

Цымбал В.П.

Сибирский государственный индустриальный университет

ОТ КИБЕРНЕТИКИ К СИНЕРГЕТИКЕ И НОВЫМ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИМ ТЕХНОЛОГИЯМ

Норберт Винер и генезис кибернетики

Выход в свет в 1942 г. знаменитой книги Норберта Винера «Кибернетика или управление и связь в животном и машине» [1] ознаменовал собой появление новой науки. Думается, что было бы интересно и важно проследить генезис представлений, которые привели Н. Винера к созданию этой науки, тем более, что еще одна наука системного плана – синергетика, сформировавшаяся спустя три десятилетия, несомненно, является ее дальнейшим развитием. Уникальную возможность для такого анализа представляет автобиографическая книга Н. Винера «Я математик» [2], в которой удачным образом совмещены эпизоды обыденной жизни с описанием на достаточно доступном уровне своей научной карьеры, если можно назвать карьерой непрерывный напряженный труд, который лишь через много лет привел автора к мировой известности и финансовой обеспеченности. На первых порах его научная карьера складывалась непросто, хотя его и считали вундеркиндом.

Н. Винер родился в 1895 г., а уже в 1915 – 1918 годах начал свою научную карьеру в области философии математики. Как Винер пишет в упомянутой автобиографической книге, первым его учителем был знаменитый философ Бертран Рассел, который тактично заметил ему: «Чтобы заниматься философией математики, неплохо бы знать кое-что из математики». Это подтолкнуло ученого глубоко заняться математикой, которой он и посвятил всю свою жизнь.

Первые шаги в математике он сделал под руководством известного английского математика Г.Х. Харди по теории чисел. В эпилоге книги: «Я счастлив, что родился до первой мировой войны, когда силы и стремления ученого мира еще не захлестнула волна сорока лет катастроф. Я особенно счастлив, что мне не пришлось долгие годы быть одним из винтиков современной научной фабрики, делать, что приказано. Думаю, что, родись я в теперешнюю эпоху умственного феодализма, мне удалось бы достигнуть немногого». Автор также подчеркивает, что приобретением науч-

ной самостоятельности он обязан контактам с людьми, обладающими ярко выраженной индивидуальностью.

Следует также подчеркнуть, что в то время контакты между учеными еще не были приглушены режимом секретности. И действительно, приходится только удивляться, насколько широк был круг контактов между учеными разных стран несмотря на медленность транспортных коммуникаций того времени. Современниками Н. Винера были знаменитые математики и физики, заложившие основы ряда фундаментальных наук и научных направлений.

К 1930 – 35 годам Н. Винер сформировался уже как известный математик. Его работы этого времени посвящены интегралу Фурье, рядам Фурье и их применению, математическому описанию броуновского движения. Он издал несколько книг, связанных с преобразованиями Фурье и гармоническим анализом. В числе его близких коллег и знакомых были Жак Адамар, Морис Рене Фреше, Макс Борн, Нильс Бор, Дж. Холдейн и др. В дальнейшем Норберт Винер сближается с Артуро Розенблютом и Уолтером Кенноном. Эти контакты сформировали у него широкую эрудицию, определенные представления об аналогии некоторых механизмов в живой и неживой природе. В дальнейшем развитии этих представлений значительную роль сыграли его военные работы по автоматическому управлению огнем, а также проблемы быстроразвивающейся связи, где основное внимание уделялось фильтрации помех. Эти работы, а также общая статистическая теория информации, представленные в виде книги «Интерполяция, экстраполяция и сглаживание стационарных временных рядов» [3], явились важным этапом в развитии теории прогнозирования. Причем Н. Винер подчеркивает, что начало теории прогнозирования было заложено российским ученым А.Н. Колмогоровым. В дальнейшем их работы из-за режима секретности развивались параллельно.

Статья А. Розенблота, Н. Винера и Дж. Бигелоу «Поведение, целенаправленность и те-

леология» явилась важным шагом в понимании генезиса кибернетики. Речь шла о системах с обратными связями в живой природе и в искусственно созданных машинах, в том числе в ЭВМ. Вышедшая книга «Кибернетика» (написана в 1947 году в Мексике у А. Розенблота) сделала Н. Винера знаменитым: неожиданно для самого автора книга получила большую популярность.

Своими работами Н. Винер возродил принципы универсализма времен Лейбница. Сам Н. Винер был врагом узкой специализации наук, считал наиболее интересными пограничные полосы между науками, что, в конечном итоге, и вывело его на общесистемную науку – кибернетику. Одной из важных его работ является эргодическая теория и связанная с ней теорема Винера–Хопфа, которая до сих пор играет ключевую роль в теории идентификации. Он часто возвращался к своим работам, связанным с броуновским движением, что сформировало его представления о роли случайности в сложных системах. Автору довелось также работать вместе с создателем термодинамической теории Джозайя Уиллардом Гиббсом. Н. Винер даже считал себя его последователем. В частности, эргодическая теория и теорема Винера–Хопфа, как он считал, являются дальнейшим развитием теории Дж.У. Гиббса. Занимаясь вместе с Клодом Элюдом Шенноном теорией информации, Н. Винер всегда рассматривал информацию в неразрывной связи с ее носителями, во взаимосвязи с энтропией, в том числе, с физическим понятием энтропии. Важно отметить, что, занимаясь математикой, он всегда старался найти возможные приложения математической теории. В одной из своих бесед он даже подчеркнул, что любая теория может быть опровергнута, кроме теории Дж.У. Гиббса. Здесь он имел в виду термодинамику, подчеркнув, что именно Гиббс дал завершающую математическую формулировку термодинамике. Насколько глубоко интересовали Н. Винера проблемы термодинамики, можно видеть из приведенных ниже его интересных рассуждений о знаменитой проблеме демона Максвелла.

Представим себе газ, в котором частицы движутся с распределением скоростей при данной температуре для идеального газа: это будет распределение Максвелла. Этот газ заключен в сосуд с поперечной стенкой с небольшим отверстием, которое закрывается дверцей, приводимой в движение человекоподобным демоном или миниатюрным механизмом. Этот демон, открывая и закрывая дверцу, действует таким образом, что частица, летящая

со скоростью больше средней, выпускается из сосуда *A* и запускается в сосуд *B*. В результате, спустя некоторое время, частицы с большими скоростями сосредотачиваются в отделении *B*. Это приводит к уменьшению энтропии в системе. Если соединить обе половины тепловой машиной, то должны получить вечный двигатель второго рода.

Легче всего, по выражению Винера, просто заявить, что существование таких существ невозможно. Но если с самого начала применять эту невозможность и не пытаться ее доказать, то «упустим прекрасный случай узнать кое-что об энтропии и о возможных физических, химических и биологических системах» [1].

Чтобы демон Максвелла мог действовать, он должен получать информацию от приближающихся частиц об их скорости и точке удара о стенку. Независимо от того, связаны ли эти импульсы с переносом энергии или нет, они предполагают связь между демоном и газом. Но здесь следует заметить, что закон возрастания энтропии справедлив для изолированной системы и не применим к неизолированной части такой системы. Поэтому мы должны рассматривать энтропию системы газ – демон, а не только энтропию газа. Необходимо отметить еще один, связанный с демоном компонент, входящий в общую энтропию. Демон способен действовать лишь на основании принимаемой информации, которая представляет собой, по существу, *отрицательную энтропию*. К тому же эта информация должна переноситься каким-то физическим процессом, например, какой-то формой излучения. Можно предположить, что перенос энергии частицы к демону в течение продолжительного времени имеет гораздо меньшее значение, чем перенос информации. Но по законам квантовой механики нельзя получить информацию о положении или импульсе частицы, тем более и о том, и о другом, без воздействия на энергию исследуемой частицы. Причем это воздействие должно превышать некоторый уровень, зависящий от частицы света, применяемого для исследования. Поэтому в каждом эпизоде связи между демоном и частицей обязательно участвуют энергия и система, находящиеся в статистическом равновесии: равновесие должно быть как по отношению к энтропии, так и по отношению к энергии.

В конечном счете этот демон будет подвержен случайному (хаотическому) движению, соответствующему температуре окружающей среды. То есть он станет частью этой среды. И как очень образно заметил Винер: «Он будет получать большое число ма-

лых впечатлений, пока в «головокружении» не потеряет способность к восприятию, то есть перестанет действовать, как задуманный Максвеллом демон».

Но до того, как демон собьется с толку, может пройти некоторое время, и эту активную фазу демона можно назвать *метастабильной*. Винер вполне допускает возможность существования метастабильных демонов. Аналогом таких демонов он считает энзимы (специфические белки – ферменты), которые, ускоряя метаболизм, уменьшают энтропию пусть не разделением быстрых и медленных частиц, а каким-то другим эквивалентным процессом. Еще одним аналогом метастабильного демона Н. Винер считает катализаторы, так как они изменяют лишь скорости реакций, но не меняют истинного равновесия и в конце концов отравляются.

Такими своеобразными рассуждениями Винер завершает вторую главу своей книги «Кибернетика», где рассматривается статистическая механика Гиббса и эргодическая теория, упрощенная идея которой заключается в тождественности пространственных и временных средних, или, если рассмотрение проводить на физическом уровне, то это тождественность множества миров и одного длительно существующего мира. А с точки зрения математической статистики – это тождественность средних, полученных по множеству реализаций и по одной достаточно длинной реализации. Фактически, эргодическая теория имеет более глубокий смысл и широкое применение. К этой теории мы обратимся в разделе об идентификации.

Рассмотрим философские взгляды Винера, в первую очередь его рассуждения о соотношении хаоса и порядка и роли энтропии в постижении этого взаимодействия, которые в определенной мере предвосхитили некоторые положения другого системного направления – синергетики, возникшего четверть века спустя.

Проблема соотношения необходимости и случайности, детерминизма и вероятности – одна из сложнейших в современном естествознании, но дело в том, какую роль отвести случайности в общем механизме Вселенной. В своем решении этой проблемы Н. Винер, естественно, учитывает обе эти категории, но отдает первенство случайности, хотя и признает известную закономерность окружающего нас мира. В его вероятностной вселенной порядок борется с хаосом, но как состояние менее вероятное неизбежно проигрывает битву [1]: «Мы плывем вверх по течению, борясь с огромным потоком дезорганизованности, ко-

торый в соответствии со вторым законом термодинамики, стремится все свести к тепловой смерти – всеобщему равновесию и одинаковости. В этом мире наша первая обязанность состоит в том, чтобы устраивать произвольные островки порядка и системы». А далее звучит довольно пессимистическая фраза [4]: «Мы в самом прямом смысле являемся терпящими кораблекрушение пассажирами на обреченной планете». К сожалению, прошедшие полвека жизни нашей планеты свидетельствуют, что Винер был прав, поскольку уровень техногенного воздействия на планете превысил возможности самовосстановления биоты. «Мы настолько изменили окружающую среду, что теперь, чтобы существовать в этой среде, мы должны изменить себя», – пожалуй, трудно сказать мудрее [1].

Но попробуем взглянуть на мир несколько оптимистичнее. Тепловая смерть мыслится Винером как асимптотическое, предельное состояние, достижимое лишь в вечности, так что *упорядочивающие флуктуации* возможны и в будущем. «В мире, где энтропия в целом стремится к возрастанию, существуют местные и временные островки уменьшающейся энтропии» [1]. Механизм их возникновения состоит в естественном отборе устойчивых форм. Здесь физика непосредственно переходит в кибернетику и синергетику. Стремясь, в конечном счете, к наиболее вероятному состоянию, стохастическая вселенная не знает единственного предопределенного пути, и это позволяет порядку бороться до времени с хаосом. Человек воздействует в свою пользу на ход событий, гася энтропию извлеченной из окружающей среды *отрицательной энтропией – информацией*.

Идея использования информации как отрицательной энтропии занимает значительное место в философии Винера. Дело в том, что человечество использует для своей деятельности пока только самый грубый физический уровень преобразования сырья в какие-то необходимые ему продукты. И чтобы мы не попытались сделать, например, нагреть металл дляковки или прокатки, осуществить химические реакции окисления или восстановления, построить красивый дом, при этом мы обязательно увеличиваем энтропию окружающей среды. Вся же иерархия растительного и животного мира живет в равновесии с природой и в режиме саморегулирования, даже с учетом негативного влияния человека. Человечество, забирая продукты природы для своей деятельности, возвращает обратно только вредные выбросы и миллионы тонн бытового мусора, масса кото-

рого уже сравнялась с массой животного мира на планете. Содержание парниковых газов и температура атмосферы растут, в атмосфере нарастают неравновесные кризисные явления, например, торнадо.

Безудержный рост энтропии может скомпенсировать, как считает Винер, только «мыслящая материя», то есть разум. Вторую половину прошлого столетия называли периодом информационных технологий. Появилась надежда, что с помощью наукоемких информационных технологий удастся уменьшить рост энтропии на планете. Какие-то островки высокотехнологичного производства с экономической энтропией даже появились на планете. Это Япония, Южная Корея, Сингапур. Здесь преобладают, главным образом, технологии с высокой добавленной стоимостью, то есть связанные преимущественно с «мозговой» деятельностью. Однако в целом на планете большого прорыва в этом направлении не произошло, тем более, если учесть, что достижение наукоемких технологий в этих странах получено за счет использования сырья и комплектующих, произведенных в менее развитых странах, где и выброшена в окружающую среду основная часть энтропии.

Таким образом, малозатратные по энергии и энтропии технологии удалось создать только на отдельных островках.

Что же касается самой отрасли, которая называется информационные технологии, то в ней, по соседству, произошло вырождение самого в себя: информация – ради информации. Количество мощных серверов и мировая паутина непомерно растут и уже в настоящее время четверть энергии в мире тратится на поддержание функционирования вычислительных машин. При этом в основных производящих отраслях принципиальных изменений не произошло. Чем же можно объяснить создавшуюся ситуацию? Винер, а вслед за ним и ведущие ученые, занимающиеся синергетикой, объясняют это «кризисом мозгов», поскольку сами вычислительные машины произвести что-то принципиально новое, естественно, не могут.

Вторым негативным моментом является пагубная для планеты тенденция рыночной экономики, направленная на всемерное раскручивание потребностей и спроса. Как отмечает профессор С.П. Курдюмов, внесший большой вклад в распространение идей синергетики в России, использовать в полной мере возможности, заложенные в каждом новом поколении ЭВМ, может один человек из тысячи, а остальные 999 оплачивают его «удоволь-

ствии». На рынок информационных технологий выбрасывается огромное количество программных продуктов – «тараканов Билла Гейтса», на освоение которых затрачивается большое количество времени и усилий «системных» программистов, в то время как «проблемных» программистов, способных проникнуть во внутреннюю сущность объекта и поставить серьезную наукоемкую задачу, становится все меньше. Это усугубляется также плохой школьной подготовкой (химия и физика стали не обязательными предметами) и, в том числе, пресловутым ЕГЭ, благодаря которому творческая составляющая в школьном образовании (а следом и в вузовском) практически исчезла.

Подводя итог рассмотрению основных идей кибернетики, следует подчеркнуть, что в этой науке на основе аналогии между живой и неживой природой сформулирован принцип управления по обратной связи, разработаны основы теории информации, фильтрации и прогнозирования. Большое внимание уделено статистической теории Гиббса и термодинамике, в том числе философии соотношения порядка и хаоса, что уже явно перекликается с проблемами синергетики. Но, к сожалению, следует отметить, что замечательную мысль Винера о роли мыслящей материи в снижении энтропии пока реализовать не удалось, несмотря на всю мощь информационных технологий ее осуществление уперлось в «кризис мозгов», а также в пагубную тенденцию мировой экономики, направленную на искусственное раскручивание потребностей. Попробуем проанализировать, насколько удастся преодолеть эти негативные тенденции с помощью другой системной науки – синергетики, которая явилась в какой-то мере приемницей кибернетики.

Синергетика – теория самоорганизации

В литературе эти термины используются часто как синонимы. Далее будем употреблять их в таком же смысле, но надеемся, что читатель по мере более глубокого изучения настоящей работы поймет, что второй термин охватывает более широкую область применения.

Основным объектом изучения в этой науке являются **диссипативные структуры** – динамические структуры, которые могут существовать только в условиях интенсивного обмена с окружающей средой. То есть они «живут» за счет потоков вещества и энергии (информации), извлекаемых из окружающей среды.

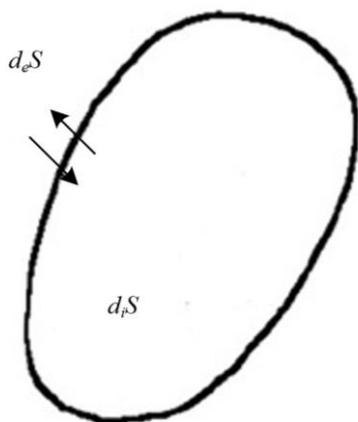


Рис. 1. Схема для формулировки второго закона термодинамики

Таким образом, *открытая система – это первое условие возможности самоорганизации*. В изолированной системе возможна деградация, стремление к равновесию, поскольку энтропия стремится к максимуму.

Илья Пригожин дал расширенную формулировку второго закона термодинамики в следующем виде [5]:

$$dS = d_i S + d_e S, \quad (1)$$

где $d_i S$ – производство энтропии внутри системы; $d_e S$ – поток энтропии за счет обмена энергией или веществом (рис. 1).

Для изолированной системы $d_e S = 0$. Тогда $dS = d_i S \geq 0$ – есть второй закон термодинамики в его классической постановке, когда энтропия не может понижаться.

Эволюция же представляется как такой процесс, в котором система достигает состояния с более низкой энтропией по сравнению с начальной:

$$\Delta S = \int_{\text{по пути}} dS < 0. \quad (2)$$

Это состояние очень маловероятно с позиций равновесной термодинамики, однако оно может устойчиво существовать при условии достижения системой неравновесного стационарного состояния, в котором $dS = 0$ или $d_e S = -d_i S < 0$. Отсюда можно сделать вывод: если в систему поступает достаточно большой отрицательный поток энтропии, в ней в принципе может поддерживаться некоторая упорядоченная конфигурация. При этом подпитка должна происходить в неравновесных условиях, иначе $d_i S$ и $d_e S$ обращаются в нуль.

Таким образом, как следует из соотношения (2), на определенном этапе эволюции системы и при определенных условиях возможен переход системы на новое более высокое (более совершенное) структурное состояние. Это условие можно рассматривать лишь как *необходимое, но недостаточное*; вскрытие механизма самоорганизации в каждом конкретном условиях является достаточно сложной задачей.

Философско-методологические основы самоорганизации изложены в очень своеобразно и интересно написанной книге Ильи Пригожина и Изабеллы Стенгерс «Порядок из хаоса. Новый диалог человека с природой» [6].

Илья Романович Пригожин родился 25 января 1917 года в Москве, но из-за расхождения с ленинскими идеями его отец вместе с семьей вскоре иммигрировал во Францию. Большую часть жизни, начиная с десятилетнего возраста, И.Р. Пригожин прожил в Бельгии, где возглавлял группу ученых, занимающихся развитием и применением его идей, относящихся к разным областям деятельности, как, например, изучение коллективного поведения муравьев, химических реакций в системах с диффузией, диссипативных процессов в квантовой теории поля. Ежегодно он проводил несколько месяцев в руководимом им Центре по статистической механике и термодинамике при Техасском университете (г. Остин).

Как пишет в очень объемном предисловии к книге «Порядок из хаоса» известный американский философ Олвин Тоффлер, эта книга примечательна во многих отношениях: она будоражит воображение читателя, изобилует блестящими прозрениями и догадками, подрывающими уверенность в состоятельности наших основополагающих представлений и открывающими новые пути к их осмыслению. Подчеркивается, что не случайно в дополнение к заголовку книги «Порядок из хаоса» стоят слова «новый диалог человека с природой»; О. Тоффлер выделяет мысль о том, что мир изменяется по мере нашего понимания.

Как отмечают авторы обширного аналитического послесловия к этой книге, раскрытие понятия самоорганизации носит существенно личный диалоговый способ мышления. В этом диалоге нет готовых ответов на задаваемые вопросы, как нет и окончательного перечня самих вопросов.

Переоткрытие времени [6] в современной физике, низведенного в классической механике до роли вспомогательного параметра, «нумерующего» последовательность событий, – это главная тема книги, которая далее развива-

ется в последовательной вариации: структура и направленность времени; возникновение и развитие необратимости в различных явлениях природы; роль необходимости в процессах самоорганизации; роль наблюдателя не только фиксирующего, но и активно изменяющего ход явлений на микроскопическом уровне.

Основным стержнем, вокруг которого развиваются рассуждения авторов книги [6], является второе начало термодинамики: «Два потомка теории теплоты по прямой линии – наука о превращении энергии из одной формы в другую и теория тепловых машин – совместными усилиями привели к созданию первой «неклассической» науки термодинамики». И далее, как бы вторя Н. Винеру [2], подчеркивается [6]: «Ни один из вкладов в сокровищницу науки внесенных термодинамикой не может сравниться по новизне со знаменитым вторым началом термодинамики, с появлением которого в физику впервые вошла «стрела времени». На протяжении всей книги происходит как бы заочное общение с создателями второго начала термодинамики (Сади Карно, Карлом Клузиусом, Джозайя Гиббсом, Людвигом Больцманом и др.) и попытка проникнуть в более глубокий смысл их рассуждений. Этот интересный подход позволяет глубже понять, как развивалась эта теория, начиная от равновесной термодинамики до идей самоорганизации.

Особое внимание при этом уделено идеям Л. Больцмана, который не только сформулировал свой знаменитый «принцип порядка Больцмана», но и сделал попытку описания внутреннего механизма сложной эволюционирующей системы, состоящей из огромного числа частиц, предвосхитив подходы, использованные позже при создании кинетической теории. Больцман предпринял попытку использовать теорию вероятности для описания сложных явлений, с которыми столкнулась термодинамика. Он первым понял, что необратимое возрастание энтропии можно рассматривать как проявление все увеличивающегося молекулярного хаоса, постепенного забывания начальной асимметрии (начальных условий). Он отождествил энтропию S с числом комплексов, которым может быть достигнуто каждое из макроскопических состояний, и в результате получил количественное выражение для своего знаменитого принципа в следующем виде:

$$S = k_b \ln P, \quad (3)$$

где k_b – коэффициент пропорциональности, получивший название «универсальной постоянной Больцмана».

Как выяснилось в дальнейшем, эта постоянная оказалась равной энергии одной молекулы – как результат деления газовой постоянной R на число Авагадро.

Из принципа Больцмана следует, что необратимое термодинамическое изменение есть приближение к более вероятному состоянию и что состояние – *аттрактор* есть макроскопическое состояние, соответствующее максимуму энтропии. Как только такое наиболее вероятное состояние достигнуто, система отклоняется от него лишь на небольшое расстояние и на короткое время, то есть система лишь *флуктуирует* около состояния – *аттрактора*.

Объяснение Больцмана допускает обобщение и на открытые системы. В замкнутой системе температура T поддерживается постоянной за счет теплообмена с окружающей средой, равновесие соответствует минимуму свободной энергии: $F = E - TS$.

Это соотношение означает, что равновесие есть результат конкуренции между внутренней энергией и энтропией, а температура выступает в роли множителя, определяющего относительный вес этих двух факторов.

При низких температурах перевес на стороне внутренней энергии (упорядоченные с малой энтропией, низкоэнергетические структуры – кристаллы). Кинетическая энергия мала по сравнению с потенциальной (взаимодействие между молекулами).

При высоких температурах доминирует энтропия и в системе устанавливается молекулярный хаос.

Экстремумы (то есть максимумы и минимумы) термодинамических потенциалов, в том числе S и F , задают состояния – *аттракторы*, к которым самопроизвольно стремится система, если ее граничные условия соответствуют определениям потенциалов.

Больцман не ограничился описанием только состояния равновесия. Он вознамерился описать также эволюцию к равновесию, эволюцию к максвелловскому распределению, которое связывает повышение температуры с увеличением средней скорости молекул и энергии, связанной с движением молекул. Он решил описать молекулярный механизм, соответствующий возрастанию энтропии и вынуждающий систему стремиться к переходу от произвольного распределения скоростей к равновесному. Он подошел к решению этой проблемы не на уровне индивидуальных скоростей, а на уровне ансамбля молекул. Являясь приверженцем Дарвина, он решил повторить в физике подход, аналогичный тому, который Дарвин использовал в биологии.

Эволюцию функции распределения $f(v,t)$ скоростей v в некоторой области пространства в момент времени L . Больцман представил в виде суммы двух эффектов: число частиц, имеющих в момент времени t скорость v , изменяется в результате как свободного движения частиц, так и столкновений между ними. Тем самым автор предвосхитил метод химической кинетики. При этом он понимал, что при столкновении молекул энтропия увеличивается. Как отмечают авторы работы [6], Л. Больцман на 30 лет раньше (в 1872 году) получил результаты, аналогичные теории цепей Маркова. Он получил так называемую H функцию, которая применительно к вероятности распределения частиц выглядит следующим образом:

$$H = \sum_k P(k,t) \ln \frac{P(k,t)}{P_{\text{равн}}(k)}; \quad (4)$$

здесь $P(k,t)$ – вероятность попадания частицы в область k в момент времени t ; $P(k)$ – вероятность попадания частицы в область k в равновесных условиях.

Применительно к вероятности распределения скоростей функция H выглядит следующим образом:

$$H = \int f \ln f dv. \quad (5)$$

Эта функция может только убывать со временем до тех пор, пока не будет достигнуто равновесие и распределение скоростей не перейдет в распределение Максвелла. Эта функция играет роль энтропии, но она не возрастает, а убывает. Уравнение Больцмана и поныне играет важную роль в физике газов: позволяет вычислять коэффициенты переноса (например, коэффициента теплопроводности и диффузии), находится в хорошем соответствии с экспериментальными данными.

Но особенно велико значение достижений Больцмана, как отмечают авторы книги [6], с концептуальной точки зрения: «Различие между обратимыми и необратимыми процессами, лежащими, как мы видели, в основе второго начала термодинамики, Больцман низвел с макроскопического на микроскопический уровень. Изменение распределения скоростей свободного движения молекул соответствует обратимой части, а вклад, вносимый в изменение распределения столкновениями, – необратимой части». Именно в этом и был, с точки зрения Больцмана, ключ к микроскопической интерпретации энтропии. Однако оказалось, что в этой замечательной теории была обна-

ружена неполнота. Анри Пуанкаре, а затем Иоганн Йозеф Лошмидт [6] показали, что обращение скоростей в его модели не инвариантно во времени. Дело в том, что восстановить свое прошлое система, например, газ, может лишь в том случае, если он «помнит» все, что с ним происходило в интервале времени от $t = 0$ до $t = t_0$. Для этого необходимо какое-то хранилище информации. В роли такого хранилища или памяти выступают корреляции между частицами. Именно *отношения между корреляциями и столкновениями* были недостающим звеном в рассуждениях Л. Больцмана.

Применимость статистического подхода Больцмана зависит от предположения о том, что перед столкновением молекулы ведут себя независимо друг от друга. В сильно разреженном газе, который изучал Больцман, *вероятность корреляций невелика*, в плотном же газе эта *вероятность становится очень существенной*, в том числе в связи с *усилением флуктуаций*, нарушающих статистическое распределение. «Именно из-за трудностей, возникающих при рассмотрении плотных систем с взаимодействующими частицами, пионерская теория Больцмана осталась незавершенной [6]».

Таким образом, эта заочная полемика Больцмана с авторами этой интересно написанной книги помогла нам, а хочется надеяться, и читателям, глубже понять механизм второго начала термодинамики, а также проследить генезис представлений авторов, которые, отталкиваясь от этого фундаментального понятия, пришли к пониманию проблем самоорганизации.

При рассмотрении генезиса кибернетики мы касались, главным образом, термодинамики закрытых систем и роли обратной связи. В какой-то мере коснулись соотношения хаоса и порядка, а также возможности образования «островков порядка» в хаотическом мире. Нелишне также напомнить интересную мысль Норберта Винера о роли мыслящей материи для компенсации роста энтропии.

В рассмотренной же книге Пригожина и Стенгерс, как в наиболее фундаментальном труде этой школы [5], дано расширенное толкование второго закона термодинамики применительно к открытым неравновесным системам, выделена роль динамических диссипативных структур, энтропии как «стрелы времени» и принципа отбора вариаций в сочетании со случайностью, отношений необходимости и случайности. Важную роль в механизме спонтанного образования новой, более высокоорганизованной структуры играют корреля-

ции флуктуаций, роль которых возрастает с увеличением степени неравновесности, приводя к возможности бифуркаций и критического поведения. Эти вопросы подробно рассмотрены в двух упомянутых выше, а также в других работах этой научной школы.

Чтобы не нарушать основную нить рассуждений, мы не коснулись здесь работ Германа Хакена [7], который также по праву считается основателем этого научного направления, а также работ российских ученых и прежде всего С.П. Курдюмова и Г.П. Малинецкого [8], внесших большой вклад в популяризацию идей самоорганизации в России, Ю.Л. Климонтовича [9] – автора *S*-теоремы, и других. Эти работы заслуживают отдельного рассмотрения. Следует, однако, отметить, что несмотря на большое число работ, посвященных синергетике и теории самоорганизации, примеров конкретной реализации этих подходов и принципов в технике и технологиях пока мало.

Настоящий обзор хочется завершить кратким описанием нового струйно-эмульсионного металлургического процесса, при разработке которого впервые в мировой металлургии предпринята попытка применить некоторые идеи и принципы самоорганизации.

Самоорганизующийся струйно-эмульсионный реактор СЭР

Использование описанных выше подходов и принципов позволило создать агрегат с очень малым удельным объемом и энергоемкостью [10, 11].

На рис. 2 приведена технологическая схема для описания устройства и принципа действия.

Основу технологической схемы мини-модуля составляют система подачи шихты 1 – 5, реактор-осциллятор 6, соединительный канал с газодинамическим самозапираем 7, рафинирующий отстойник 8, одновременно играющий роль первой ступени мокрой газоочистки, копильник 9, а также система гарнисажного охлаждения 10, канал 11 для выдачи газошлаковой эмульсии и канал 12 для перетока части газа, шлакоприемник 13 с гранулятором 14, система утилизации тепла в кипящем слое или реформации дымовых газов в синтез-газ 17 и газоочистка 18.

Созданный в реакторе-осцилляторе 6 высокий потенциал давления за счет эффекта газодинамического запирания канала 7, а также полная изоляция процесса от атмосферы позволяют проталкивать продукты реакции через все находящиеся за основным технологическим агрегатом устройства утилизации энергии без использования высокотемпературных побудителей расхода.

Пылевидная шихта, состоящая из смеси оксидов металлов и твердых восстановителей, эффективно диспергируется в реакционной камере 6, где создается газовзвесь с объемной долей газа порядка 0,99. Вследствие зависимости скорости истечения двухфазной среды от газосодержания (рис. 3), в соединительном канале 7 образуется аэродинамически запираемый затвор (торможение струи), а в сочетании с обратной связью по газосодержанию (за счет изменения условий протекания химических реакций, а также условий подачи в реактор шихты и кислорода) имеется возможность создавать стационарный

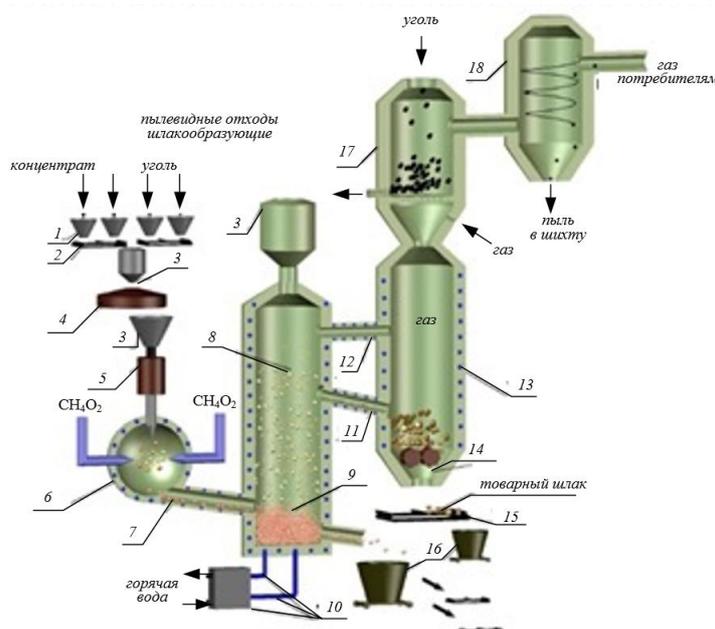


Рис. 2. Технологическая схема

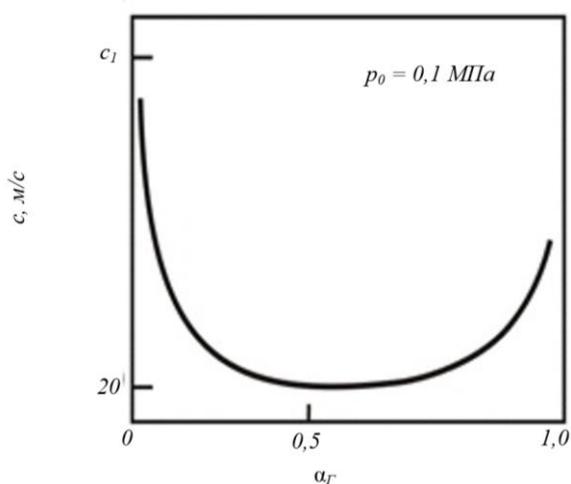


Рис. 3. Зависимость скорости звука мини-модуля СЭР от газосодержания

колебательный режим (*самоорганизующийся реактор-осциллятор*).

В основу конструктивной реализации рассматриваемого ниже процесса и агрегата [10, 11] были заложены следующие принципы и решения:

- организация вынужденного движения рабочей (реакционной) смеси в замкнутой системе под давлением, что позволяет создавать *значительное отклонение от термодинамического равновесия* и одновременно решать задачу внутреннего транспорта продуктов реакции через все последовательно соединенные аппараты;

- создание большой реакционной поверхности и двухфазной рабочей смеси (газовзвеси или эмульсии), то есть перевод процесса в область газодинамики, что позволяет получить большие скорости физико-химических процессов;

- использование нелинейной зависимости скорости течения двухфазной среды от газосодержания для создания потенциала давления за счет эффекта газодинамического запирания соединительного канала (самостабилизация);

- создание пространственно-локализованных диссипативных структур, существенно отклоненных от термодинамического равновесия, что позволяет получить большие возможности по управлению химическим составом металла и шлака.

Кратко рассмотрим (рис. 4) эти диссипативные структуры [10] со ссылкой на представленную зонную модель: 1 – ядро уплотнения; 2 – реактор-осциллятор; 3 – соединительный канал; 4 – динамическая подушка; 5 – относительно плотная газшлаковая эмульсия; 6, 7 – диссипативный гравитационный сепаратор; 8 – слой жидкого металла.

Остановимся коротко на одной из важных диссипативных структур – гравитационном сепараторе металла, шлака и газа.

Использование в качестве рафинирующего отстойника вертикального колонного реактора 8 (рис. 2) с нижней подачей через канал 7 реакционной газовзвеси в сочетании с существенным отклонением процессов от термодинамического равновесия является важнейшим фактором, который обуславливает возможность гравитационного разделения потока железоуглеродистого металла, стекающего по периферии колонного реактора и оседающего в копильнике 9, и потока обедненного железом шлака, отводимого по наклонному каналу 11 в шлакоприемник 13.

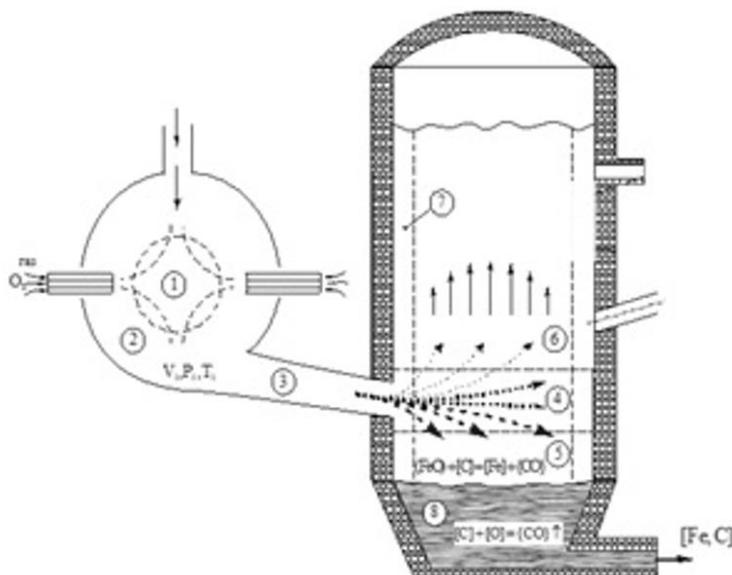


Рис. 4. Зонная модель и диссипативные структуры

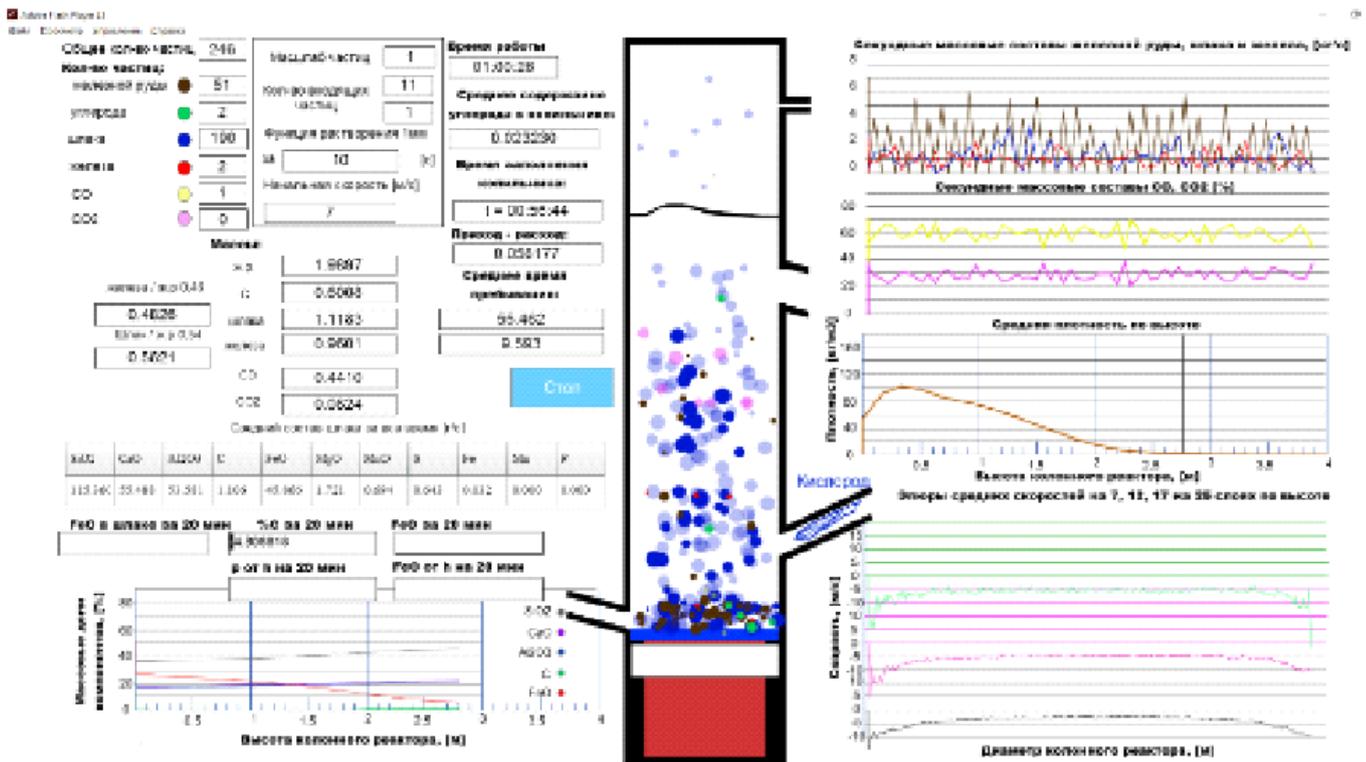


Рис. 5. Интерфейс имитационной модели гравитационного сепаратора

Учитывая важную роль отмеченной диссипативной структуры, связывающей все остальные зоны и обуславливающей круговорот веществ в агрегате, для ее воспроизведения и изучения создана имитационная модель [12], в которой в качестве «первых принципов» – элементов нижнего уровня иерархии выступают дисперсные частицы шихты с реально заданным гранулометрическим распределением. Вид графического интерфейса программы представлен на рис. 5.

Ядром этой модели является задача обтекания единичной частицы вертикальным потоком несущего реакционного газа. С помощью специально созданного алгоритма и программы на ЭВМ с использованием метода Монте-Карло проигрывается большое число упругих и неупругих столкновений частиц шихтовых материалов и продуктов реакций с учетом протекающих процессов. Разработанная модель, тестируемая на основе результатов большого числа компьютерных статистических испытаний по совпадению с законами сохранения, оказалась достаточно адекватной «виртуальной реальностью» изучаемого процесса. Она позволяет вскрывать внутренний механизм сложных взаимодействий, протекающих в колонном реакторе: оценивать время пребывания в агрегате исходных веществ и продуктов реакций, в том числе металла и шлака, распределение плотности взвешенных дисперсных ма-

териалов по высоте агрегата, влияние на ход процесса различных управляющих воздействий, в том числе гранулометрического состава металла, соотношения количества рудных материалов и топлива-восстановителя и др. Являясь заместителем объекта, эта модель позволяет численным методом решать задачи системной динамики, проигрывать и разрабатывать проектируемые технологии. Эта модель заслуживает отдельного более подробного рассмотрения [12].

Опыт разработки этой модели открывает возможность создания имитационных моделей процессов, рассмотренных в представленном выше обзоре, в том числе метастабильного демона Максвелла (по представлению Н. Винера), молекулярной кинетики, броуновского движения, корреляции флуктуаций и др. Численные эксперименты на таких моделях позволят глубже понять внутренний механизм термодинамики и самоорганизации, будут иметь важное учебное значение, а также явятся своеобразными «кирпичиками» нижнего уровня для создания макрокинетических моделей новых технологических процессов, особенно, если учесть, что в неравновесной термодинамике (в отличие от равновесной) аналитическое описание связи между термодинамикой и кинетикой отсутствует. Ограничением для создания таких имитационных моделей может быть только быстроедействие ЭВМ (для реше-

ния этих задач оно должно быть достаточно высоким), квалификация и интерес исследователей. При наличии таких моделей проектирование новых технологических процессов может осуществляться на «кончике карандаша» (как у физиков), за пультом ЭВМ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Винер Н. Кибернетика, или управление и связь в животном и машине. – 2-е издание. – М.: Советское радио, 1968. – 326 с.
2. Винер Н. Я математик. – М.: Наука, 1967. – 355 с.
3. Wiener N. Extrapolation, Interpolation, and Smoothing of Stationary Time Series with Engineering Applications. – The Technology Press of M.I.T., and J. Wiley & Sons. – New York, 1949.
4. Винер Н. Кибернетика и общество. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1958. – 196 с.
5. Николис Г., Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах. – М.: Мир, 1979. – 512 с.
6. Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса. Новый диалог человека с природой / Пер. с англ.; общ. ред. В.И. Аршинов, Ю.Л. Климонтович, Ю.В. Сачков. – М.: Прогресс, 1986. – 432 с.
7. Хакен Г. Синергетика. – М.: Мир, 1980. – 406 с.
8. Курдюмов С.П., Малинецкий Г.Г. Синергетика – наука о самоорганизации. – М.: Знание, 1983. – 48 с.
9. Климонтович Ю.Л. Турбулентное движение и структура хаоса. Новый подход к статистической теории открытия систем. – М.: Наука, 1990. – 320 с.
10. Процесс СЭР – металлургический струйно-эмульсионный реактор / В.П. Цымбал, С.П. Мочалов, И.А. Рыбенко и др. // Под ред. В.П. Цымбала. – М.: Metallurgizdat, 2014. – 488 с.
11. Tsymbal V.P., Mochalov S.P., Shakirov K.M. Controlling the Composition of the Metal in the Direct Reduction of Dust-Sized Materials and Waste Products in a Jet-Emulsion Reactor // Springer Journals. 2015. Vol. 59. P. 119 – 125.
12. Сеченов П.А., Цымбал В.П. Имитационное моделирование гравитационного сепаратора в колонном струйно-эмульсионном реакторе // Изв. вуз. Черная металлургия. 2016. Т. 59. № 4. С. 278 – 283.

© 2018 г. В.П. Цымбал
Поступила 16 февраля 2018 г.