

Из истории естествознания *From the History of Science*

DOI: 10.31857/S020596060024560-8

ПОНЯТИЕ ДИССИПАТИВНОЙ СТРУКТУРЫ. КТО ЕГО СФОРМУЛИРОВАЛ?

ПЕЧЕНКИН Александр Александрович – *Институт истории естествознания и техники им. С. И. Вавилова РАН; Россия, 125315, Москва, ул. Балтийская, д. 14; эл. почта: a_pechenk@yahoo.com*

© А. А. Печенкин

Судя по ссылкам и научным словарям, понятие диссипативной структуры – одно из важных понятий современного естествознания. Присутствует оно и в философской литературе. Традиционно его связывают с публикациями И. Пригожина и его соавторов, относящимися к 70–80-м гг. прошлого века. Однако в последнее время в связи с понятием диссипативной структуры стало упоминаться имя еще одного крупного представителя науки прошлого века, одного из создателей современной компьютерной науки А. Тьюринга, опубликовавшего в 1952 г. статью о морфогенезе. Мы принимаем, что понятие диссипативной структуры исторически восходит к этой статье Тьюринга. Однако концептуальный аппарат, в рамках которого было сформулировано понятие диссипативной системы, берет начало в статьях И. Пригожина и его соавторов.

Ключевые слова: А. Тьюринг, И. Пригожин, диссипативная структура, диссипативная система, нелинейная неравновесная термодинамика, морфогенез, химическая кинетика, диффузия, дифференциальные уравнения, устойчивость, симметрия.

Статья поступила в редакцию 13 февраля 2022 г.

THE CONCEPT OF DISSIPATIVE STRUCTURES – FORMULATED BY WHOM?

PECHENKIN Alexander Alexandrovich – *S. I. Vavilov Institute for the History of Science and Technology, Russian Academy of Sciences; Ul. Baltiyskaya, 14, Moscow, 125315, Russia; E-mail: a_pechenk@yahoo.com*

© А. А. Pechenkin

Abstract: The concept of dissipative structures may be regarded as one of the important concepts in modern science. It is also present in philosophical literature as well as in scientific journalism. This concept is traditionally associated with the works of Ilya Prigogine and his colleagues, published in the 1970s–1980s. Recently, however, the name of Alan Turing, a major figure in the 20th century science and one of the founders of modern computer science who in 1952 published a paper on morphogenesis, began to be mentioned in connection with the notion of dissipative structures. We agree that this notion can be traced back to this paper by Turing. However, the concept of dissipative systems was formulated within the conceptual framework of Prigogine and his co-authors.

Keywords: A. Turing, I. Prigogine, dissipative structure, dissipative system, nonlinear non-equilibrium thermodynamics, morphogenesis, chemical kinetics, diffusion, differential equations, stability, symmetry.

For citation: Pechenkin, A. A. (2023) Poniatie dissipativnoi struktury. Kto ego sformuliroval? [The Concept of Dissipative Structures – Formulated by Whom?], *Voprosy istorii estestvoznaniia i tekhniki*, vol. 44, no. 1, pp. 9–19, DOI: 10.31857/S020596060024560-8.

Понятие диссипативной структуры

Понятие диссипативной структуры присутствует в физико-математической, химической, теоретико-биологической и вообще естественно-научной литературе, а также в философии и в научной журналистике. Что же означает термин «диссипативная структура»?

Здесь уместно сослаться на сочинения И. Пригожина и соавторов, которые, собственно, и ввели сам термин «диссипативная структура». В этих сочинениях понятие диссипативной структуры – это термодинамическое понятие. Точнее, это понятие принадлежит нелинейной неравновесной термодинамике, которую развивал Пригожин, сотрудничая с рядом специалистов по термодинамике и прикладной математике. Понятие диссипативной структуры вошло в лексикон современной физики. Соответственно, оно стало модифицироваться, включаясь в самые разные контексты. Тем не менее есть некое общепринятое содержание этого понятия, для определения которого уместно обратиться к самому Пригожину и его соавторам.

Как и следовало ожидать, – пишут П. Гленсдорф и И. Пригожин, – устойчивость термодинамического равновесия обеспечивает устойчивость и *вблизи* (здесь и далее курсив в оригинале. – А. П.) равновесия <...> Возможность появления новых типов организации материи за точкой неустойчивости под влиянием неравновесных условий возникает только тогда, когда система находится достаточно далеко от равновесия. Изучение такой новой организации, так называемой *диссипативной структуры*, возникающей благодаря обмену энергией

и веществом с окружающей средой, представляет одну из наиболее привлекательных задач макроскопической физики ¹.

Не следует смешивать понятия «диссипативная структура» и «диссипативная система». Под диссипативной системой понимают систему, в которой происходит диссипация – рассеяние энергии, причем рассеяние без конвекции (в ряде публикаций здесь имеется путаница).

В книге И. Пригожина и Г. Николиса дается более развернутое определение диссипативной структуры:

Представим <...> процесс, вызывающий систематическое отклонение от равновесия, например увеличение некоторого характеризующего состояние параметра <...> Согласно теореме о минимальном производстве энтропии, близкие к равновесию стационарные состояния асимптотически устойчивы <...> В силу непрерывности эта ветвь, называемая в дальнейшем *термодинамической ветвью* (здесь и далее курсив в оригинале. – А. П.), простирается в *конечной* области равновесного состояния. Однако после некоторого критического значения λ_c нельзя исключить возможность того, что термодинамическая ветвь станет неустойчивой <...> Новый устойчивый режим, устанавливающийся в системе, может соответствовать упорядоченному состоянию <...>

...как удаленность от равновесия, так и нелинейность могут служить причиной возникновения упорядоченности в системе <...> Будем называть упорядоченные конфигурации, появляющиеся вне области устойчивости термодинамической ветви, *диссипативными структурами* ².

В книге Ю. Л. Климонтовича отмечается следующее:

В физике известно очень много примеров образования более упорядоченных состояний в ходе неравновесных процессов. При этом упорядочение может происходить как во времени, например возникновение предельных циклов в автоколебательных системах, так и в пространстве – стоячие страты в газовых разрядах, ячейки Бенара при конвективном движении в жидкостях <...> И. Р. Пригожин назвал такие упорядоченные образования *диссипативными структурами* (курсив в оригинале. – А. П.) ³.

Почти в тех же терминах понятие диссипативной структуры описано в статье, опубликованной в «Большой российской энциклопедии». Ее автор – Д. С. Чернавский, работавший в области биофизики. Правда, статья уже упоминает А. Тьюринга как исходную фигуру в истории понятия «диссипативная структура».

Диссипативные структуры, – пишет Д. С. Чернавский, – устойчивые пространственно неоднородные структуры, возникающие в результате развития

¹ Гленсдорф П., Пригожин И. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций. М.: Мир, 1973. С. 80.

² Николис Г., Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах. От диссипативных структур к упорядоченности через флуктуации. М.: Мир, 1979. С. 69, 71–72.

³ Климонтович Ю. Л. Статистическая физика. М.: Наука, 1982. С. 330.

неустойчивостей в однородной неравновесной *диссипативной среде* (курсив в оригинале. – А. П.) ⁴.

Понятие диссипативной структуры присутствует и в философской литературе. Так, В. С. Степин отмечает:

Реализация комплексных программ порождает особую ситуацию сращивания в единой системе деятельности теоретических и экспериментальных исследований, прикладных и фундаментальных знаний, интенсификации прямых и обратных связей между ними <...> В этом процессе постепенно стираются жесткие разграничительные линии между картинами реальности, определяющими видение предмета той или иной науки. Они становятся взаимозависимыми и предстают в качестве фрагментов целостной общенаучной картины мира.

На ее развитие оказывают влияние не только достижения фундаментальных наук, но и результаты междисциплинарных прикладных исследований. В этой связи уместно, например, напомнить, что идеи синергетики, совершившие переворот в системе наших представлений о природе, возникали и разрабатывались в ходе многочисленных прикладных исследований, выявивших эффекты фазовых переходов и образования диссипативных структур (структуры в жидкостях, химические волны, лазерные пучки, неустойчивости плазмы, явления выхлопа и флаттера) ⁵.

Вопрос о том, кто был первым

Одним из свидетельств в пользу значимости понятия «диссипативная структура» служит дискуссия, имеющая историко-научный характер, дискуссия о том, кто же первый описал то явление, которое Пригожин, Гленсдорф и Николис описали как «диссипативная структура»? Приведенные выше цитаты свидетельствуют в пользу того, что именно три указанных физика впервые зафиксировали то явление, которое получило название «диссипативная структура».

Однако есть и другая точка зрения. В 2018 г. на английском языке вышла книга автора настоящей статьи «История исследования химических периодических процессов» ⁶. Автор послал экземпляр этой книги американскому физико-химику, профессору Ричарду Филду, который читал отдельные главы в рукописи, присылал полезные замечания и давал полезные рекомендации. Филд – один из создателей концепции механизма реакции Белоусова – Жаботинского (механизм Филда – Короса – Нойеса), одной из первых химических реакций, ставших моделью того, что Пригожин с соавторами называл диссипативной структурой (собственно говоря, в книге Гленсдорфа

⁴ Чернавский Д. С. Диссипативные структуры // Большая российская энциклопедия / Ред. Ю. С. Осипов. М.: Научное издательство «Большая российская энциклопедия», 2007. Т. 9. С. 74.

⁵ Степин В. С. Теоретическое знание. М.: Прогресс-Традиция, 2003. С. 627–628.

⁶ Pechenkin A. The History of Research on Chemical Periodic Processes. Cham: Springer Nature, 2018.

и Пригожина рассматриваются лишь две модели диссипативных структур — ячейки Бенара и реакция Белоусова — Жаботинского).

Филд считает, что первым зафиксировал явление диссипативной структуры английский математик, один из создателей современной компьютерной математики А. Тьюринг. Он указывал на следующее:

В 1952 г. появилась статья А. М. Тьюринга «Химические основы морфогенеза», в которой сообщалось, что сочетание химических колебаний с диффузией молекул может приводить к появлению пространственных структур, в которых области низких и высоких концентраций чередуются. Тьюринг поставил перед собой теоретическую задачу: могут ли в реакторе в условиях химической реакции образовываться устойчивые конфигурации промежуточных продуктов? И дал положительный ответ, создав математическую модель процесса. Должного значения этой работе тогда не придали...⁷

Филд обратил внимание автора настоящей статьи на то, что эта позиция уже высказывалась в литературе, например в статье группы авторов 2002 г. Прочитируем начало этой статьи:

В настоящее время широко исследуется формирование структур, находящихся далеко от термодинамического равновесия, т. е. формирование диссипативных структур (Пригожин, Гленсдорф (1971), Пригожин и Николис (1977)). Эти структуры, поддерживаемые постоянным обменом со средой массой и энергией, характеризуются пространственной и / или временной модуляцией их свойств (температуры, концентрации, скорости и т. д.). Однако наше понимание этих структур уже давно вышло за пределы таких парадигмальных структур, как ячейки Бенара.

Особый класс самоорганизующихся систем составляют системы, генерируемые диффузионной неустойчивостью, рассмотренные Тьюрингом в 1952 г. Спонтанная неустойчивость гомогенной смеси реагентов ведет, когда некоторый параметр переступает пороговое значение, к стационарным пространственно периодическим структурам концентраций реагентов. Чтобы объяснить такую нарушающую симметрию неустойчивость, химической кинетике приходится допустить некоторый род обратной связи, управляемой активирующими реагентами, которые ускоряют свои собственные изменения, причем последние подавляются ингибирующим процессом...⁸

Вышеприведенная оценка работ Тьюринга отличается от той, которую дают Гленсдорф и Пригожин:

...вопрос об устойчивости по отношению к диффузии впервые исследовал Тьюринг <...> в замечательной работе «О химической основе морфогенеза». Тьюринг действительно доказал наличие переходов с нарушением симметрии в ряде случаев. Однако до сих пор аргументы Тьюринга были применимы

⁷ Из личной переписки автора с Р. Филдом.

⁸ Borckmans P., Dewel G., De Wit A., Dulos E., Boissonade J. Gauffre F., De Kepper P. Diffusive Instabilities and Chemical Reactions // International Journal of Bifurcation and Chaos. 2002. Vol. 12. No. 11. P. 2307–2332.

лишь к морфогенезу <...> С точки зрения нашего подхода неустойчивость Тьюринга – всего лишь одно из явлений, связанных с разрушением термодинамической ветви ⁹.

Подробнее о вкладе Тьюринга сказано в книге Николиса и Пригожина, в которой больше места уделено биологическим приложениям нелинейной термодинамики. Они пишут, что вопрос о диффузионной устойчивости был исследован Тьюрингом в его работе по химическим основам морфогенеза и это был один из первых когда-либо изучавшихся примеров диссипативной структуры ¹⁰. Но они отмечают, что

Тьюринг показал необходимость нелинейности взаимодействия между морфогенетическими веществами. Однако в его модели не выполняется условие надкритической бифуркации однородного стационарного состояния, принадлежащего термодинамической ветви, если соответствующее собственное значение имеет нечетную кратность ¹¹.

Настоящая статья носит историко-научный характер. Мы не ставим перед собой задачу проследить цепь логических рассуждений, содержащихся в текстах, написанных Тьюрингом, с одной стороны, и Пригожиным и его соавторами – с другой. Настоящая статья демонстрирует тот факт, что Тьюринг предвосхитил то явление, которое Пригожин и его соавторы выразили затем в понятии «диссипативная структура». И Тьюринг, и Пригожин с соавторами пришли к концепции, касающейся спонтанного формирования устойчивых динамических структур. Однако они работали в рамках различных (хотя и пересекающихся) концептуальных механизмов – Тьюринг занимался математическим моделированием на языке дифференциальных уравнений, привлекая законы химической кинетики и уравнение диффузии, а для Пригожина и его соавторов главным было развитие аппарата термодинамики.

Методология А. Тьюринга

В отличие от предшественников, занимавшихся проблемой морфогенеза, Тьюринг исходил из самых общих представлений математики и физики. Он использовал аппарат теории дифференциальных уравнений, закон действующих масс (основной закон химической кинетики), уравнение диффузии и математическое понятие устойчивости.

Процитируем резюме статьи Тьюринга:

Предполагается, что система химических веществ, называемых морфогенами, реагируя друг с другом и диффундируя через ткань, адекватно объясняет главное в явлении морфогенеза. Такая система (которая первоначально может быть совершенно гомогенной) может впоследствии из-за неустойчивости гомогенного равновесия образовать структуру, которая запускается случайными

⁹ Гленсдорф, Пригожин. Термодинамическая теория структуры... С. 226–227.

¹⁰ Николис, Пригожин. Самоорганизация в неравновесных системах... С. 21.

¹¹ Там же. С. 431.

беспорядочными возмущениями. Такая реакционно-диффузионная система подробно рассматривается на примере изолированного кольца клеток, пригодного для математизации, но непонятного с биологической точки зрения <...> Мы рассматриваем главным образом развитие неустойчивости. Выясняется, что существуют шесть существенно различных форм, которые система способна принять. Наиболее интересная форма стационарных волн появляется в случае кольца. Предполагается, что именно это может объяснять, например, узоры щупалец гидры и мутовчатые листья. Мы также рассматриваем систему реакция – диффузия на сфере. Такая система, видимо, ответственна за гастрюляцию ¹² <...>

Цель настоящей статьи – обсудить механизм, посредством которого гены зиготы могут определить анатомическую структуру того организма, который формируется. В ней не вводится каких-либо новых гипотез, в ней предполагается, что ряда известных физических законов достаточно, чтобы объяснить известные факты... ¹³

Предшественники Тьюринга не достигли столь общего подхода и использовали понятие организующего начала, которое сочувственно цитируют Николис и Пригожин в главе, посвященной морфогенезу. Тьюринг был далек от гипотез *ad hoc* типа гипотезы Шаллера и Гирера о том, что вдоль тела гидры существует градиент некоего вещества, активирующего процесс образования головы гидры. Эту гипотезу также упоминают Николис и Пригожин ¹⁴.

Концептуальный аппарат А. Тьюринга

Тьюринг подчеркивал, что его концептуальный аппарат не предполагает каких-либо физико-математических инноваций. Это стандартный аппарат макроскопической физики и химической кинетики.

Тьюринг перечисляет следующие исходные посылки:

- 1) изменения пространственных координат и скоростей задаются ньютоновскими уравнениями движения;
- 2) давление задается эластичными свойствами и движением вещества, при этом принимается во внимание осмотическое давление, следующее из данных химической кинетики;
- 3) кинетика химических реакций подчиняются закону действующих масс;
- 4) диффузия химических веществ в регионы, где возможна диффузия, рассчитывается исходя из математики и химии.

Однако даже такая конструкция оказывается слишком сложной для математических расчетов и требует дальнейших упрощений. «Мы, — пишет

¹² Мутовчатые листья — листья, которые располагаются по три и более на каждом узле стебля. Гастрюляция — обособление эктодермы и энтодермы у многоклеточных животных в ходе эмбрионального развития.

¹³ Turing A. M. The Chemical Basis of Morphogenesis // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences. 1952. Vol. 237. No. 641. P. 37.

¹⁴ Николис, Пригожин. Самоорганизация в неравновесных системах... С. 440.

Тьюринг, — концентрируем внимание на ситуациях, в которых химические и механические процессы могут считаться независимыми»¹⁵.

Функции генов предполагаются чисто каталитическими. Гены катализируют продукты других морфогенов, которые, в свою очередь, тоже становятся катализаторами.

Что соответствует диссипативной структуре в статье А. Тьюринга?

Тьюринг не пользуется ни понятием «диссипативная структура», ни каким-либо аналогом этого понятия. Что же можно назвать диссипативной структурой, читая статью Тьюринга? Результаты морфогенеза? Ритмические структуры, образовавшиеся в результате этого процесса?

Диссипативную структуру, или точнее то, что Пригожин с соавторами называет диссипативной структурой, составляет сам процесс морфогенеза. У Гленсдорфа и Пригожина примерами диссипативных структур служат ячейки Бенара и реакция Белоусова — Жаботинского (только два примера). В книге Николиса и Пригожина число примеров увеличивается. Однако примера, который воспроизводил бы рассуждения Тьюринга, эта книга не содержит.

Тьюринг теоретически продемонстрировал, что биологически однородные клетки дифференцируются и меняют структуру благодаря процессу, который описывается по схеме «реакция — диффузия».

Система рассматривается как состоящая из некоторого числа химических веществ (морфогенов), диффундирующих через массу ткани некоторой геометрической формы и взаимодействующих друг с другом внутри нее. Какие законы управляют ситуацией? Диффузия подчиняется обычному закону диффузии — скорость ее пропорциональна градиенту концентрации, а также диффузионной способности вещества. Иными словами, каждый морфоген движется из региона, где концентрация больше, в регион с меньшей концентрацией со скоростью, пропорциональной градиенту концентрации и диффузионной способности субстанции. Это очень похоже на прохождение тепла, причем коэффициент диффузии соответствует теплопроводности. Если бы не границы клетки, диффузионные способности были бы пропорциональны квадратным корням молекулярных весов.

Воспользуемся популярным представлением того, что в статье Тьюринга могло бы быть названо диссипативной структурой:

Представим себе поле с совершенно сухой травой, кишашую кузнечиками. Небольшой огонь вспыхивает на одном участке поля, и кузнечики стремятся прочь, чтобы спастись от огня. Когда насекомые прыгают, они потеют и смачивают траву на своем пути. Огонь перепрыгивает на другой участок поля. И кузнечики стремятся оттуда, создавая еще один островок влажной травы.

Теперь представим себе вид поля сверху. То, что сначала представляло как однородная поверхность, сейчас испещрено узорами из сгоревшей и несгоревшей травы. Это Тьюрингова модель реакции — диффузии. Огонь

¹⁵ Turing. The Chemical Basis... P. 38.

представляет собой активатор, кузнечики – ингибитор. Реакция распространяется через ряд клеток, активируя одни и ингибируя другие, и то, что раньше было тождественным, становится различным <...>

Сет Фрэден (Fraden), профессор физики, и Ирв Эпштейн (Epstein) <...> профессор химии, создали массивы из искусственных, подобных клеткам структур, в которых протекают активирующая и ингибирующая химические реакции, чтобы проверить модель Тьюринга. Они обнаружили все шесть структур, предсказанных Тьюрингом, и седьмую не предсказанную¹⁶.

Итак, в своей статье Тьюринг посредством аппарата нелинейных дифференциальных уравнений построил математическую схему «реакция – диффузия». Пространственная неоднородность спонтанно возникает из системы «реакция – диффузия». Никакого толчка или сигнала не требуется. Важно следующее. Если не учитывать диффузию, то реакция стремится к некоторому устойчивому состоянию, причем скорости синтеза и распада зависят от концентраций соответствующих веществ. Полная картина, однако, требует учета диффузии. Пространственная неоднородность возникает, если скорости диффузии веществ, участвующих в реакции, не равны.

Тьюринг показал, что пространственно-однородная структура может генерировать пространственную неоднородность. Обычно диффузия приводит к гомогенности. Тьюринг зафиксировал противоположную ситуацию, при которой диффузия приводит к неоднородности.

А. М. Жаботинский о статье А. Тьюринга о морфогенезе

Реакция, открытая Б. П. Белоусовым в 1951 г. (которая, как мы отмечали, оказалась главным примером того, что Пригожин с соавторами называли диссипативной структурой), была воспроизведена и изучена А. М. Жаботинским. Эта реакция была для него предметом как экспериментального изучения, так и теоретического осмысления.

Хотя Жаботинский был в курсе исследований Гленсдорфа, Николиса и Пригожина, он не шел по пути нелинейной неравновесной термодинамики. Жаботинский развивал подход теории динамических систем. Его аппарат – это качественная теория дифференциальных уравнений, развитая А. А. Андроновым на базе работ А. Пуанкаре. Андронов получил решение задачи о нелинейном осцилляторе, применяемом в радиотехнике, в виде замкнутой кривой в фазовом пространстве, точнее – в виде предельного цикла Пуанкаре (Андронов назвал колебания напряжения в ламповом генераторе автоколебаниями, имея в виду невынужденные незатухающие колебания). Жаботинскому не удалось добиться столь высокого уровня математической ясности и лапидарности. Однако в ходе поисков он сделал много для прояснения механизма открытой Белоусовым реакции. В идейном плане эта реакция стала трактоваться как автоколебательная реакция. В центре этой методологии лежит «фазовый портрет» дифференциального уравнения. Открытая

¹⁶ Burrow L. Turing's Theory of Morphogenesis Validated. March 10, 2014 // <https://www.brandeis.edu/now/2014/march/turingpnas.html>.

Белоусовым реакция предстает в его работах как аналог предельного цикла Пуанкаре на фазовой плоскости, заданной концентрацией и скоростью изменения концентрации.

Однако Жаботинский упоминает исследование Тьюринга в последней главе своей книги, которая посвящена не автоколебаниям, а автоволнам:

Ниже будут рассмотрены активные распределенные системы, т. е. такие, в которых каждый элемент пространства является автоколебательной или потенциально автоколебательной системой, триггером или другим устройством такого типа <...> Р. В. Хохлов предложил называть такие процессы автоволновыми по аналогии с автоколебаниями в сосредоточенных системах ¹⁷.

Подводя итог этой главы, Жаботинский пишет:

Выше показано, что в нелинейных распределенных системах с диффузионным типом связи могут существовать стационарные режимы, вид которых не зависит от начальных условий. От начальных условий зависит только сам факт существования определенного режима. Режимы такого типа являются: 1) одиночная бегущая волна <...> 2) бегущие волны в кольцевых системах, 3) структуры Тьюринга ¹⁸.

Структуры Тьюринга Жаботинский характеризует, следуя тексту самого Тьюринга:

Многие животные, например кишечнорастворимые, черви, многоножки и другие, имеют почти периодическое строение. Тьюринг предположил, что эта периодичность является следствием периодического распределения некоторого вещества, влияющего на рост ткани, – морфогена <...> Он показал, что периодическое в пространстве и стационарное во времени распределение концентраций может устанавливаться в первоначально однородной системе, где химические реакции сочетаются с диффузией ¹⁹.

Заключение

Статья Тьюринга о морфогенезе стала отправной точкой для формирования нового направления в биофизических исследованиях морфогенеза и связанных с ним проблем ²⁰. Однако техника оформления понятия «диссипативная структура» восходит к Пригожину и его соавторам.

Выше упоминалась статья Чернавского, опубликованная в «Большой российской энциклопедии» и соотносящая появление понятие диссипативной

¹⁷ Жаботинский А. М. Концентрационные автоколебания. М.: Наука, 1974. С. 145.

¹⁸ Там же. С. 167.

¹⁹ Там же. С. 164.

²⁰ См.: Chernavskii D. S., Ruijgrok Th. W. Dissipative Structures in Morphogenetic Models of the Turing Type // Journal of Theoretical Biology. 1978. Vol. 73. Iss. 4. P. 585–607; Edelstein B. B. Instabilities Associated with Dissipative Structure // Journal of Theoretical Biology. 1970. Vol. 26. Iss. 2. P. 227–241.

структуры со статьей Тьюринга, появившейся в 1952 г. В книге Жаботинского результаты Тьюринга передаются на языке автоволн.

Настоящая статья, однако, носит историко-научный характер (это было отмечено выше). Мы не ставим перед собой задачу провести аналитический обзор биологической и биофизической литературы и логический анализ понятия «диссипативная структура». Мы лишь подчеркиваем, что статья Тьюринга о морфогенезе несла иную терминологическую трактовку того, что Пригожин соавторами впоследствии называли диссипативными структурами, и со временем она стала отправной точкой для ряда биофизических публикаций.

References

- Borckmans, P., Dewel, G., De Wit, A., Dulos, E., Boissonade, J., Gauffre, F., and De Kepper, P. (2002) Diffusion Instabilities and Chemical Reactions, *International Journal of Bifurcation and Chaos*, vol. 12, no. 11, pp. 2307–2329.
- Burrow, L. (2014) Turing's Theory of Morphogenesis Validated, <https://www.brandeis.edu/now/2014/march/turingpnas.html>.
- Chernavskii, D. S. (2007) Dissipativnye struktury [Dissipative Structures], in: Iu. S. Osipov (ed.) *Bol'shaia rossiiskaia entsiklopediia [Great Russian Encyclopedia]*. Moskva: Nauchnoe izdatel'stvo "Bol'shaia rossiiskaia entsiklopediia", vol. 9, p. 74.
- Chernavskii, D. S., and Ruijgrok, Th. W. (1978) Dissipative Structures in Morphogenetic Models of the Turing Type, *Journal of Theoretical Biology*, vol. 73, no. 4, pp. 585–607.
- Edelstein, B. B. (1970) Instabilities Associated with Dissipative Structure, *Journal of Theoretical Biology*, vol. 26, no. 2, pp. 227–241.
- Glensdorf, P., and Prigozhin, I. (Glansdorff, P., and Prigogine, I.) (1973) *Termodinamicheskaya teoriia struktury, ustoychivosti i fluktuatsii [Thermodynamic Theory of Structure, Stability and Fluctuations]*. Moskva: Mir.
- Klimontovich, Iu. L. (1982) *Statisticheskaya fizika [Statistical Physics]*. Moskva: Nauka.
- Nikolis, G., and Prigozhin, I. (Nicolis, G., and Prigogine, I.) (1979) *Samoorganizatsiia v neravnovesnykh sistemakh. Ot dissipativnykh struktur k uporiadochennosti cherez fluktuatsii [Self-Organization in Nonequilibrium Systems. From Dissipative Structures to Order through Fluctuations]*. Moskva: Mir.
- Pechenkin, A. (2018) *The History of Research on Chemical Periodic Processes*. Cham: Springer Nature.
- Stepin, V. S. (2003) *Teoreticheskoe znanie [Theoretical Knowledge]*. Moskva: Progress-Traditsiia.
- Turing, A. M. (1952) The Chemical Basis of Morphogenesis, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, vol. 237, no. 641, pp. 37–72.
- Zhabotinskii, A. M. (1974) *Kontsentratsionnye avtokolebaniia [Concentrational Self-Oscillations]*. Moskva: Nauka.

Received: February 13, 2022.