

томатизация и энергосбережение». 13–15 марта 2012 г. – Вологда, 2012. – С. 174 – 177.

3. Карпов, С.В. Высокоэффективные циклонные устройства для очистки и теплового использования газовых выбросов / С.В. Карпов, Э.Н. Сабуров. – Архангельск, 2002.

4. Сабуров, Э.Н. Циклонные нагревательные устройства с интенсифицированным конвективным теплообменом / Э.Н. Сабуров. – Архангельск, 1995.

5. Сабуров, Э.Н. Теория и практика циклонных сепараторов, топок и печей / Э.Н. Сабуров, С.В. Карпов ; под ред. Э.Н. Сабурова. – Архангельск, 2000.

6. Смирнов, Е.М. Течения вязкой жидкости и модели турбулентности: методы расчета турбулентных течений / Е.М. Смирнов, А.В. Гарбарук. – СПб, 2010.

7. Hellsten, A. Some Improvements in Menter's k-omega SST Turbulence Model / A. Hellsten // AIAA-98-2554, 1998.

8. Qiang, Z. A new simpler rotation/curvature correction method for Spalart–Allmaras turbulence model / Qiang Zhang, Yong Yang // Chinese Journal of Aeronautics. – 2013. – V. 26. – Issue 2. – P. 326 – 333.

9. Sentyabov, A.V. Investigation of turbulence models for computation of swirling flows / A.V. Sentyabov, A.A. Gavrilov, A.A. Dekterev // Thermophysics and aeromechanics. – 2011. – V. 18. – P. 73 – 85.

10. Shalaby, H. Comparative study of the continuous phase flow in a cyclone separator using different turbulence models / H. Shalaby // International journal for numerical methods in fluids. – 2005. – P. 1175 – 1197.

11. Shur, M.L. Turbulence Modeling in Rotating and Curved Channels: Assessing the Spalart-Shur Correction / M.L. Shur, M.K. Streles, A.K. Travin, P.R. Spalart // AIAA Journal. – 2000. – V. 38. – № 5. – P. 784 – 792.

12. Smirnov, P. Sensitization of the SST turbulence model to rotation and curvature by applying the Spalart – Shur correction term / P. Smirnov, F. Menter // Proc. ASME Turbo Expo 2008: Power for Land, Sea and Air, 2008.

13. Wang, B. Numerical study of gas-solid flow in a cyclone separator / B. Wang // Third International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries. – 2003. – P. 371 – 377.

УДК 519.6

А.В. Максимов, О.Г. Максимова, Я.А. Соловьева

## МОДЕЛЬ ТЕПЛОВЫХ СТРУКТУР В ФИЗИКЕ ПЛАЗМЫ, ТЕОРИИ ИНФОРМАЦИИ И ЭКОНОМИКЕ

В работе на основе синергетического подхода для описания эволюции информационных и бизнес-структур применяется модель тепловых структур, используемая в нелинейной физике плазмы и теории горения. Исследованы различные сценарии развития структур: «застоя» – при отсутствии прогресса; «коэволюции» – совместное изменение и сосуществование в ходе их развития; «элиты» – предпочтительное развитие одной структуры; «научно-технической революции (НТР)» как существенный прогресс в развитии всех структур и др.

Синергетика, модель тепловых структур, физика плазмы, теория горения, теория информации, экономика, моделирование.

In this work, based on synergistic approach for the description of evolution of information and business structures, the model of thermal structures applied in nonlinear Physics of plasma and combustion theory is used. The different scenarios of the development of structures have been studied, such as “stagnation” – without progress, “coevolution” – joint change and coexistence in their development, “elite” – a preferred development of one structure; “scientific-technical revolution” as an essential progress in the development of all structures etc.

Synergetic, model of thermal structures, Physics of plasma, combustion theory, information theory, economics, and simulation.

В конце XX в. в теории управления, кибернетике, экономике, социологии и множестве других дисциплин наиболее яркими и важными оказались результаты исследования нелинейных сред, в которых есть только два конкурирующих процесса [3]. Это нелинейный источник  $Q(T)$ , отражающий положительную обратную связь, и диссипативный процесс, нелинейность которого определяется коэффициентом  $k(T)$  в уравнении второго порядка:

$$\partial T / \partial t = \partial / \partial x [k(T) \partial T / \partial x] + Q(T) \quad (1)$$

где переменная  $t$  – время, а функции  $k(T)$  и  $Q(T)$  имеют степенной вид:

$$k(T) = k_0 T^\sigma, Q(T) = q_0 T^\beta. \quad (2)$$

Модель (1) называют *моделью тепловых структур*. Ее название связано с происхождением: первоначально она представлялась как упрощенная модель для исследования ряда процессов в физике плазмы и теории управляемого термоядерного синтеза [1]. Эту модель можно использовать для феноменологического описания распространения информации в научном сообществе или развития экономических структур (см. таблицу). В данной работе будет использован простейший вариант модели тепловых структур [3], в котором *источник* не зависит от времени. Показатели степени в уравнении (1)  $\beta > 0$  и

$\sigma > 0$  в теории информации определяют, например, скорость производства новой информации от ее источника и эффективность ее распространения в информационной среде соответственно. Эти показатели и коэффициенты  $k_0 > 0$  и  $q_0 > 0$  предполагаются фиксированными в модели, их можно определить из сравнения с экспериментальными данными, из временного развития конкретного типа структур. Результаты решения уравнения (1) приведены на рис. 1.

Анализ этого решения показывает, что оно существует только в конечный промежуток времени, определяемый, например, плотностью информации в начальный момент времени  $T_0 = T(0)$ . В течение этого времени (его называют квазистационарной стадией) функция  $T$  почти не меняется, и кажется, что вообще ничего не происходит. Но вблизи момента времени  $t_f = 1/(\beta - 1)q_0T_0^{\beta-1}$  – времени «обострения» [1], неустойчивость приобретает взрывной характер: за конечный промежуток времени решение неограниченно возрастает. Поэтому стандартный «линейный» метод прогнозирования и планирования «от достигнутого результата», до сих пор, к сожалению, применяемый в экономических и социальных науках – «посчитай, на сколько процентов изменится некоторая величина, надо домножить этот процент на текущее значение» – здесь неприменим [1]. Напротив, для линейного уравнения ( $\beta = 1$ ) этот метод прекрасно работает (рис. 1), поскольку его решение существует бесконечно долго и роль начальных данных не так для него драматична. Эта модель дает, например, экспоненциальный рост населения в известной теории Мальтуса и его последователей.

Таблица

Интерпретация величин в модели тепловых структур

| Величина          | Физика плазмы     | Теория информации                    | Экономика                           |
|-------------------|-------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|
| $T$               | Температура       | Плотность информации                 | Плотность бизнес-структур           |
| $Q$ – источник    | Тепловой энергии  | Информации                           | Инвестиций                          |
| $k$ – коэффициент | Теплопроводности  | Информационной проводимости общества | Экономической проводимости общества |
| $x$ – координата  | Плазменного шнура | Удаленность агентов информации       | Удаленность бизнес-партнеров        |

В нелинейном случае ( $\beta > 1$ ), напротив, как бы ни была мала разница начальных данных  $T_{01}$  и  $T_{02}$  для решений (траекторий)  $T_1(t)$  и  $T_2(t)$  уравнения (1), она будет стремительно расти с течением времени ( $T_1(t)/T_2(t) \rightarrow \infty$ ), и вторая траектория «безнадёжно отстает» вблизи момента обострения первой ( $t_{f1}$ ).

Системы, в которых существуют эти решения, эволюционируют в разном темпе. Этот сценарий можно образно назвать «нас (их) не догонишь» [4] (в зависимости от соотношения начальных значений  $T_{01}$  и  $T_{02}$ ). Структура с меньшим временем обострения ( $t_f$ ) «выигрывает». Аутсайдеры в своей эволюции остаются «вечно развивающимися» (рис. 1).

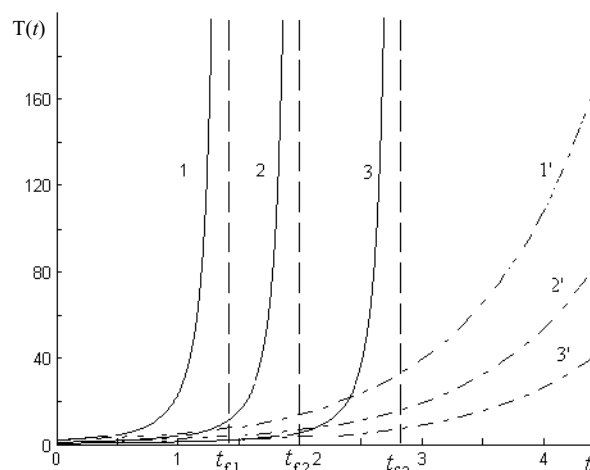


Рис. 1. Решения уравнения (1) в однородном случае при различных начальных данных:  $T_0 = 2; 1,5; 1$  для нелинейной модели ( $\beta = 1,5$ ) – кривые 1, 2, 3 соответственно и линейной модели ( $\beta = 1$ ) в теории Мальтуса – кривые 1', 2', 3' соответственно

В общем случае ( $\partial T / \partial x \neq 0$ ) нелинейное уравнение (1) – уравнение второго порядка – решается уже на основе использования только специальных численных (разностных) методов решения с помощью математического пакета “Mathlab 6.5” на компьютере. Анализ этого решения показывает, что при условии  $\beta < \sigma + 1$  решение неограниченно возрастает и описывает распространяющиеся волны с растущей амплитудой (рис. 2). По мере приближения к моменту обострения (при  $t \rightarrow t_f$ ) эти волны охватывают все пространство (рис. 2а). Такое поведение получило название “HS-режима” – с режима обострением [1]. В «научоведческой» интерпретации оно может соответствовать очень крупному достижению в науке, влияющему на все развитие сообществ (например, такому, как ньютонова механика), или очень удобной технологии, без которой становится трудно обойтись, например, мобильных телефонов.

**Эволюция одной структуры.** При соотношении параметров  $\beta > \sigma + 1$  в модели (1) решение вновь растёт в режиме с обострением, оставаясь локализованным, однако его полуширина сокращается (рис. 2б). Это так называемый LS-режим с обострением [1] – режим локализации и одновременного роста интенсивности процесса во все более узкой области вблизи максимума этого процесса. Он соответствует тому, что научные исследования развиваются настолько быстро, что новое понимание

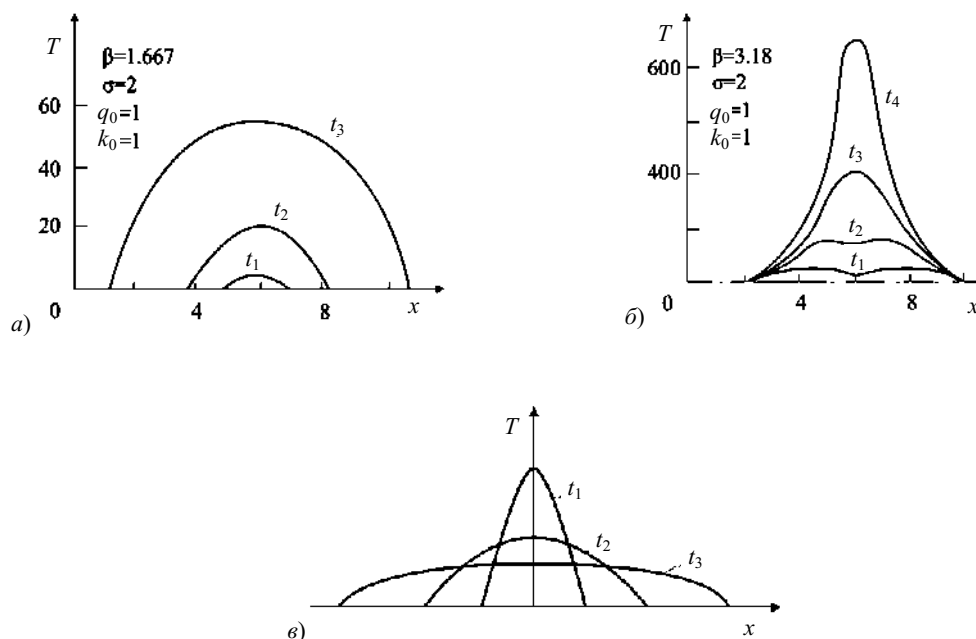


Рис. 2. Процессы, идущие в а) *HS*-режиме ( $\beta < \sigma + 1$ ) и б) *LS*-режиме ( $\beta > \sigma + 1$ ) с обострением [1], в) *HS*-режим без обострения ( $\beta > \sigma + 3$ ) [1]

оказывается сосредоточенным в рамках одной научной «элитной» супершколы. Типичный пример в теоретической физике – рождение квантовой механики, ключевые результаты в которой были получены несколькими учеными-гигантами (Гейзенбергом, Шредингером, Дираком).

Когда нелинейность в модели (1) очень велика ( $\beta > \sigma + 3$ ), может существовать *HS*-режим без обострения [1] – режим, при котором происходит снижение интенсивности процессов, размывания структур их от центра их образования. При этом процессы могут идти в виде волн даже с уменьшающейся амплитудой (рис. 2 в). В этом случае работы в данном научном направлении могут быть очень перспективны. От конкретных результатов проблема сначала переходит на уровень, когда идеи могут «витать в воздухе», но никак не могут найти применения. Но эта ситуация неустойчива, и группа энтузиастов, даже небольшой «продвинутый» студенческий проект, может радикально изменить ситуацию, в этом случае возникает быстрый процесс в *LS*-режиме с обострением [1].

**Эволюция двух структур.** Для двух пространственно-распределенных систем [1], [4] модель (1) следует дополнить начальными данными, например,  $T(x, 0) = T_1(x)$  при  $a_1 < x < b_1$  и  $T(x, 0) = T_2(x)$  при  $a_2 < x < b_2$ , которые означают, что существует значительная часть сообщества, которая не располагает информацией о данном научном направлении (в экономике – с неразвитой инфраструктурой), для которой  $T_0(x) = 0$  при  $x > b_k$  и  $x < a_k$ ;  $k = 1, 2$ . На рис. 3 представлены профили функций  $T_1(x, t)$  и  $T_2(x, t)$ , рассчитанные в различные моменты времени (в условных единицах) на основе использования численных методов решения. Происходящие в этом случае сценарии кардинально зависят от соотношения меж-

ду скоростью производства новой информации и эффективностью ее распространения (или, в терминах модели (1), от соотношения показателей  $\beta$  и  $\sigma$  соответственно).

Когда информационная (или экономическая) производимость общества равна нулю ( $k_0 = 0$ ) и источник информации (инвестиций) является постоянным ( $\beta = 0$ ) даже при наличии двух начальных структур информация всегда равномерно распределяется по всему обществу, и далее только монотонно растет с течением времени. В этом режиме, который можно назвать «застоем» [4], сами структуры все же немного выделяются в информационном (или экономическом) обществе, но заметного количественного роста их не происходит (рис. 3а).

В линейной модели ( $\beta = 1$ ) при  $k_0 = 0$  развитие структур происходит независимо и локализовано, как друг от друга, так и от всего общества (рис. 3б). Сохранение формы и полуширины профиля свидетельствует о появлении организации и возникновении диссипативной структуры. Упорядоченность такого типа называют нестационарной в отличие от традиционных стационарных (консервативных), не меняющихся со временем структур. Такое решение уравнения (1) описывает процесс коэволюции [1], [4]. Смысл такого решения прост: в определенных школах быстро развивается теория, математический аппарат или технология, которая успешно осваивается одной или несколькими «элитными» группами специалистов, работающих в этой области, и не выходит за рамки их круга. В нелинейном случае ( $\beta > 1$ ) «элитные» структуры становятся квазистационарными, их профили практически «замораживаются», и они практически не влияют на развитие всего общества (рис. 3в).

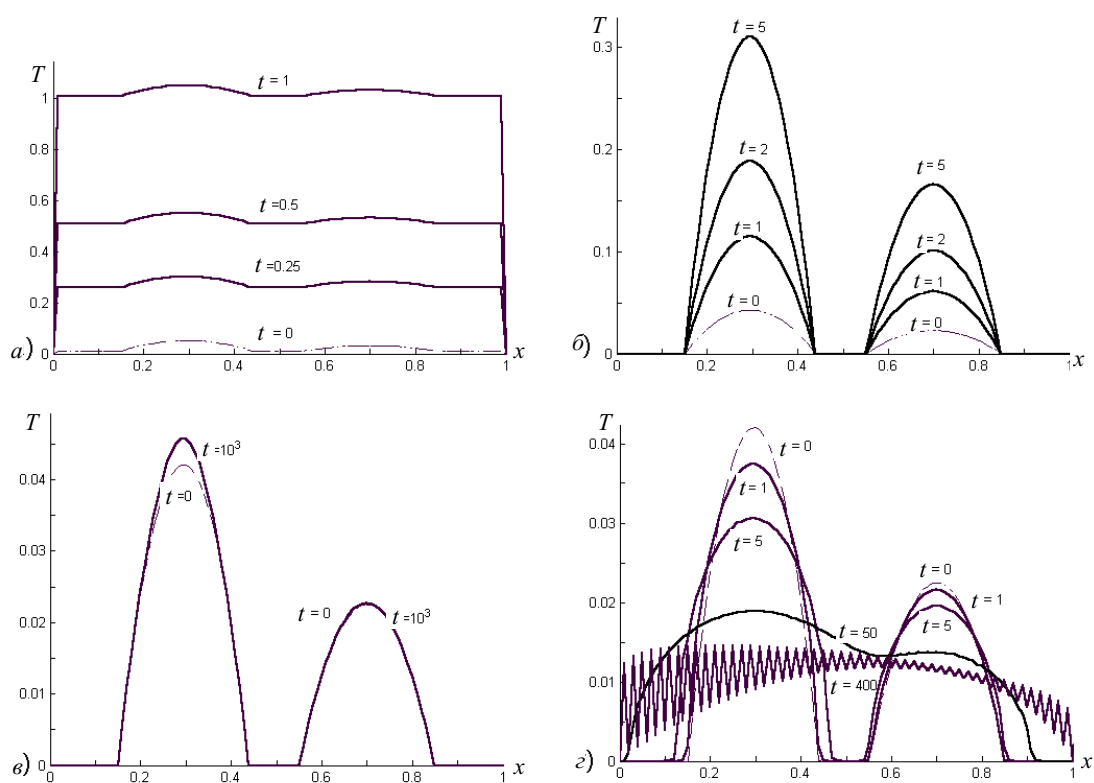


Рис. 3. Сценарии эволюции:

а) «застоя» ( $k_0 = 0, \beta = 0, q_0 = 1, \sigma = 2$ ), б) «элиты» (нестационарный режим:  $k_0 = 0, \beta = 1, q_0 = 1, \sigma = 2$ ), в) «элиты» (квазистационарный режим:  $k_0 = 0, \beta = 4, q_0 = 1, \sigma = 2$ ), з) «НТР» ( $k_0 = 1, \beta = 4, q_0 = 3, \sigma = 2$ )

В случае, когда информационная (или экономическая) проводимость общества не равна нулю и нелинейность в модели (1) очень велика ( $\beta \geq \sigma + 2$ ), в науке и технике осуществляется сценарий научно-технической революции (НТР) [4]: изначально сформировавшиеся глобальные структуры (например, первые университеты) порождают в обществе более мелкие локальные научные школы (рис. 3з). В компьютерном бизнесе в России последних десяти лет хороший пример – возникновение «по всем городам и весям» салонов по распродаже компьютеров-сателлитов крупных фирм из Москвы и Санкт-Петербурга, теряющих со временем свою «элитарность» и сверхприбыль.

Результаты данной работы используются в курсе нелинейной физики (плазмы, теории горения и др. [2]) для студентов-физиков Череповецкого государственного университета. Однако они могут быть полезны для студентов других специальностей при мо-

делировании информационных, экономических и других нелинейных процессов. Такая редукция возможна на основе использования *синергетического подхода*, в котором постулируется, что один класс уравнений при корректной трактовке входящих в него величин можно применить при описании различных явлений (в разных отраслях науки).

#### Литература

1. Капица, С.П. Синергетика и прогнозы будущего / С.П. Капица, С.П. Курдюмов, Г.Г. Малинецкий. – М., 1997.
2. Карлов, Н.В. Колебания, волны, структуры / Н.В. Карлов, Н.А. Кириченко. – М., 2003.
3. Хакен, Г. Синергетика / Г. Хакен. – М., 1980.
4. Maximov, A.V. Physics as a basis of the synergetic approach in natural sciences / A.V. Maximov // The Abstracts of 12-th Conf. of Europ. Phys. Soc. "Trend in Physics". – Budapest, 2002. – P. 222.