 2009. – v. 29, No. 1. – pp. 42-54.
49. Arevalo J. C., Yano H., Teng K. K., Chao M. A unique pathway for sustained neurotrophin signaling through an ankyrin-rich membrane-spanning protein // EMBO J. 2004. – v. 23, No. 12. – pp. 2358-2368.
50. Arevalo J. C., Pereira D.B., Yano M., Teng K.K., Chao M. V. Identification of a switch in neurotrophin signaling by selective tyrosine phosphorylation // J. Biol. Chem. -2006. -v. 281, No. 2. – pp. 1001-1007.
51. Sunahara R. K., Guan H. C, O'Dowd B. F., Seeman P, Laurier L. G., Ng G., George S.R., Torchia J., Van Tol H.H., Niznik H.B. Cloning of the gene for a human dopamine D5 receptor with higher affinity for dopamine than D1 // Nature. – 1991. v. 350, No. 6319. – pp. 614-619.
52. Yang S. N. Sustained enhancement of AMPA receptor- and NMDA receptor-mediated currents induced by dopamine D1/D5 receptor activation in the hippocampus: an essential role of postsynaptic Ca²⁺ // Hippocampus. – 2000. – v. 10, No. 1. – pp. 57- 63.
53. Mockett B.G., Cavanaugh D., Williams J.M., Abraham W.C. Dopamine D1/D5 receptor activation reverses NMDA receptor-dependent long-term depression in rat hippocampus // J. Neurosci. – 2007. – v. 27, No. 11. – pp. 2918-2926.
54. Li S., Cullen W.K., Anwyl R., Rowan M.J. Dopamine-dependent facilitation of LTP induction in hippocampal CA1 by exposure to spatial novelty // Nat. Neurosci. – 2003. – v. 6, No. 5. – pp. 526-531.
55. Moulton P. R., Cross A., Santos S. D., Carvalho A. L., Lindsay Y., Connolly C. N., Irving A. J., Leslie N. R., Harvey J. Leptin regulates AMPA receptor trafficking via PTEN inhibition// J. Neurosci. -2010. – v. 30, No. 11. -pp. 4088 – 4101.
56. Reardon S. A giant neuron found wrapped around entire mouse brain // Nature. – 2017. – v. 543, No. 7643. – pp. 14-15.

**PHYSICAL BASIS OF FUNCTIONING
AND EVOLUTIONARY
ORIGINS OF BIOLOGICAL INFORMATION SYSTEMS**

**E. D. SOROKOUMOV¹⁻², A. L. PROSKURA¹, T. A. ZAPARA¹,
A. S. RATUSHNYAK¹⁻³**

¹ The Institute of Computational Technologies of SB RAS, Novosibirsk

*² The Federal research center Institute of cytology and genetics SB RAS, Novosibirsk,
Russian Federation*

³ Novosibirsk National Research University

E-mail: Ratushniak.Alex@gmail.com

Attempts to create a theory of the work of the brain, due to their fragmentation, have not yet led to fundamentally significant results. To understand the principles and mechanisms of the operation of such a biological information system, it is probably necessary to proceed from the evolutionary origins and physical foundations of the existence of negentropic systems. With this approach, the level of complexity of the task becomes commensurate with existing theoretical and experimental capabilities. Given the structural and functional similarity of systems from the molecular level to the level of the whole brain, one can hope for the effectiveness of this approach. In this study, an attempt has been made to create a paradigm of the operation of biological information systems based on combining the existing data mosaic.

АКТУАЛЬНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПРОШЛЫХ ЛЕТ

Э. Мах

Популярные лекции по физике*

О волокнах Корти в ухе¹

Кто часто путешествовал, тот знает, что чем больше мы путешествуем, тем сильнее становится наша страсть к путешествиям. Какой прекрасный вид должен открываться на эту лесистую долину вон с того холма! Куда убегает этот светлый ручей, скрывающийся вон там в тростнике? Какой вид открывается там, за той горой, хотелось бы знать? Так размышляет ребенок,

* Печатается по изданию Мах Э. Популярные лекции по физике // НИЦ Регулярная и хаотическая динамика, Ижевск, 2001, 128 стр.

¹ Популярная лекция, прочитанная в 1864 году в Граце.

которому впервые приходится совершать какую-нибудь поездку. То же самое испытывает и естествоиспытатель.

Первые вопросы возникают в уме исследователя под действием практических соображений, но последующие – нет. К ним влечет уже неодолимая сила, интерес более благородный, выходящий далеко за пределы материальных потребностей. Рассмотрим один специальный случай.

Уже с давних пор привлекает к себе внимание анатомов устройства органа слуха. Их работе обязаны мы изрядным количеством важных открытий, ими был установлен целый ряд фактов и истин. Но вместе с этими фактами появлялся ряд новых удивительных загадок.

Учение об организации и устройстве различных частей глаза разработано уже до большой сравнительной ясности. Развитие учения о лечении глаза тоже достигло ступени, о которой в XVIII столетии едва смели мечтать, и врач при помощи глазного зеркала может рассмотреть всю внутреннюю поверхность глаза. В другом положении теория уха: здесь приходится констатировать мрак столь же таинственный, сколь притягательный для научного исследователя.

Посмотрите-ка на эту модель уха! Посмотрите на эту знакомую всем часть ее, по величине которой люди судят об уме человека, т. е. на ушную раковину. Вот здесь уже начинаются загадки! Вот ряд порой очень изящных извилин, значение которых не поддается точному определению. А между тем, существуют же они здесь для чего-то!

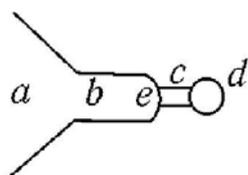


Рис. 1

Из ушной раковины (*a* в нашей схеме) звук направляется в многократно изогнутый слуховой проход *b* конец которого замыкается перепонкой, так называемой барабанной перепонкой *e*. Звук приводит ее в движение, которое передается далее ряду небольших, удивительно устроенных косточек (*c*). В конце находится лабиринт (*d*). Он состоит из нескольких наполненных жидкостью полостей, в которых лежат бесчисленные волокна слухового нерва. Колебанием косточек с приводится в сотрясение жидкость лабиринта и слуховой нерв раздражается. Тогда начинается процесс слуха. Вот все, что установлено наукой. Что же касается подробностей, то здесь множество неразрешенных еще вопросов.

Ко всем этим загадкам *А. Корти* в 1851 году прибавил еще одну. И – странное дело – именно эта загадка, по всей вероятности, нашла первое правильное решение. Вот об этом у нас и будет речь сегодня.

Корти нашел в улитке, одной части лабиринта, большое число микроскопических волокон, расположенных рядом наподобие скалы с геометрической почти правильностью. *Келликер* насчитал до 3 000 таких волокон. Занимались исследованиями их также *Макс Шульце* и *Дейтерс*.

Я не буду останавливаться на описании подробностей, так как это только затруднило бы вас, не внося в дело большей ясности. Скажу, поэтому, только коротко, что, по мнению таких выдающихся естествоиспытателей, как *Гельмгольц* и *Фехнер*, является в этих волокнах существенным. В улитке находится, по-видимому, большое число упругих волокон постепенно укорачивающейся длины (см. рис. 2), на которых покоятся разветвления слухового нерва. Очевидно, что эти волокна *Корти* неравной длины должны обладать и упругостью неравной, а потому и должны быть настроены на разные тоны. Улитка, следовательно, есть своего рода пианино.

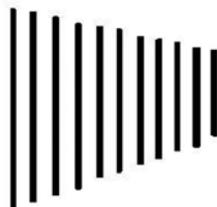


Рис. 2

Для чего может пригодиться такой аппарат, подобного которому нет ни в одном другом органе чувств? Не состоит ли он в связи с какой-нибудь столь же своеобразной особенностью уха? Такая особенность действительно существует. Вы знаете, конечно, что в симфонии можно проследить тот или другой из голосов в отдельности. Даже в баховской фуге это еще возможно, а это ведь уже трудная вещь. В гармонии, как и в величайшей путанице звуков, наше ухо способно различить отдельные тоны. Музыкальное ухо анализирует всякую смесь тонов. В глазе мы аналогичной способности не находим. Кто мог бы, например, рассмотреть в белом свете (не узнав это путем физического эксперимента), что он есть цвет сложный, составленный из целого ряда цветов? И вот существует ли, действительно, связь между этими двумя вещами, названным свойством уха и аппаратом его, открытым *Корти*? Это весьма вероятно. Загадка разрешается, если мы принимаем, что каждому тону определенной высоты соответствует специальное волокно в ушном пианино *Корти*, а следовательно, и специальное, покоящееся на нем разветвление нерва.

Чтобы иметь возможность дать вам весьма ясное представление об этом, я попрошу вас сделать со мной несколько шагов в сухую область физики.

Посмотрите на маятник. Выведенный из состояния равновесия толчком, например, он начинает качаться в определенном такте, зависящем от его длины. Более длинные маятники качаются медленнее, более короткие – быстрее. Пусть ваш маятник совершает одно полное колебание (т. е. в одну и противоположную сторону) в одну секунду.

Маятник легко может быть приведен в сильное колебательное движение двояким образом: или сильным внезапным ударом, или рядом небольших толчков, сообщаемых в соответственном порядке. Пусть, например, маятник находится в положении равновесия, и мы сообщаем ему очень небольшой толчок. Он сообщает тогда очень небольшое колебание. Когда он по истечении одной секунды в третий раз проходит через положение равновесия, мы снова сообщаем ему очень небольшой толчок в направлении первого толчка. По истечении второй секунды, при пятом прохождении через положение равновесия мы снова сообщаем ему очень небольшой толчок и т. д. Вы видите, что при такой операции наши толчки будут усиливать существующее уже движение маятника.

После каждого небольшого толчка размах колебаний становится больше и, наконец, движение становится очень велико¹.

Но это удастся нам не всегда, а только тогда, когда мы сообщаем маятнику толчок в том же такте, в котором он сам стремится качаться. Если бы мы, например, сообщали маятнику второй толчок по истечении полсекунды и в направлении первого толчка, то он действовал бы в направлении, противоположном движению маятника. Вообще не трудно заметить, что движение маятника тем более усиливается, чем более такт наших небольших толчков приближается к такту маятника. Если же такт толчков не совпадает с тактом качания маятника, то в один момент они усиливают его качания, но в другой задерживают его. В общем и целом, эффект бывает тем меньше, чем более движение нашей руки не совпадает с движением маятника².

То, что мы сказали о маятнике, можно сказать и о всяком теле, совершающем колебательные движения. Звучащий камертон тоже совершает коле-

¹ Этот эксперимент вместе со связанными с ним рассуждениями принадлежит Галилею.

² При более близком рассмотрении процесс оказывается несколько сложнее. Если колебательное движение не встречает ни малейшего сопротивления и сообщаемый нами толчок происходит точно в такт колебания, то размах колебания может возрасти до бесконечности. Если такт сообщаемого движения хотя бы в малейшем не совпадает с продолжительностью колебания маятника, то за периодом усиления, тем более продолжительным, чем меньше эта разница, следует период ослабления равной продолжительности. Эта смена усиления и ослабления повторяется много раз, что легко поддается наблюдению, если при помощи камертона, приводимого в колебательное движение электричеством, вызвать колебания в другом камертоне, несколько иначе настроенном. Чем меньше разница между ними, тем дольше продолжается фаза усиления и тем большего размаха может достичь второй камертон. 1902.

бательные движения. Движение это бывает тем быстрее, чем выше тон его, и тем медленнее, чем он ниже. Наш камертон настроена на тон А, совершает 450 колебаний в секунду.

Я ставлю рядом на стол два совершенно одинаковых камертона, снабженных для резонанса соответственными деревянными коробками. Я сообщаю одному из них сильный удар рукой, чтобы заглушить тон. Тем не менее вы совершенно явственно продолжаете слышать тот же тон. Дотронувшись до второго камертона, вы можете убедиться в том, что вибрирует именно он, хотя он толчка не получал.

Я приклеиваю теперь немного воску к ножке одного камертона. От этого он расстраивается и тон его становится немного ниже. Повторяю тот же эксперимент с двумя камертонами неравной уже высоты, т. е. ударяю один камертон и сейчас же схватываю его рукой. Как только я прикасаюсь к нему, тон сейчас же замирает.

Как же объясняются эти два опыта? Очень просто? Вибрирующий камертон сообщает воздуху 450 толчков в секунду. Эти толчки через воздух сообщаются второму камертону. Если этот последний настроен на тот же тон, т. е. если он, будучи приведен в движение отдельно, колеблется в том же такте, то достаточно первых толчков, как бы малы они не были, чтобы увлечь его в такое же сильное колебательное движение. Но этого не бывает, раз только такт колебаний обоих камертонов несколько различен. Сколько бы камертонов ни звучало, камертон, настроенный на тон А, не будет отзываться ни на один тон, кроме собственного или очень близких к нему тонов. Вы можете привести в движение одновременно 3, 4, 5, ... камертонов, ваш камертон будет отзываться только тогда, когда среди них будет камертон, настроенный на тон А. Таким образом, среди звучащих тонов он выбирает тот, который ему соответствует.

То же самое можно сказать обо всех телах, способных звучать. Когда вы играете на пианино, то стоит вам взять определенные тоны, чтобы зазвучали чайные сервизы или оконные стекла. Аналогичное этому явление можно найти в других областях. Представьте себе собаку, откликающуюся на имя Филакс. Собака лежит под столом. Вы говорите о Геркулесе и Платоне, называете имена всех героев, которые только приходят вам в голову. Собака не трогается с места, хотя очень легкое движение уха указывает, что она следит сознательно за вашей речью. Но стоит вам назвать имя Филакс, чтобы она бросилась к вам с радостным лаем. Камертон похож: на собаку: он отзывается на имя А.

Вы улыбаетесь, сударыни! Вы делаете недовольную гримасу: вам не нравится эта картина! Я готов вам показать и другую. Выслушайте же меня в наказание. И с вами дело обстоит не лучше, чем с камертоном. Множество сердец бьется вам навстречу. Вы не обращаете на это никакого внимания, вы остаетесь холодны. Но это не поможет вам, настанет когда-нибудь час воз-

мездия. Явится когда-нибудь сердце, бьющееся в нужном ритме, тогда и ваш час пробьет. И ваше сердце, захотите вы этого или нет, начнет биться с ним в унисон. Эта картина по крайней мере не совсем нова, ибо и древним уже, как уверяют филологи, была знакома ... любовь.

В применении к телам, которые сами звучать не могут, этот закон, установленный для звучащих тел, должен быть подвергнут некоторым изменениям. Такие тела отзываются почти на каждый тон, но гораздо слабее. Цилиндр, один из наших головных уборов, как известно, не звучит. Но если вы во время концерта держите свой цилиндр в руках, то вы можете всю симфонию не только прослушать, но и почувствовать в пальцах. Это – как и у нас, людей. Кто сам может задавать тон, тот мало заботится о том, что говорят другие. Человек же бесхарактерный ко всему присоединяется, во всем участвует, и в обществе трезвости, и в попойках – везде, где образуется собрание. Цилиндр же среди колоколов – то же, что бесхарактерный среди людей с характером¹.

Пусть на каком-нибудь музыкальном инструменте раздастся аккорд с *e d*. Каждый из стержней будет прислушиваться, не содержится ли в этом аккорде собственный его тон, и, найдя его, отзовется и будет звучать вместе с ним. Стержень с сейчас же отзовется, следовательно, тоном *c*, стержень *e* – тоном *e*, стержень *d* – тоном *d*. Все остальные стержни останутся в покое и звучать не будут.

Итак, тело, способное звучать, отзывается всякий раз, как только раздается собственный его тон – один или вместе с другими тонами. Сделаем теперь еще один шаг дальше. Что будет, если мы соединим в одну группу ряд способных звучать тел, высоты тонов которых образуют некоторую скалу? Представьте себе, например, ряд стержней или струн (рис. 3), настроенных на тоны *c d e f d*



Рис. 3

¹ Если колебаниям приходится преодолевать какое-нибудь сопротивление, то это, последнее по истечении некоторого времени, тем более короткого, чем больше сопротивление, уничтожает не только движения самого колебания, но и действия импульсов. Влияние прошлого исчезает тем быстрее, чем больше сопротивление. Таким образом, усиление действия импульсов бывает вообще ограничено более или менее коротким временем. Но и влияние разности колебаний, тоже основанное на сложении во времени, может оказаться заметным толчком в более слабой степени 1902.

Долго искать такой инструмент, какой мы себе здесь вообразили, нам не придется. Каждое пианино есть такой аппарат, на котором можно самым наглядным образом воспроизвести описанный здесь эксперимент. Мы устанавливаем рядом два одинаково настроенных пианино. На одном мы вызываем некоторые тоны, а другое заставляем отзываться, приподняв демпфер и дав таким образом струнам возможность колебаться.

Каждая гармония, взятая на первом пианино, ясно звучит на втором. Покажем теперь, что на втором пианино отзываются те самые струны, которые были приведены в движение на первом, для чего мы несколько видоизменим наш эксперимент. Опустив и на втором пианино демпфер, мы держим на нем только клавиши *c e g a* на первом быстро берем *c e g*. Гармония *c e g* звучит теперь и на втором пианино. Но если мы на одном держим только клавишу *g*, а на втором берем *c e g*, то отзывается только *d*. Отсюда ясно, что вызвать друг друга могут только одинаковым образом настроенные струны обеих пианино.

Пианино может воспроизвести всякий звук, сложенный из его музыкальных тонов. Так, например, оно очень ясно воспроизводит пропетый перед ним гласный звук. И действительно, и в физике доказывается, что гласные могут быть составлены из простых музыкальных тонов.

Вы видите, что вызванные в воздухе определенные тоны вызывают на пианино с механической необходимостью вполне определенные движения. Этим можно пользоваться для кое-каких интересных фокусов. Представьте себе ящичек, в котором натянута струна, издающая тон определенной высоты. Стоит пропеть или просвистеть этот тон, чтобы она пришла в движение. При современном состоянии механики совсем не трудно устроить ящичек так, чтобы струна, придя в колебательное движение, замыкала гальваническую цепь и открывала замок. Столь же нетрудно было бы устроить ящичек так, чтоб он открывался на свист определенной мелодии. Одно волшебное слово и падают запоры! Вот и новый волшебный замок, еще одна часть того мира древности, из которого столь много уже в наше время воплощено в действительности, того сказочного мира, что нам снова недавно напомнил телеграф *Казелли*, с помощью которого можно прямо писать вдаль собственным почерком. Что сказал бы по поводу всех этих вещей добрый старый *Геродот*, который уже в Египте по поводу многого только головой покачивал? – «*εμοι μενον πιτα*», («мне трудно поверить»), сказал бы он столь же чистосердечно, как и тогда, когда ему рассказывали о путешествии вокруг Африки.

Новый волшебный замок! Зачем же изобретать его? Разве сам человек не есть такой замок? Какие мысли, чувства, ощущения не пробуждает в нем порой одно только слово! Есть же у каждого человека свой период, когда одного имени достаточно, чтобы заставить усиленно биться его сердце. Кто

бывал на народных собраниях, тот знает, какую огромную работу, какое движение могут вызвать невинные слова: свобода, равенство, братство!

Вернемся, однако, к более серьезному предмету нашей беседы. Рассмотрим еще раз наше пианино или какой-нибудь другой аппарат, на него похожий. Что делает такой инструмент? Всякую смесь тонов, раздающуюся в воздухе, он, очевидно, анализирует, разлагает на отдельные тоны и каждый из этих последних воспринимает *Другой* струной: он производит настоящий спектральный анализ звука. Даже совершенно глухой мог бы при помощи пианино, прикасаясь пальцами к струнам или наблюдая колебания их в микроскоп, сейчас же исследовать происходящие в воздухе движения звука и указать отдельные тоны.

Наше ухо обладает теми же свойствами, что и пианино. Оно делает для нашей души тоже, что пианино для уха глухого. Без уха душа глуха. Глухой же вместе с пианино до известной степени вовсе не глух, хотя слышит, конечно, гораздо хуже и с большим трудом, чем не глухой. И наше ухо разлагает звук на тоны, из которых он состоит. Я вряд ли ошибусь, если предположу, что вы догадываетесь уже о роли, которую играют при этом кортиевы волокна. Мы можем представить себе это дело довольно просто. Воспользуемся одним пианино для возбуждения тонов, а второе представим себе находящимся в ухе наблюдателя, на месте кортиевых волокон, которые, по всей вероятности, представляют собой подобный аппарат. Вообразим себе, что на каждой строке пианино покоится в ухе особое волокно слухового нерва и притом так, что, когда эта струна приходит в движение, то раздражается только это волокно. Возьмем на первом пианино какой-нибудь аккорд. На каждом тоне его отзывается определенная струна второго, внутреннего пианино и раздражается столько различных волокон, сколько содержится тонов в аккорде. Одновременные впечатления, исходящие от различных тонов, могут сохраняться таким образом, не смешиваясь, и при достаточном внимании могут быть отделены друг от друга. Дело здесь происходит так, как с пятью пальцами руки: каждым из них вы можете осязать что-нибудь другое.

Ухо имеет до 3 000 тысяч таких пальцев и каждый из них предназначен для осязания другого тона¹. Наше ухо есть волшебный замок упомянутого выше рода. Достаточно волшебного пения одного какого-нибудь рода, чтобы оно открылось. Но то замок довольно замысловатый. Не один только тон, но и каждый тон заставляет его открываться, только каждый делает это иначе. На каждый тон он реагирует другими ощущениями.

История науки знает немало примеров, когда теория предсказывала какое-нибудь явление задолго до того, как оно стало доступно наблюдению.

¹ Дальнейшие соображения, выходящие за пределы изложенной здесь мысли Гельмгольца, можно найти в моей книге «Анализ ощущений» (издание второе С. А. Скимунта. — Прим. пер.).

Леверрье сначала открыл существование планеты Нептун и определил его место в мировом пространстве и только впоследствии *Галль* действительно нашел его в указанном месте. Гамильтон теоретически вывел явление так называемого преломления света, но только *ЛлойДу* удалось впервые наблюдать его. И то же самое случилось с теорией Гельмгольца насчет кортиевых волокон: и она нашла существенное подтверждение, по-видимому, в позднейших наблюдениях *Генсена*. Раки имеют на своей поверхности ряды длинных и коротких, толстых и тонких, связанных, вероятно, с слуховыми нервами волосков, соответствующих до известной степени волокнам *Корти*. И вот *Генсену* удалось наблюдать колебательные движения этих волосков в случае возбуждения тонов, причем различные тоны вызывали колебания и различных волосков.

Я сравнил выше деятельность естествоиспытателя с путешествием. Когда вы взбираетесь на новый холм, перед вами открываются новые виды на всю окрестность. Когда исследователю удастся найти решение одной загадки, то он тем самым решил целый ряд других.

Вы часто, надо думать, удивляетесь тому, что когда вы поете гамму и доходите до октавы, вы получаете ощущение какого-то повторения, почти то же самое ощущение, какое вы имели при основном тоне. Явление это находит себе объяснение в вышеизложенном взгляде на ухо. И не только это явление, но и все законы гармонии могут быть обобщены и обоснованы с этой точки зрения с ясностью, о которой до сих пор и не думали. На сегодня я, однако, вынужден ограничиться одним намеком на эти заманчивые, открывающиеся перед нами перспективы: рассмотрение их завело бы нас слишком далеко в другую область знания.

Так и естествоиспытатель должен сделать над собой усилие, чтобы идти своим путем. И его влечет от одного чуда к другому, как путешественника от одной долины к другой, как человека вообще обстоятельства толкают из одного положения жизни в другое. Не столько он сам производит исследование, сколько он подвергается исследованию. Но необходимо дорожить временем! И пусть его взгляд не блуждает повсюду без всякого плана! Ибо вот-вот блеснет вечерняя заря, и не успеет он хорошенько осмотреть еще ближайшее чудо, как его схватит могучая рука и уведет его в ... новое царство загадок.

Наука некогда стояла в другом совершенно отношении к поэзии, чем в настоящее время. Древние математики Индии писали свои теоремы в стихах и в их задачах цвели цветы лотоса, лилии и розы, отражались прелестные ландшафты, горы и озера.

¹ Дальнейшие соображения, выходящие за пределы изложенной здесь мысли Гельмгольца, можно найти в моей книге «Анализ ощущений» (издание второе С. А. Скимунта. — Прим. пер.).

«Ты плывешь в лодке по озеру. Лилия поднимается на один фут над поверхностью воды. Легкий ветерок наклоняет ее, и она скрывается под водой на два фута дальше от прежнего своего места. Скорей, математик, скажи, какова глубина озера?»

Так говорил древний индусский ученый. Эта поэзия исчезла из науки не без основания. Но с сухих листов ее книги веет другой поэзией, которую трудно описать тому, кто никогда не чувствовал ее. Кто хочет вполне насладиться этой поэзией, тот должен сам приняться за работу, должен сам заняться исследованием. А потому довольно! Я почти себя счастливым, если вы не будете раскаиваться в том, что предприняли со мной эту маленькую прогулку в одну из цветущих долин физиологии, и если унесете с собой убеждение, что и о науке можно сказать то же самое, что и о поэзии:

Wer das Dichten will verst ehen,
Muss ins Land der Dichtung gehen;
Wer den Dichter will verstehen,
Muss in Dichters Lande gehen¹.

Принцип сохранения энергии²

В 1847 г. знаменитый физик *Джоуль* прочитал популярную лекцию³, отличающуюся большой простотой и ясностью. Он доказывал в ней, что живая сила, которую получает большое тело при падении с известной высоты и которую оно сохраняет в форме определенной скорости, эквивалентна притяжению на расстоянии пути падения и что было бы «абсурдом» допустить, что эта живая сила может быть уничтожена без восстановления этого эквивалента. Он прибавляет затем: «Вы будете поэтому удивлены, если я скажу вам, что очень недавно еще общее мнение было таково, что живая сила может быть совершенно уничтожена по нашему произволу». Прибавьте сюда, что в настоящее время, по истечении 47 лет, закон сохранения энергии считается во всем культурном мире совершенно неоспоримой истиной и что во всех областях естествознания он находит самое плодотворное применение.

Судьба всех объяснений, имеющих важное значение, очень сходна. При первом своем появлении они большинством людей принимаются за заблуждения. Так, первая работа *Р. Маера* о принципе сохранения энергии (1842 г.) была отвергнута первым немецким физическим журналом, и не лучшая судьба постигла и статью *Гельмгольца* (1847 г.). Даже *Джоуль*, судя по сло-

¹ Кто хочет понять поэзию, тот должен идти в страну поэзии; кто хочет понять поэта, тот должен идти в страну поэта.

² Глава эта есть свободная переработка одной части моего сочинения «Принцип сохранения работы» и впервые была напечатана в журнале «The Monist» vol. 5, стр.22.

³ On Matter, Living Force, and Heat, Joule scientific Papers, London 1884, стр. 256.

вам *Playfair*'а, встречал затруднения в опубликовании первого своего труда (1843 г.). Но постепенно распространяется сознание, что новый взгляд давно уже подготовлен и давно созрел и что только несколько выдающихся умов приняли его раньше других, чем они и вызвали оппозицию большинства. По мере того, как обнаруживается плодотворность нового взгляда, по мере его успехов, растет и доверие к нему. Большинство людей, пользующихся этим взглядом, не может входить в подробное изучение его; оно принимает успех за доказательство основательности. Так может случиться, чтобы воззрение, приведшее к самым выдающимся открытиям, как, например, теория теплоты Блэка, впоследствии в другой области, где оно применено быть не может, послужило помехой прогрессу, делая людей слепыми к фактам, не соответствующим излюбленной теории. Чтобы оградить теорию от такой сомнительной роли, необходимо время от времени подвергать самому тщательному исследованию основания и мотивы ее развития и существования.

Механической работой можно вызвать различные физические изменения (термические, электрические, химические и т.д.). При восстановлении прежних состояний опять получается механическая работа, точно в таком же количестве, какое было необходимо, чтобы вызвать восстановленные потом изменения. В этом заключается *принцип сохранения энергии*. Для обозначения того неуничтожающегося нечто, мерою которого служит механическая работа, мало-помалу вошло в употребление название «энергия»¹. Как же мы пришли к этому? Из каких источников мы почерпнули это познание? Этот вопрос имеет громадный интерес не только сам по себе, но и в силу указанной выше причины.

Мнения о тех основах, на которых покоится закон энергии, в настоящее время еще сильно расходятся. Некоторые сводят принцип сохранения энергии к невозможности *perpetuum mobile*, которую они считают или достаточно доказанной на опыте или даже само собою разумеющееся. В области чистой механики невозможность *perpetuum mobile*, т. е. непрерывного произведения *работы без постоянного, сохраняющегося* изменения, может быть легко доказана. Если, поэтому, исходить из того взгляда, что все физические явления представляют собой только явления механические, движения молекул и атомов, то нетрудно понять, основываясь на этом механическом понимании физики, и невозможность *perpetuum mobile* в области всей физики вообще. Такого мнения в настоящее время придерживается большинство ученых. Другие же исследователи допускают только чисто экспериментальное обоснование закона энергии.

Из дальнейшего будет видно, что на самом деле все затронутые нами моменты участвовали в развитии этого взгляда, но что при этом, кроме того,

¹ Название это, судя по всему, впервые ввел в механику Т. Юнг.

весьма существенную роль играла до сих пор мало обращавшая на себя внимание логическая и чисто формальная потребность.

Принцип исключенного *perpetuum mobile*

Закон энергии в его современной форме не тождественен с принципом исключенного *perpetuum mobile*, но все же стоит с ним в тесной связи. Но этот последний принцип вовсе не нов, потому что в области механики им руководствовались при своих исследованиях величайшие мыслители уже много столетий тому назад. Я позволю себе подтвердить это несколькими историческими примерами:

В своей книге «*Hydrostatica mathematica*» (tom. IV, de Statica, Leyden 1605) на стр. 34 *Стевин* обсуждает вопрос о равновесии на наклонной плоскости. На трехсторонней призме ABC (она представлена в разрезе на рис. 1) с горизонтальной стороной AB висит замкнутая веревка, на которой равномерно распределены 14 равнотяжелых шаров. Так как нижнюю симметричную часть веревки ADC можно мысленно не принимать во внимание, *Стевин* заключает, что четыре шара на AB уравновешивают два шара на AC .

Ибо, будь равновесие в один какой-нибудь момент нарушено, оно не могло бы существовать никогда, веревка должна была бы вращаться всегда в одном и том же направлении, мы имели бы *perpetuum mobile*. «Но будь это так, ряд шаров должен был бы занимать то же положение, что и раньше, по той же причине восемь шаров левых должны были бы быть более тяжелы, чем шесть правых, и, следовательно, эти восемь должны были бы опускаться вниз, а шесть других подниматься вверх, так что все шары совершали бы непрерывное и вечное движение, чего быть не может.»

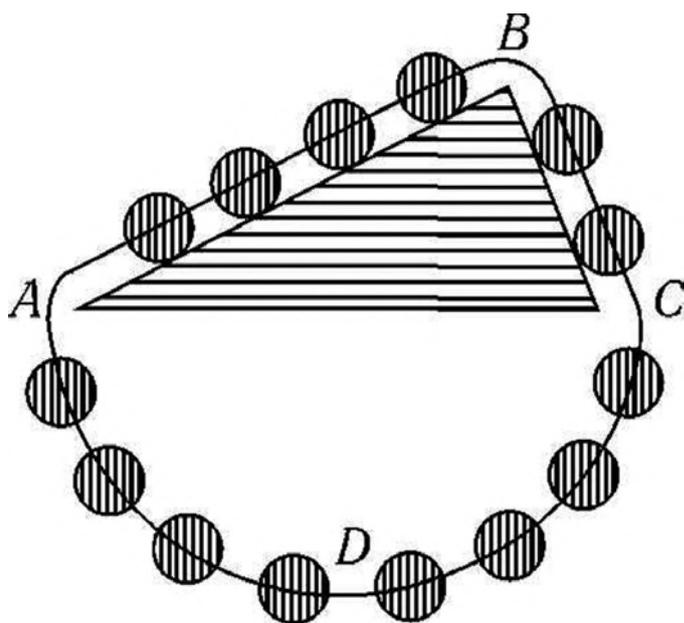


Рис. 1. Призма

Отсюда *Стевин* легко выводит законы равновесия для наклонной плоскости и очень много других плодотворных положений.

В главе «Гидростатика» того же сочинения на странице 114 он выставляет следующее положение:

«Данная масса воды сохраняет свое данное место в воде».

Это положение следующим образом доказывается на фигуре 2:

«Итак, допустим, что *A* (если бы это каким-либо образом могло происходить естественным путем) не сохраняет своего места, а спадает к *D*; следуя за ним, вода по той же причине стекала бы в *D* и отсюда по той же причине стекала бы дальше, так что эта вода (так как везде существует одна и та же причина) представляла бы пример непрерывного движения, что абсурдно.»

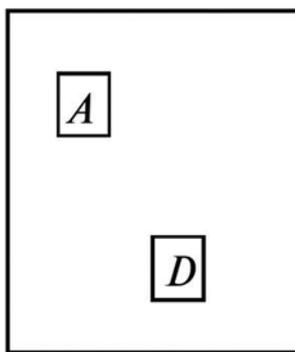


Рис. 2

Отсюда выводятся все положения гидростатики. По этому же поводу *Стевин* впервые развивает ту, столь плодотворную для современной теоретической механики мысль, что от прибавления неподвижных связей равновесие системы не нарушается. Пользуясь этим замечанием, в настоящее время выводят, как известно, правило сохранения центра тяжести, например, из принципа *д'Аламбера*.

Если бы мы захотели в настоящее время воспроизвести демонстрации *Стевина*, то, конечно, должны были бы несколько видоизменить их. Для нас не составляет никакой трудности представлять себе, абстрагируя сопротивления, веревку на призме в бесконечном равномерном движении. Напротив, мы бы возражали против допущения ускоренного движения или также против допущения равномерного движения при неустранимых сопротивлениях. Можно также для большей ясности доказательства цепь шаров заменить тяжелой равномерной бесконечно гибкой веревкой.

Все это не изменяет ничего в историческом значении исследований *Стевина*. Факт в том, что *Стевин* выводит из принципа невозможности *perpetuum mobile* истины, по-видимому, гораздо более простые.

В ходе идей, который приводит *Галилея* к его открытиям, значительную роль играет положение, что с достигнутой в своем падении скоростью тело

Представьте себе, что этот лист – вертикальная стена и что на гвозде, прикрепленном к ней, подвешен перпендикулярно к горизонту на тонкой нити AB длиной в 2-3 локтя свинцовый шарик весом в 1-2 унции. На стене проведите горизонтальную линию DC под прямым углом к перпендикуляру AB , который отстоит, допустим, от стены на два дюйма. Переместите потом нить AB с шариком в положение AC и оставьте шарик в покое (см. рис. 3). Вы увидите, что он опишет дугу CBD и настолько перейдет точку B , что, описав дугу BD , почти поднимется до линии CB , опоздав только на маленький кусок, так как точному прибытию к этому пункту мешает сопротивление воздуха и нити. Отсюда мы можем с большой правдоподобностью заключить, что импульс, полученный при падении шарика в точке B при прохождении дуги CB достаточен, чтобы заставить шарик подняться по дуге BD на ту же высоту. Сделав это и повторив это опыт несколько раз, вобьем в стену гвоздь в точке E и затем в точке F так, чтобы он выступал на пять или шесть дюймов. Сделаем это для того, чтобы нить AC , когда шарик по дуге CB дойдет до точки B , зацепилась за гвоздь и была бы вынуждена продолжить свое движение по окружности BG , описанной вокруг точки E . Мы увидим, что сделает та скорость, что доводила шарик по дуге BD до высоты горизонтальной линии CD . Теперь, господа, вы с удовольствием увидите, что шарик подойдет к горизонтальной линии в точке G . То же самое произойдет, если вы поместите препятствие ниже в точке F : шарик тогда опишет дугу BJ , всегда заканчивая свое движение точно на линии CD . Если бы препятствующий гвоздь был помещен так низко, что нить из-за него не могла бы дойти до высоты CD (что случилось бы, если бы он был ближе к точке B , чем к пересечению AB с горизонтальной линией CD), то нить, дойдя до гвоздя, обернулась бы вокруг него. Этот опыт не оставляет сомнений в правильности выдвинутого нами положения: так как обе дуги CB и DB равны и симметрично расположены, то момент, достигнутый движением по дуге CB , равняется моменту движения по дуге DB ; но момент в точке B , созданный падением по дуге CB , может толкнуть вверх то же подвижное тело по дуге BD . Вследствие этого момент, приобретенный при движении по дуге DB , равняется тому моменту, который толкает то же самое подвижное тело по той же дуге от точки B к точке D . И вообще всякий момент, приобретенный при падении по дуге, равняется тому моменту, который может поднять то же тело по той же дуге; но все моменты, которые могут поднять тело по дугам BD , BG , BJ , равны между собой, так как они все развились падением по дуге CB , как это доказывает опыт; поэтому и все моменты, которые развились падением по дугам BD , GB , JB , равны между собой».

Замечание, сделанное относительно маятника, сейчас же переносится на наклонную плоскость и приводит к закону инерции. На странице 124 мы читаем:

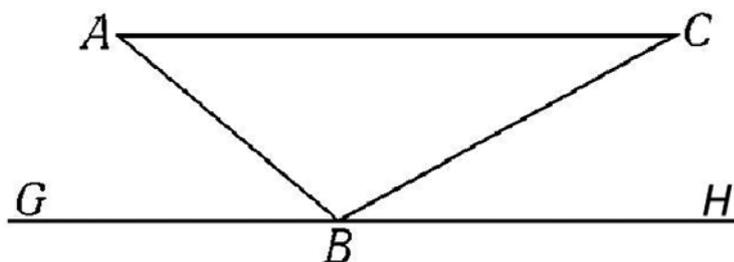


Рис. 4

«Известно уже, что если тело, находящееся в покое в точке A , движется вниз по пути AB , то скорость его возрастает пропорционально приращению времени; в точке B скорость его наибольшая и остается по своей природе неизменной, если причина ускорения или замедления устранена: она

возрастает, если тело продолжает двигаться вниз по другой наклонной плоскости, и убывает, если тело движется вверх по наклонной плоскости BC ; по горизонтальному же пути GH тело может двигаться почти с той же скоростью, которую оно имеет в точке B , до бесконечности».

Гюйгенс, этот во всех своих работах последователь Галилея, дает закону инерции более точное определение и обобщает правило относительно высоты поднятия, оказавшееся столь плодотворным для Галилея. Этим правилом он пользуется для решения проблемы о центре колебаний и вполне ясно заявляет, что правило о высоте поднятия тождественно с принципом исключенного *perpetuum mobile*. Приведем важные места из сочинения Гюйгенса *Horologium oscillatorium, pars secunda*. Гипотезы:

«Если бы не было тяжести и если бы воздух не препятствовал движению тел, то всякое тело, раз приведенное в движение, продолжало бы его с постоянной скоростью и по прямой линии.»

Horologium, pars quarta. О центре колебания:

«Если какие-нибудь тела силой своей тяжести начинают двигаться, то общий центр тяжести их не может подниматься выше того места, где он находился в начале движения.»

«Сама же наша гипотеза, как мы это покажем, чтобы устранить сомнения, ничего другого не выражает, как только то, чего никто никогда не отрицал, и именно, что тела тяжелые (сами) не двигаются вверх. И действительно, если бы ею умели пользоваться изобретатели, в тщетных попытках тратящие свои силы на изобретение *perpetuum mobile*, они легко бы заметили собственные свои заблуждения и поняли бы, что в области механики нельзя признать изобретение возможным.»

Может быть, в словах «*mechanica ratiōe*» скрывается известная иезуитская задняя мысль. Можно на основании этих слов подумать, что немеханическое *perpetuum mobile* Гюйгенс считает возможным.

Яснее еще выражено обобщение принципа *Галилея* в *Propos. IV* глава той же части книги *Гюйгенса*:

«Представим себе, что маятник, сложенный из нескольких маятников различного веса, выведен из состояния покоя и, после того как он совершил какую-нибудь часть целого колебания, разделен на составные маятники, которые с полученной скоростью двигаются обратно и поднимаются до той или иной высоты; общий их центр тяжести вернется после этого до той же высоты, на которой он находился раньше до начала колебания.»

Последнее положение есть обобщение для системы масс того принципа, который был установлен *Галилеем* для одной массы и, согласно разъяснениям *Гюйгенса*, представляет собой не что иное, как принцип исключенного *perpetuum mobile*. На этом положении *Гюйгенс* обосновывает свою теорию центра колебаний. *Лагранж* называет этот принцип *ненадежным* и радуется тому, что *Якову Бернулли* удалось в 1681 году свести теорию центра колебаний к законам рычага, которые кажутся ему яснее. Над разрешением той же проблемы работали почти все выдающиеся исследователи XVII и XVIII столетий, и все эти работы в конце концов приводят в связи с принципом возможной скорости к принципу, провозглашенному *д'Аламбером* (*Traite de dynamique*, 1743) и еще раньше применявшемуся в несколько другой форме *Эйлером* и *Германном*.

Кроме того, положение *Гюйгенса* о высоте поднятия становится основой для закона сохранения живой силы и принципа сохранения силы вообще, провозглашенного *Иоганном* и *Даниэлем Бернулли* и нашедшего столь плодотворное применение в особенности в гидродинамике последнего. Эти положения *Бернулли* только по форме отличаются от позднейшей формулы *Лагранжа*.

Способ, которым *Торричелли* пришел к своей знаменитой теореме истечения жидкости, снова приводит к нашему принципу. *Торричелли* сделал допущение, что вытекающая из отверстия в дне сосуда жидкость при помощи своей скорости истечения может подняться не выше, чем она стоит в сосуде.

Рассмотрим еще один пункт, относящийся к чистой механике, именно, историю принципа возможного (виртуального) движения. Принцип этот не был провозглашен *Галилеем*, как это обыкновенно утверждают и как полагает и *Лагранж*, а во всяком случае был провозглашен раньше *Стевином*. В своей *Trochleostatica*, части названного выше сочинения, на странице 172 он говорит:

«Заметим еще здесь, что существует следующая аксиома в статике: как расстояние действующего относится к расстоянию подвергающегося воздействию, так сила подвергающегося воздействию относится к силе действующего.»

Как известно, *Галилей* заметил правильность принципа при изучении простых машин и из него же вывел законы равновесия жидкостей.

Торричелли сводит принцип к свойствам центра тяжести. Пусть в какой-либо простой машине сила и сопротивление представлены через привешенные грузы. Для равновесия системы необходимо, чтобы общий центр тяжести привешенных грузов не падал. И наоборот, если центр тяжести не может падать, то равновесие существует, ибо тяжелые тела сами не могут подниматься вверх. В этой форме, следовательно, принцип возможной скорости тождественен с принципом невозможности *perpetuum mobile* *Гюйгенса*.

Иоганн Веряулли впервые в 1717 году признает в письме к *Варинье*-ну общее значение принципа возможного движения для любых систем.

Наконец, *Лагранж* дает общее доказательство принципа и кладет его в основу своей аналитической механики. Но это общее доказательство основывается в сущности только на замечаниях *Гюйгенса* и *Торричелли*.

Лагранж, как известно, представляет себе в направлениях, действующих в системе сил, род простого полиспада, перебрасывает нить через все блоки и к последнему из них подвешивает груз, являющийся общей мерой всех действующих в системе сил. Число элементов каждого отдельного полиспада легко выбрать так, чтобы соответственная сила действительно была им заменена. Тогда ясно, что если подвешенный к последнему блоку груз не может опускаться вниз, в системе существует равновесие, ибо тяжелые тела сами не могут подниматься вверх.

Кто не хочет идти так далеко, а хочет остаться ближе к позиции *Торричелли*, тот может представить себе каждую силу системы в отдельности замещенной особым грузом, висящим на нити, переброшенной через блок, который находится в направлении силы, и укрепленный в точке приложения силы. Равновесие существует, когда общий центр тяжести всех грузов не может опускаться вниз. Основным доказательством этого допущения является, очевидно, невозможность *perpetuum mobile*.

Лагранж неоднократно старался дать вполне удовлетворительное доказательство, свободное от чуждых элементов, но это ему не удалось вполне. Не удавалось это, по-видимому, и другим.

Так вся механика основана на мысли, которая кажется и если не сомнительной, то все же чуждой и не того происхождения, что и остальные основные положения и аксиомы механики. Всякий, кто занимается механикой, чувствует неловкость этого состояния, всякий желает ее устранения, но редко это желание выражается громко. И вот молодой ученый чувствует высокое удовлетворение, прочитав у такого мастера, как *Пуансо* в его *Theorie generale de l'Equilibre et du mouvement des systems* следующее место, в котором он высказывается относительно аналитической механики.

«Так как в этом произведении прежде всего было обращено внимание на это прекрасное развитие механики, которая, казалось, вся исходит из одной только формулы, то, естественно, полагали, что наука завершена и что

остаётся только найти доказательство принципа возможных скоростей. Но этим были снова восстановлены все те трудности, которые, казалось, были преодолены самим принципом. Этот столь общий закон, в котором смешаны смутные и чуждые идеи бесконечно малых движений и нарушений равновесия, не выдержал, так сказать, испытания. Так как книга *Лагранжа* не даёт ничего более кроме ряда вычислений, то вполне очевидно, что она не внесла больше света в механику, ибо неясные ее стороны были, так сказать, заложены в самом корне этой науки.»

«Чтобы получить общее доказательство принципа возможных скоростей, вся механика должна быть построена на совершенно другой основе: доказательство закона, охватывающего целую науку, должно быть ничем иным, как сведением этой науки к другому закону, тоже общему, но очевидному, или, по крайней мере, более простому, чем первый, и делающему, следовательно, этот первый закон бесполезным.»

Таким образом, доказать принцип возможного движения значит для *Лувансо* преобразовать всю механику.

Другое неприятное для математиков обстоятельство заключается в том, что в том историческом состоянии, в котором находится в настоящее время механика, динамика основана на статике, а между тем желательно было бы, чтобы в науке, претендующей на дедуктивное завершение, более специальные положения статики легко могли быть выведены из более общих положений динамики.

Это желание находит выражение у другого великого ученого, именно у *Гаусса*. Выставив свой принцип наименьшего принуждения (*Crelle's Journal IV Bd.*, стр. 233), он говорит: «Как ни естественно то, что при постепенном развитии науки и при изучении ее отдельным индивидуумом более легкое предшествует более трудному, более простое – более сложному, частное – общему, тем не менее наш дух, раз достигший высшей точки развития, все же требует и обратного пути, и тогда вся статика представляет лишь частный случай механики». Принцип *Гаусса* есть, действительно, принцип общий, но только жаль, что это не видно непосредственно и что *Гаусс* вывел его с помощью принципа *д'Аламбера*, вследствие все осталось по-старому.

Откуда же эта странная роль, которую играет в механике принцип возможного движения? На это я покажу ответу следующее. Трудно мне будет описать разницу в впечатлении, которое произвело на меня доказательство принципа *Лагранжем*, прочитанное мной впервые во время моего студенчества, и впоследствии еще раз после того, как я занимался историческими исследованиями. Раньше доказательство это показалось мне нелепым и именно из-за блоков и нитей. Те и другие казались мне неподходящими для математического исследования и действие их я предпочел

бы распознавать из самого принципа, чем предположить известным. Но после того, как я изучил историю механики, я лучшего доказательства не могу представить.

В действительности, во всей механике почти все достигается при помощи все того же принципа исключенного *perpetuum mobile*, который так не нравится *Лагранжу* которым он тем не менее пользуется, по крайней мере, в скрытом виде, в своих доказательствах. Стоит дать этому принципу правильную постановку и правильное определение, чтобы парадоксальное стало естественным.

Итак, принцип исключительного *perpetuum mobile*, разумеется не новое открытие; в течение 300 лет им руководствуются величайшие исследователи. Но с другой стороны, принцип этот не может собственно основываться на познаниях механики. Ибо убеждение в правильности его существует задолго до развития этой науки и именно это убеждение влияет на само это развитие. Очевидно, следовательно, что эта убедительная сила должна иметь более общие и более глубокие корни. Мы вернемся еще к этому пункту.

Механическая физика

Вряд ли кто-нибудь станет отрицать тот факт, что от *Демокрита* вплоть до новейшего времени существовало несомненное стремление к механическому объяснению всех физических процессов. Если оставить в стороне все старые, неясные формулировки, то мы можем еще у *Гюйгенса*¹ прочесть следующее:

«Не подлежит никакому сомнению, что свет заключается в движении какого-нибудь вещества. Ибо, если мы обратимся к вопросу о происхождении его, то мы найдем, что здесь на земле его создают огонь и пламя, которые, без сомнения, содержат тела в сильном движении, потому что они разлагают и расплавляют множество весьма твердых тел. Если же мы обратимся к его действиям, мы увидим, что собранный вогнутым зеркалом свет обладает способностью жечь, как огонь, т. е. что он разъединяет части тела. Это, несомненно, указывает на движение, по крайней мере, для истинной философии, которая все естественные действия сводит к механическим причинам. Так, по моему мнению, необходимо делать, если мы не хотим совсем отказаться от надежды что-нибудь понять в физике».

*С. Карно*², вводя принцип исключенного *perpetuum mobile* в учение о теплоте, говорит в свое оправдание следующее:

«Нам, может быть, возразят, что была доказана невозможность *perpetuum mobile* только для процессов механических, но оно может быть возможно в

¹ Traide de la lumiere. 1690 стр. 2.

² Sur la puissance motrice du feu. 1824.

применении к теплоте или электричеству. Но можно ли в явлениях теплоты или электричества усматривать что-нибудь другое, кроме движения известных тел, а если так, то не должны ли они удовлетворять общим законам механики?»

Эти примеры, которые можно было бы приводить без конца, пользуясь цитатами из сочинений новейшего времени, показывают, что стремление все объяснить механически действительно существует. И это стремление так же объяснимо. Механические процессы, как простые движения в пространстве и времени, наиболее доступны наблюдению и исследованию с помощью тех из наших чувств, органы которых отличаются высшей организацией. Механические процессы мы воспроизводим в воображении почти без всякого труда. Давление, как обстоятельство, вызывающее движение, хорошо известно нам из повседневного опыта. Все перемены, вызываемые индивидуумом в окружающей его среде, или человечеством – путем техники в мире, осуществляются с помощью движений. Могло ли движение не казаться нам важнейшим физическим фактором.

Кроме того, во всех физических процессах можно открыть механические свойства. Звучащий колокол дрожит, нагретое тело расширяется, наэлектризованные тела притягиваются. Почему бы в таком случае не

попытаться объяснить себе все процессы со стороны более нам привычной, более доступной наблюдению и измерению, т. е. механически? Ничего также нельзя возразить против попытки объяснить механические свойства физических процессов механическими аналогиями.

Но современная физика, правда, зашла в этом направлении уже очень далеко. Точка зрения, выставленная *Вундтом* в его очень интересном сочинении «О физических аксиомах», разделяется, вероятно, большинством физиков.

Вундт устанавливает следующие аксиомы физики:

1. Все причины в природе суть причины движения.
2. Всякая причина движения лежит вне того, что находится в движении.
3. Все причины движения действуют в направлении прямой связующей линии.
4. Действие каждой причины сохраняется.
5. Каждому действию соответствует равное противодействие.
6. Каждое действие эквивалентно причине.

С этими положениями можно было бы согласиться, как с основными принципами механики. Но когда их выставляют в качестве аксиом физики, то это равносильно, собственно говоря, отрицанию всех процессов движения. Все изменения в природе являются, по мнению Вундта, только переменаами места, все причины – причинами движений. Если бы мы захотели вникнуть в философское обоснование этого взгляда, даваемое Вундтом,

то это привело бы нас к умозрениям элеатов и гербартианцев. Перемена места, полагает Вундт, является единственной переменной, происходящей с вещью, когда сама вещь остается тождественной. Когда какая-либо вещь изменяется качественно, то скорее можно было бы думать, что одна вещь исчезает, а другая появляется, что трудно совместить с представлением о тождестве наблюдаемой сущности и о неразрушаемости материи. Но нам стоит лишь вспомнить, что совершенно такого же рода затруднения находили элеаты в движении. Нельзя разве представить себе, что вещь исчезает в одном месте, а другая, такая же появляется в другом?

Разве по существу дела мы больше знаем о том, почему тело оставляет одно место и появляется в другом, чем то, как холодное тело становится теплым? Допустим, что мы постигли процессы механики вполне. Имеем ли мы право и возможность устранять на этом основании из мира другие процессы, которых мы не понимаем? Придерживаясь такого принципа, было бы проще всего отрицать существование всего мира. Элеаты, собственно, и пришли к такому результату, а гербартианцы были недалеко от него.

Физика, разрабатываемая таким образом, дает нам схему, в которой едва ли можно узнать действительный мир. И в самом деле, людям, в продолжении нескольких лет придерживавшимся таких воззрений, чувственный мир, из которого, как из вполне знакомой вещи, они первоначально исходили, представляется вдруг величайшей «мировой загадкой»!

Таким образом, как бы ни было понятно то обстоятельство, что люди стремятся все физические процессы «свести к движениям атомов», этот идеал все же следует назвать химерой. В популярных лекциях он часто играл роль эффектной программы. Но в кабинете серьезного исследователя он едва ли играл существенную роль.

В действительности механическая физика дала нам следующее: она объясняла физические процессы при помощи более понятных нам механических аналогий, примерами чего служит теория света и электричества, или давала точное количественное определение связи, существующей между механическими и другими физическими процессами, примерами чего служат работы в области термодинамики.

Принцип сохранения энергии в физике

Только опыт может убедить нас в том, что механические процессы обуславливают другие физические превращения и наоборот. Благодаря изобретению паровой машины и той роли, какую она играет в технике, было обращено внимание в первую очередь на связь механических процессов (в особенности работы) с изменениями теплового состояния. В голове С. Карн о потребность в научной ясности соединялась с теоретическим ин-

тересом, и это привело к замечательным соображениям, результатом которых является термодинамика. Лишь исторической случайностью объясняется тот факт, что этот ряд идей не мог быть связан с электротехникой.

В своих исследованиях вопроса о том, какой *тахитит* может дать *тепловая* машина вообще и паровая в частности при *определенной* затрате *теплоты сгорания*, С. Карно исходил из механических аналогий. Тело может произвести работу, когда оно расширяется при нагревании под известным давлением. Но оно при этом должно получать теплоту от какого-нибудь более нагретого тела. Следовательно, для того, чтобы производить работу, теплота должна переходить от более теплого тела к более холодному, как вода для того, чтобы приводить в движение мельницу, должна падать с более высокого уровня до более низкого. Таким образом, разности температур так же *представляют* рабочие силы, как и разности высоты (падения) тяжелых тел.

Карно придумывает *идеальный* процесс, при котором ни одна часть теплоты не тратится бесполезно (не производя работы). Этот процесс и дает нам при заданной затрате теплоты максимум работы. Нечто подобное представляло бы собой мельничное колесо, черпающее на более высоком уровне воду, которая в нем же не очень медленно, не теряя ни капли, спускается на более низкий уровень. Этот процесс характеризуется тем, что при затрате той же работы вода опять может быть поднята на первоначальную высоту. Это свойство обратимости мы находим и в процессах *Карно*. И в нем при затрате той же работы может быть восстановлено первоначальное состояние, причем температура возвращается к своему первоначальному уровню.

Допустим, что существуют два различных обратимых процесса *A*, *B* и именно таких, что количество теплоты Q при понижении температуры с t_1 до t_2 дает в первом работу W , а во втором при тех же условиях работу $W + W^1$. Мы могли бы тогда связать процесс *B*, происходящий в указанном направлении, с процессом *A*, которому мы придали бы предварительно направление обратное, в один процесс. Процесс *A* восстанавливал бы тогда изменения, производимые процессом *B*. и дал бы еще некоторый излишек работы W^1 , который был бы получен, так сказать, из ничего. Мы имели бы в этой комбинации *perpetuum mobile*.

Чувствуя, что не составляет большой разницы, обнаруживаются ли законы механические непосредственно или окольным путем (через посредство процессов теплоты), и будучи убежден в общей закономерной связи между всеми явлениями природы, *Карно* здесь впервые исключает *perpetuum mobile* из области общей физики. *Но в таком случае величина W , которая может быть получена при переходе количества теплоты Q от t_1 до t_2 , вовсе не может зависеть ни от природы веществ, ни от ха-*

рактера процесса (если только он не сопряжен с потерями), а только от температур t_1 и t_2 .

Это важное положение нашло полнейшее подтверждение в специальных исследованиях самого Карно (1824), Клапейрона (1834) и Уильяма Томсона (1849). Получено оно одним исключением *perpetuum mobile*, без всякого допущения относительно природы теплоты. Карно, правда, сохранил взгляд Блэка, по которому все количество теплоты остается неизменным, но поскольку исследование до сих пор рассматривалось, решение этого вопроса значения не имеет. Уже правило Карно привело к самым замечательным результатам. Уильям Томсон (лорд Кельвин) (1848) положил его в основу своей гениальной мысли об абсолютной (общесравнимой) термометрической шкале. Джемс Томсон (1849) представил себе процесс Карно в виде замерзающей под давлением и потому совершающей работу воды. Он установил при этом, что давление одной атмосферы понижает точку замерзания на $0,0075$ °С. Я упоминаю об этом только для примера.

Два десятилетия спустя после обнаружения работы Карно был достигнут работами Р. Майера и Джоуля дальнейший шаг вперед. Служа врачом на острове Яве, Майер заметил при кровопускании яркую окраску венозной крови. Согласно теории животной теплоты Либиха, он привел этот факт с ничтожной потерей крови в более теплом климате и с незначительной тратой органического горючего материала. Вся потеря теплоты человека, остающегося в покое, должна была соответствовать всей теплоте сгорания. А так как все функции организма, включая и механические, должны быть отнесены на счет теплоты сгорания, то должно было существовать известное отношение между механической работой и тратой теплоты.

Джоуль исходил из подобных же рассуждений относительно гальванической батареи. Соответствующая потреблению цинка теплота соединения может обнаружиться и в гальваническом элементе. Когда появляется ток, то часть этой теплоты появляется в проводнике. Если включить в цепь аппарат для разложения воды, то часть этой теплоты исчезает, но она опять появляется при взрыве образовавшегося таким образом гремучего газа. Когда ток приводит в движение электромотор, то опять исчезает часть теплоты, но она снова обнаруживается при поглощении работы трением. Таким образом и Джоулю получаемая теплота и производимая работа представляются связанными с тратой какого-то вещества. И Майер, и Джоуль не далеки от того, чтобы рассматривать теплоту и работу как величины однородные, находящиеся между собой в такой зависимости, что постоянно в одной форме является то, что исчезает в другой. Отсюда вытекает субстанциональное представление о теплоте и работе, и в конце концов субстанциональное представление об энергии вообще. Энергия

усматривается во всякой перемене физического состояния, уничтожение которого создает работу (или эквивалентную ей теплоту). Электрический заряд, например, есть энергия.

Майер (1842) вычислил, основываясь на общеизвестных в то время физических данных, что *при уничтожении одной килограмм-калории может быть произведено 365 килограммометров работы*, и наоборот. *Джоуль* же предпринял в 1843 г. целый ряд остроумных и разнообразных опытов и в конце концов определил механический эквивалент килограмм-калории с гораздо большей точностью, а именно, в 425 килограммометров.

Если измерять всякое изменение физического состояния механическое работой, которая может быть совершена при его исчезновении, и называть эту меру энергией, то можно все изменения физического состояния, как бы разнородны они не были, измерять одной и той же мерой и сказать: *сумма всех энергий остается постоянной*. Такова форма, которую принял принцип исключенного *perpetuum mobile*, когда применение его было распространено на всю физику работами *Майера*, *Джоуля*, *Гельмгольца* и *У. Томсона* (лорда Кельвина).

После того как было доказано, что теплота должна исчезать, чтобы на счет ее могла быть произведена механическая работа, было уже невозможно усматривать в принципе *Карно* полное описание фактов. Дополнили его впервые *Клаузиус* (1850), а потом в 1851 г. *Томсон*. В новой форме принцип этот гласит так: *если количество теплоты Q^1 превращается в обратимом процессе в работу*, то другое количество теплоты Q падает с абсолютной¹ температуры T_1 до абсолютной температуры T_2 . При этом Q^1 зависит только от Q , T_1 , T_2 , но совсем *не зависит* от употребляемых в дело веществ и от характера процесса (если он не сопряжен с потерями). Вследствие этого последнего обстоятельства достаточно определить это отношение для одного хорошо известного в физическом смысле вещества (например, для газа) и для одного определенного сколько угодно простого процесса. Это отношение будет тогда общеобязательным. Этим путем находят:

$$\frac{Q^1}{Q^1 + Q} = \left(\frac{T_1 - T_2}{T_1} \right). \quad (1)$$

Это значит, что частное от деления превращенной в работу (полезной) теплоты Q^1 на сумму из превращенной в работу и сообщенной (всей поглощенной) теплоты, т. е. так называемый *экономический коэффициент процесса* есть

$$\frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

¹ Под этим подразумевается 273 °C ниже точки кипения воды.

Представления о теплоте

Когда какое-нибудь холодное тело приходит в соприкосновение с теплым, то первое, как это не трудно заметить, нагревается, а второе охлаждается. Можно сказать, что *одно* тело нагревается *за счет Другого*. Отсюда недалеко до представления о каком-то нечто, о каком-то веществе, теплороде, переходящем из одного тела в другое. Если в соприкосновение приходят две массы воды, m и m^1 , неодинаковой температуры, то оказывается, что при быстром уравнении их температур их изменения температур, u и u^1 обратно пропорциональны массам и имеют противоположные знаки, так что алгебраическая сумма их произведений

$$mu + m^1u^1 = 0.$$

Блэк назвал эти произведения, играющие существенную роль при изучении явления, mu , m^1u^1 количествами теплоты. Их можно вместе с Блэком представлять себе очень наглядно, как меры количества вещества. Но существенное значение имеет не этот образ, а неизменяемость указанных сумм произведений при переходе теплоты с одного тела на другое. Если где-нибудь исчезает какое-нибудь количество теплоты, то вместо него где-нибудь в другом месте появляется равное ему. Усвоение такого представления приводит к открытию удельной теплоты. В конце концов Блэк признает, что взамен исчезнувшей теплоты может появиться и нечто другое, а именно, расплавление или испарение известного количества вещества. Он здесь еще удерживает с известной долей свободы излюбленное представление и рассматривает исчезнувшее при этом количество теплоты, как еще существующее, но скрытое.

Общепринятое представление о теплороде было сильно поколеблено работами *Майера* и *Джоуля*. Если количество теплоты может быть увеличено или уменьшено, говорили тогда, то теплота не может быть веществом, а должна быть движением. Этот несущественный вывод сделался гораздо популярнее, чем все остальные учения о энергии. Мы можем, однако,

убедиться, что взгляд на теплоту, как на движение, в настоящее время столь же мало существенен, как и прежний взгляд на нее, как на вещество.

Оба эти представления встречали себе поддержку или препятствия в случайных исторических обстоятельствах. Из того, что данному количеству теплоты соответствует механический эквивалент, еще вовсе не следует, что теплота – это не вещество.

Выясним это при помощи одного вопроса, с которым ко мне неоднократно обращался кое-кто, пробудившийся к самостоятельному мышлению. Существует ли механический эквивалент электричества, как существует

механический эквивалент теплоты? И да, и нет! Нет такого механического эквивалента количества электричества, как есть эквивалент количества теплоты, ибо одно и то же количество электричества может иметь весьма различный эквивалент работы в зависимости от условий, при которых оно дано. Но есть механический эквивалент электрической энергии.

Прибавим сюда еще один вопрос. Существует ли механический эквивалент воды? Эквивалента количества воды нет, но есть эквивалент веса воды, умноженного на высоту ее падения.

Когда лейденская банка разряжается и совершает при этом работу, то мы не представляем себе, будто количество электричества исчезает и совершает работу, а мы принимаем, что оба вида электричества приходят лишь в другое состояние, а именно равные количества положительного и отрицательного электричества соединяются между собой.

Откуда же это различие в нашем представлении того, что происходит в случае теплоты и в случае электричества? Оно имеет только исторические основания совершенно условно и – что еще важнее – вполне безразлично. Я позволю себе обосновать это.

В 1785 году *Кулон* построил свои крутильные весы, которые дали ему возможность измерить силу отталкивания электрических тел. Допустим, что у нас два маленьких шарика *A* и *B*, совершенно равномерно заряженных электричеством. При определенном расстоянии между их центрами *r* пусть эти шарики отталкиваются друг от друга с определенной силой *p*. Мы приводим в соприкосновение шарик *B* с телом *C*, и оба при этом равномерно наэлектризуются; затем измеряем силу, с которой отталкивается от *A* шарик *B* и тело *C* на одном и том же расстоянии *r*. Сумма этих сил отталкивания опять будет *p*. Что-то при этом разделении осталось постоянным, именно сила отталкивания. Если мы будем приписывать это действие какому-нибудь действующему началу, веществу, например, мы без всяких натяжек сделаем вывод о постоянстве его.

В 1838 году *Русс* построил свой электрический воздушный термометр. Этот прибор дает меру того количества теплоты, которое получается при разрезании лейденской банки. Это количество теплоты не пропорционально количеству электричества, содержащемуся в банке, согласно измерению *Кулона*, а пропорционально $\frac{q^2}{s}$, где *q* есть это количество, а *s* – некий коэффициент, зависящий от поверхности, формы и толщины стекла банки, или короче, пропорционально энергии заряженной банки. Допустим, что мы разрядили сперва совершенно какую-нибудь лейденскую банку через наш термометр и получили известное количество теплоты *W*. Если же мы разрядим ее через термометр в другую лейденскую банку, то мы получим меньше, чем *W*. Остаток мы можем получить еще, если мы термометром разрядим обе лейденские банки и он опять будет пропорци-

ональным энергии обоих этих банок. Таким образом, при первом неполном разряде часть способности действия электричества пропала.

Когда электрический заряд лейденской банки производит теплоту, то энергия ее изменяется и величина ее, как указывает термометр *Рисса*, убывает. Но количество электричества, по измерению *Кулона*, остается без изменений.

Теперь представим себе, что термометр *Рисса* изобретен раньше, чем крутильные весы *Кулона*. Представить себе это не трудно, потому что эти изобретения совершенно друг от друга не зависят. Что было бы естественнее, если бы количество содержащегося в лейденской банке электричества оценивалось по теплоте, вызванной в термометре? Но тогда так называемое количество электричества уменьшалось бы при образовании теплоты или совершении работы, между тем как теперь оно остается без изменений. Тогда, следовательно, электричество не было бы веществом, а было бы движением, между тем как теперь оно еще вещество. Отсюда ясно, что если мы об электричестве думаем иначе, чем о теплоте, то этот факт имеет чисто историческое и совершенно случайное, условное основание.

И так обстоит дело и с другими физическими вещами. Вода не исчезает при совершении работы. Почему? Потому что количество воды мы измеряем весами, как электричество. Но представим себе, что величина работы воды называется количеством и должна, поэтому, измеряться не весами, а мельницей, например. Тогда это количество, совершая работу, исчезло бы. Но легко представить себе, что некоторые вещества могут оказаться не столь осязательными, как вода. Мы тогда один род измерения – при помощи весов – не могли бы осуществить, а некоторые другие способы измерения у нас остались бы. И вот для теплоты исторически установившейся мерой «количества» случайно является величина работы теплоты. Поэтому она и исчезает, когда совершается работа. Но что теплота не есть вещество, отсюда вытекает столь же мало, как и утверждение противоположное.

Если бы кому-либо нравилось и в настоящее время еще представлять себе теплоту, как вещество, можно было бы ему позволить это невинное удовольствие. Он должен был бы только представлять себе, что то самое, что мы назовем количеством теплоты, есть энергия вещества, количество которого остается без изменения, между тем как энергия изменяется. В действительности же было бы гораздо лучше, если бы мы по аналогии с остальными физическими обозначениями вместо «количества теплоты» говорили «энергия теплоты».

Таким образом, если мы поражаемся открытием, что теплота есть движение, то мы поражаемся тем, что никогда не было вовсе открыто. Совершенно безразлично и не имеет ни малейшего научного значения, представляем ли мы себе теплоту, как вещество, или нет.

Дело именно в том, что в одних отношениях теплота обнаруживает такие свойства, как вещество, а в других – нет. Теплота так же скрыта в парах, как кислород в воде.

Сходство в проявлении различных видов энергии

Преыдушие наши рассуждения выигрывают в ясности, если обратить внимание на сходство в проявлении всех видов энергии, на что я указывал уже давно¹. Груз P на высоте H_1 представляет энергию $W_1 = PH_1$. Пусть груз падает до меньшей высоты H_2 причем производится работа, которая служит для получения живой силы, теплоты, электрического заряда и т.д., которая, одним словом, превращается во что-нибудь другое. Тогда остается еще энергия $W_2 = PH_2$. Мы имеем тогда уравнение:

$$\frac{W_1}{H_1} = \frac{W_2}{H_2}. \quad (2)$$

Если же мы через $W^1 = W_1 - W_2$ обозначим превращенную энергию, а через $W = W_2$ обозначим энергию, переведенную на низший уровень, то мы получим следующие уравнение:

$$\frac{W^1}{W^1 - W} = \frac{H_1 - H_2}{H_1}. \quad (3)$$

Это уравнение аналогично уравнению 1. Свойство это, таким образом, вовсе не принадлежит исключительно теплоте. Уравнение 2 выражает отношение между энергией, взятой с верхнего уровня, и энергией, отданной на низшем уровне (оставшейся); оно выражает то, что энергии эти пропорциональны высотам уровней. Аналогичное уравнению 2 уравнение можно установить для *каждой* формы энергии, а потому для нее же может быть установлено уравнение, соответствующее уравнениям 3 и 1. В случае электричества, например, H_1 , H_2 обозначают потенциалы.

Когда впервые замечают изложенное здесь сходство в законе превращения различных видов энергии, оно кажется неожиданным и странным, так как не видна сразу причина его. Но для того, кто пользуется сравнительно-историческим методом изучения, причина эта не может оставаться надолго скрытой.

¹ Я указывал на это впервые в своем сочинении «Über die Erhaltung der Arbeit». Прага 1872. («Принцип сохранения работы». С.-Петербург 1909.) На аналогию между механической и термической энергией еще раньше того указывал Цейнер. Дальнейшие указания я дал в «Geschichte und Kritik des Carnotschen Warmegesetzes». Sitzungsberichte der Wiener Akademie. Декабрь 1892. Ср. также рассуждения Гельма, Оствальда и др. современных «энергетиков».

Со времен *Галилея* механическая работа есть основное занятие механики и важное понятие техники, хотя она долго еще не была известна под тем названием, которое она носит в настоящее время. Превращение работы в живую силу и наоборот приводит к пониманию энергии, которое впервые было успешно использовано *Гюйгенсом*, хотя только *Т. Юнг* употребил в первый раз название «энергия». Если мы прибавим к этому неизменяемость веса (т.е. собственно массы), то в отношении механической энергии уже из самого определения вытекает, что работоспособность, или (потенциальная) энергия груза, пропорциональна высоте (в геометрическом смысле) и что она при падении вниз при превращении убывает пропорционально высоте. Уровень, принимаемый за нулевой, здесь совершенно произволен. Этим дано уравнение 2, из которого вытекают остальные формы.

Если принять во внимание, насколько механика опередила в своем развитии остальные области физики, то не покажется странным, что понятиями первой охотно пользуются всюду, где это было удобно. Так, например, *Кулон* создал свое понятие количество электричества по образцу понятия массы. В дальнейшем развитии учения об электричестве понятие работы было применено в теории потенциала, и *высота электрического потенциала* стала измеряться работой, необходимой, чтобы довести до нее единицу количества электричества. Этим приведенное выше уравнение со всеми вытекающими из него последствиями стало применимо и к электрической энергии. То же происходило и с другими видами энергии.

Особенный случай представляет, однако, тепловая энергия. Что теплота представляет собой энергию, могло быть открыто только благодаря тем своеобразным опытам, о которых мы говорили выше. Но измерение этой энергии количеством теплоты *Блэка* зависит от случайных обстоятельств. Прежде всего случайной, незначительной изменчивостью теплоемкости c при изменении температуры и случайно ничтожным отклонением общепотребительных термометрических шкал от шкалы упругости газа объясняется то, что было установлено понятие количества теплоты и что количество теплоты ct , соответствующее разности температур t , действительно почти пропорционально энергии теплоты. Совершенно случайно было то, что *Amontons* пришел к мысли измерять температуру упругостью газа. О работе теплоты он при этом, конечно, не думал¹.

Но этим *числа*, выражающие температуру, становятся при равных изменениях объема *пропорциональны упругости газов* и, следовательно, *производимым ими работам*. Благодаря этому получается также пропорциональность между уровнями температуры и уровнями работы.

¹ Сознательно сходство между температурой и уровнем работы было установлено лишь У. Томсоном (1848, 1851).

Если бы были выбраны признаки теплового состояния, сильно различающиеся от упругости газа, то это отношение могло бы оказаться весьма сложным и тогда рассматриваемого сходства между теплотой и другими видами энергии не было бы. Поразмышлять над этим очень поучительно.

Итак, сходство в проявлении различных видов энергии не представляет собой никакого закона природы, а оно скорее обусловлено однообразием нашего взгляда на вещи, а отчасти есть также дело случая.

Различие между видами энергии и пределы применения принципа сохранения энергии

От каждого количества теплоты Q , совершающего работу при обратимом (без потерь) процессе между абсолютными температурами T_1 , T_2 , только часть $\frac{T_1 - T_2}{T_1}$ превращается в работу, а остальная часть переводится на более низкий уровень T_2 . Эта переведенная часть может быть снова поднята на уровень T_1 с затратой произведенной работы при обращении процесса. Если же процесс необратим, то на низший уровень переходит больше теплоты, чем в предыдущем случае, и этот излишек уже не может быть *поднят без Дополнительной* затраты до T_1 . Поэтому *У. Томсон* указывал на то, что при всех необратимых процессах, т. е. при всех действительных процессах, известное количество теплоты пропадает для механической работы, что, следовательно, в этих случаях происходит *рассеяние* или *уничтожение механической энергии*. Теплота всегда лишь отчасти переходит в работу, но работа *часто всецело* переходит в теплоту. Существует, таким образом, в мире *тенденция* к уменьшению механической энергии и к увеличению энергии тепловой.

Для простого замкнутого кругового процесса (без потерь), в котором количество теплоты Q_1 отнимается с уровня T_1 , а количество передается уровню имеет силу, согласно уравнению 2, отношение

$$\frac{-Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = 0.$$

Для произвольно сложного кругового процесса Клаузиус, аналогично находит алгебраическую сумму $\sum \frac{Q}{T} = 0$, если температура непрерывно меняется, то:

$$\int \frac{dQ}{T} = 0. \quad (4)$$

При этом отнятые от данного уравнения элементы количества теплоты считаются отрицательными, а сообщенные – положительными. Если про-

цесс необратим, то для него численное значение выражения 4 увеличивается. Выражение это *Клаузиус* называет энтропией. В действительности так бывает всегда и потому *Клаузиус* видит себя вынужденным выставить следующие положения:

- 1) Энергия мира остается постоянной.
- 2) Энтропия мира стремится к *maximum* 'у.

Раз выяснено сходство в проявлении различных видов энергии, отмеченная здесь особенность энергии теплоты не может не броситься в глаза и показаться странной. Откуда же она берется, если всякая вообще энергия только отчасти переходит в другую форму, точно так же, как и энергия тепловая? Объясняется это следующим образом.

Всякое превращение какого-либо вида энергии *A* бывает связано с падением потенциала этого вида энергии. Не составляет из этого исключения и энергия тепловая. Но в других видах энергии происходит и обратное, т. е. с падением потенциала связано превращение, а потому и потеря энергии. С теплотой же дело происходит иначе: здесь может быть падение потенциала без – по крайней мере, по обычной оценке – потери энергии. Если падает какой-нибудь груз, он должен произвести кинетическую энергию, или теплоту, или какую-нибудь другую энергию. И в случае электрического заряда не может быть падения потенциала без потери энергии т. е. без превращения. Теплота же может переходить с падением температуры на тело, обладающее большей теплоемкостью, и оставаться той же тепловой энергией, если только рассматривать всякое количество теплоты, как энергию. Вот именно это обстоятельство придает теплоте во многих случаях наряду с характером энергии характер (материального) вещества, некоторого количества.

Если посмотреть на дело беспристрастно, то не может не возникнуть вопрос, есть ли вообще научный смысл и цель рассматривать еще, как энергию, количество теплоты, которое не может быть уже превращено в механическую работу (например, теплоту замкнутой системы тел с совершенно равномерно распределенной температурой). Очевидно, что в этом случае принцип сохранения энергии играет совершенно праздную роль, которая достается ему, только благодаря привычке. Ясно, следовательно, что кто удерживает принцип сохранения энергии, сознавая в то же время рассеяние или уничтожение механической энергии, как и усиление энтропии, тот позволяет себе приблизительно ту же вольность, которую позволил себе *Блэк*, когда он принимал теплоту плавления за существующую, но *скрытую*.

Позволю себе еще заметить, что выражения «энергия мира» и «энтропия мира» носят на себе следы схоластики. Энергия и энтропия суть понятия меры. Какой же может быть смысл применять эти понятия к случаю, к кото-

рому они вовсе не применимы, в котором значения их не поддаются определению?

Если бы действительно существовала возможность определить энтропию мира, эта энтропия представляла бы настоящую абсолютную меру времени. Отсюда лучше всего видно, что это только тавтология, когда говорят: энтропия мира возрастает вместе со временем. В том-то и дело, что то, что известные изменения происходят только в одном определенном направлении, и факт времени есть одно и то же.

Источники принципа сохранения энергии

Мы достаточно теперь подготовлены, чтобы дать ответ на вопрос об источниках принципа сохранения энергии. Источником всякого познания природы является в последнем счете только опыт. В этом смысле правы, поэтому, те, которые и в принципе сохранения энергии усматривают результат опыта.

Из опыта мы знаем, что чувственные элементы $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \dots$, на которые может быть разложен мир, подвержены изменениям. Далее из опыта уже известно, что одни из этих элементов связаны с другими так, что они появляются и исчезают вместе, или что появление элементов одного рода бывает связано с исчезновением элементов другого. Будем здесь избегать понятий причины и следствия, ввиду расплывчатости и неопределенности их. Результат опыта может быть выражен следующим образом: чувственные элементы мира ($\alpha, \beta, \gamma, \delta, \dots$) оказываются в зависимости друг от друга. Лучше всего представлять себе эту взаимную зависимость так, как представляют себе в геометрии взаимную зависимость сторон и углов треугольника, например, но только гораздо многообразнее и сложнее.

Приведем пример. Пусть масса некоторого газа занимает в цилиндре определенный объем (α). Давлением (β) на поршень мы изменяем этот объем и, ощупывая цилиндр рукой, мы получаем тепловое ощущение (γ). С увеличением давления уменьшается объем и усиливается тепловое ощущение.

Различные факты опыта не вполне равны друг другу. Общие им чувственные элементы выступают вследствие процесса абстракции и запечатлеваются в памяти. Это приводит к появлению сходства между целыми группами фактов. Уже самое простое положение, которое мы можем только выразить, есть, благодаря природе нашей речи, такая абстракция. Но нам приходится считаться с различиями, существующими между родственными фактами. Факты могут быть так сходны между собой, что они содержат один и тот же род $\alpha, \beta, \gamma, \dots$ и что $\alpha, \beta, \gamma, \dots$ одного из них отличается от других только числом равных частей, на которые он может быть разложен. Когда нам удастся установить правила, по которым численные величины $\alpha, \beta, \gamma, \dots$ могли бы быть выведены друг из друга, мы имеем выражение самое общее

и вместе с тем учитывающее все различия какой-нибудь группы фактов. Это и есть цель количественного исследования.

Раз эта цель достигнута, то мы нашли, что между $\alpha, \beta, \gamma, \dots$ какой-нибудь группы фактов или между численными их величинами существует известное число уравнений. Факт изменения предполагает, что число этих уравнений должно быть меньше числа $\alpha, \beta, \gamma, \dots$. Если первое число на одно уравнение меньше второго числа, то одна часть $\alpha, \beta, \gamma, \dots$ однозначно определена другой.

Констатирование отношений подобного рода есть важнейший результат экспериментального специального исследования, потому что оно дает нам возможность факты, данные нам отчасти, восполнять в мыслях. Само собою разумеется, что только из опыта мы можем узнать, что между $\alpha, \beta, \gamma, \dots$ вообще существует какие-нибудь отношения и какого рода эти последние.

Далее, только из опыта мы можем узнать, что между $\alpha, \beta, \gamma, \dots$ существуют такие отношения, что наступившие изменения их могут быть снова восстановлены. Нетрудно видеть, что не будь этого обстоятельства, не существовало бы никакого повода и к установлению принципа сохранения энергии. *В опыте, следовательно, заключается последний источник всякого познания природы, а, следовательно, и в этом смысле, источник и принципа сохранения энергии.*

Это не исключает, однако, того, чтобы принцип сохранения энергии имел и *логический корень*, что мы сейчас и покажем. Предположим на основании данных опыта, что группа чувственных элементов $\alpha, \beta, \gamma, \dots$ однозначно определяет другую группу λ, μ, ν, \dots . Далее из опыта также известно, что изменения $\alpha, \beta, \gamma, \dots$ могут быть снова восстановлены. *Логическим* выводом отсюда является, что всякий раз, когда $\alpha, \beta, \gamma, \dots$ получают одни и те же значения, то же самое происходит и с λ, μ, ν, \dots , или что одни *периодические* только изменения $\alpha, \beta, \gamma, \dots$ не могут привести к постоянному изменению λ, μ, ν, \dots . Если группа λ, μ, ν, \dots относится к области механики, то этим выводом *исключается perpetuum mobile*.

Могут сказать, что это только *circulus vitiosus* (порочный круг), и с этим можно сейчас же согласиться. Но психологически ситуация все же существенно другая, думаю ли я только об однозначной определенности и обратимости процессов или я исключаю *perpetuum mobile*. Внимание мое в обоих случаях направлено *различно* и бросает свет на *различные* стороны вещи, которые логически, правда, необходимо связаны между собой.

Строго логический строй мыслей великих исследователей (Стевин, Галилей), сознательно или инстинктивно руководствующихся тонким чутьем, усматривающим малейшие противоречия, не имеет, без сомнения, никакой другой цели, кроме одной: лишить, так сказать, мысль известной степени свободы и тем самым устранить хоть некоторую возможность ошибки. Этим

нам дан логический корень принципа исключенного *perpetuum mobile*, т.е. то общее убеждение, которое существовало даже до развития механики и играло известную роль в самом этом развитии.

Вполне естественно, что принцип исключенного *perpetuum mobile* достиг признания в менее сложной сравнительно области чистой механики. Перенесению его в область всей физики вообще содействовала та мысль, что все физические явления представляют собой, собственно, явления механические. Предыдущее показывает, однако, как несущественно это представление. Важно здесь скорее познание всеобщей связи явлений природы. Раз эта последняя установлена, то становится очевидным, как это и познал *Карно*, что не так важно, проявляются механические законы непосредственно или косвенным путем.

Принцип исключенного *perpetuum mobile* очень близок к современному принципу сохранения энергии, но он не тождественен с ним, потому что этот последний вытекает из него только при особом формальном понимании. Для исключенного *perpetuum mobile*, как это явствует из предыдущего, нет необходимости пользоваться понятием работы или даже только знать об этом понятии. Современный же принцип сохранения энергии является результатом субстанциального понимания работы и всякого вообще изменения в физическом состоянии, освобождающего в случае обратного процесса работу. Сильная потребность в таком понимании, вовсе не необходимом, но формально очень удобном и наглядном, наблюдается у *Р. Майера* и *Джоуля*. Было уже замечено, что обоим исследователям очень близко стало это понимание после наблюдения, что, как получение теплоты, так и механическая работа связаны с тратой вещества. *Майер* говорит: «ex nihilo nil fit», а в другом месте: «создание или уничтожение силы (работы) лежит вне области человеческого действия». У *Джоуля* мы находим следующее место: «Очевидным абсурдом является предположение, будто силы, которыми Бог наделил материю, могут быть разрушены». (It is manifestly absurd to suppose that the powers with which God has endowed matter can be destroyed). В этих положениях хотели видеть попытку метафизического обоснования учения об энергии. Я же вижу в них только формальную потребность в наглядном, поддающемся обзору, простом вычислении, потребность, получившую развитие в области практической жизни и перенесенную затем, насколько это было возможно, в область науки. В самом деле, *Майер* пишет *Гризитеру*: «Наконец, если ты спросишь меня, как я пришел к этому, то вот весь ответ: во время своего морского путешествия я был почти исключительно занят изучением физиологии и принял новое учение на том достаточном основании, что живо почувствовал потребность в нем» ...

Субстанциальное понимание работы (энергии) отнюдь не необходимо и нельзя сказать, чтобы потребность в такого рода понимании уже разрешала

задачу. Напротив, мы видим, как *Майер* работает над постепенным удовлетворением своей потребности. Он считает первоначально количество движения ($m.v.$) эквивалентным работе и только впоследствии приходит к мысли о живой силе. В области электричества он не мог найти выражения, эквивалентного работе. Это сделал позже *Гельмгольц*. Таким образом, сначала существует формальная потребность и воззрение на природу только постепенно к ней приспособливается.

Вскрытие экспериментального, логического и формального корня современного принципа сохранения энергии должно существенным образом содействовать устранению мистики, от которой все еще не свободен этот принцип. Что касается нашей формальной потребности в простейшем, нагляднейшем субстанциальном понимании процессов в окружающей нас среде, то остается еще открытым вопрос, насколько природа отвечает ей, или в какой мере мы можем удовлетворить ей. На основании одного из предыдущих рассуждений, следует думать, что субстанциальное понимание принципов энергии, подобно субстанциальному воззрению на теплоту *Блэка*, имеет свои естественные границы в фактах, за пределами которых оно может быть удержано только искусственно.

Информация и правила для авторов

Общие положения

Журнал «Наноструктуры. Математическая физика и моделирование» (сокращенно: НМФМ) публикуется с 2009 года и является периодическим научным изданием. Электронная версия журнала размещается на сайте <http://www.nano-journal.ru>. Основная цель издания: представление новых теоретических и вычислительных методов моделирования наноструктур и мягкой материи, общих подходов в исследовании мезосистем, а также ключевых экспериментальных результатов в данной области и связанных с этим проблем математической физики.

Журнал НМФМ имеет междисциплинарный характер и в силу этого несет определенную образовательную направленность, а не только узко научную. Работы, представляемые в журнал, должны содержать вводные сведения, которые обеспечат понимание постановок задач и восприятие результатов не только прямыми специалистами. Определения понятий, объяснение обозначений и терминов, оценки характерных параметров, теоретические предпосылки и идеи, используемые методы, и т.п., должны быть кратко объяснены в тексте статьи, имея в виду читателей, специализирующихся в иных направлениях. Должны быть описаны базовые математические модели и уравнения. Во Введении и в последующих разделах очерчивается стратегия и основные трудности, это увязывается с используемыми моделями. Структура статьи ориентируется на прояснение общей логики и методики исследования, содержит резюмирующие выводы. В тексте должны быть рассмотрены характерные примеры (хотя бы, методические), ясно иллюстрирующие предлагаемые алгоритмы.

Журнал публикует научные обзоры, исследовательские статьи и краткие научные сообщения, а также избранные аналитические и информационно-образовательные материалы, тексты докладов и циклов лекций, прочитанных в университетах, научных центрах, на школах-семинарах, конференциях, нигде ранее не публиковавшиеся и не принятые к публикации в других изданиях. Язык публикации в журнале НМФМ, как правило, русский. Работы, представляемые в журнал, не могут иметь научно-популярный или компилятивный характер. Все статьи рецензируются и могут быть отклонены редколлегией журнала. В случае принятия работы к печати ее авторы передают издательству журнала НМФМ право на разовую безвозмездную публикацию текста и его размещение в электронной версии на сайте журнала. Перевод опубликованных в журнале статей на другие языки может осуществляться только с разрешения и при участии авторов.

Порядок представления статей

- В редакцию изначально представляются:
 - файл статьи, файлы с иллюстрациями;
 - сопроводительное письмо, можно в электронной форме, содержащее сведения об объеме статьи и обо всех авторах (фамилии, имена, отчества, полные названия мест работы, почтовый адрес с индексом, номер контактного телефона с кодом города, электронный адрес автора, ответственного за переписку с редакцией); предпочтительно, чтобы это письмо было выполнено на бланке учреждения, в котором работает кто-то из авторов, было заверено печатью и содержало утверждение о возможности открытого опубликования статьи;
 - файл с переводом на английский язык названия статьи, фамилий и инициалов авторов, аннотации, ключевых слов.
- Авторские файлы могут быть присланы на электронный адрес: papers@nano-journal.ru; (резервный адрес в случаях затруднений с пересылкой: nano@miem.edu.ru) или переданы в редакцию на любом электронном носителе. Авторы получают из редакции подтверждение о получении их материалов.
- Телефон (факс) редакции: +7 (495) 916-8876. Адрес редакции: Москва 109028, Б. Трехсвятительский пер., 3/12, Московский институт электроники и математики (МИЭМ), комн. 449.

Общие требования к представляемым файлам

- Допускается использование текстовых редакторов WORD и LATEX. К рабочим файлам должна быть приложена их pdf-копия. В названии файлов используется латинский алфавит, пробелы заменяются знаком `_`. Шапка статьи содержит название, инициалы и фамилии авторов, место работы, электронный адрес, краткую аннотацию, ключевые слова. В аннотации не следует использовать формулы и ссылки на текст работы или список литературы; в конце она должна содержать индекс УДК (к английской версии аннотации можно добавить индексы зарубежных рубрикаторов).
- Объем кратких сообщений 4-8 страниц, исследовательских статей, как правило, до 20 страниц, а обзоров – более 20 страниц. Верхняя граница согласуется с редколлегией. При подсчете объема нужно ориентироваться на страницы формата А4, шрифт 12, знаков в строке 80, интервалов между строками 1.
- Авторы не должны злоупотреблять сокращениями, составленными из заглавных начальных букв терминов. Предпочтительней каждый раз использовать полное наименование объекта. Возможно использование только устоявшихся аббревиатур.

Требования к файлам Word

- Рекомендуемый шрифт – Times New Roman.
- Строки в пределах абзаца не должны разделяться символом возврата каретки (Enter).
- Нельзя использовать автоматическое создание сносок, автоматический перенос или автоматический запрет переносов, создание списков, автоматический отступ и т.п.
- Ссылки на список литературы даются цифрами в квадратных скобках: [1], [5,6,7], [1-9].
- Все без исключения формулы и обозначения размерности, даже состоящие из одной латинской буквы, и в тексте и вынесенные в отдельную строку, всегда набираются в формульном редакторе и никогда – в обычном текстовом редакторе.

- При создании таблицы рекомендуется использовать возможности Word или MS Excel. Таблицы, набранные вручную (с помощью большого числа пробелов), не принимаются.

Требования к иллюстрациям

- Иллюстрации представляются в отдельных файлах, черно-белыми. Они должны иметь разрешение не менее 600 dpi.
- Форматы файлов – TIFF, EPS, PSD, JPEG.

Требования к списку литературы

- Ф.И.О. авторов или редакторов выделяются курсивом.
- Для статей приводится название. Названия отделяются от выходных данных знаком //. Расположение выходных данных указано на образце ниже. Номер тома выделяется жирным шрифтом, номер выпуска дается в скобках. Указываются номера первой и последней страниц статьи, либо уникальный номер статьи и ее объем. Для книг желательно указывать их объем. Если известна ссылка на электронный архив или сайт, то ее желательно указать.

Фамилия И.О. Название статьи // Назв. журн., 2000, **1** (1), 1-6.

Family F.M. and Family F. Title of the paper // Name of the Journal, 2006, **73**, 165313, 9 pp.

Фамилия И.О., Фамилия И.О. Название книги // Наука, С.-П., 1999, 176 стр.

Family F.M. Title of the paper // In book: Family F.M. (et al. eds), Title of the collection, Publisher, Boston, 2005, 9-24.

Family F.M. (ed.), Title of the collection // Publisher, N.Y., 2005, 324 pp.

Фамилия И.О. Название доклада // Доклад на конференции «Название конференции (место и дата проведения)»; ссылка на электронный ресурс.

Наноструктуры. Математическая физика и моделирование

Журнал зарегистрирован

в Министерстве РФ по делам печати,
телерадиовещания и средств массовых коммуникаций.

Свидетельство о регистрации

ПИ № ФС77-34934 от 29 декабря 2008 г.

Учредители

Московский институт электроники и математики (МИЭМ),

Европейский центр по качеству

Издатель

Европейский центр по качеству

ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛ НМФМ

На следующее полугодие подписаться на журнал можно в любом отделении связи по каталогу
Агентства Роспечать «Журналы России»,

рубрика «Физико-математические науки», подписной индекс 70017.

Редакция предлагает подписчикам возможность безвозмездно получить подборку прошлых
выпусков журнала. Пришлите на электронный адрес nanostructures@hse.ru (или на почтовый адрес:
123458, Москва, ул. Таллинская, д. 34, каб. 429, редакция журнала НМФМ)
копию подписной квитанции, а также адрес для отсылки выпусков.