

ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУР В ВОЗДУШНЫХ ПОТОКАХ ТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

*Ю. Н. Марр, советник генерального директора
АО «НПО «Тепломаш»*



ЮРИЙ НИКОЛАЕВИЧ МАРР
Кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
советник генерального
директора АО «НПО «Тепломаш»
по научно-техническим вопросам,
специалист в области теплообмена и
прикладной гидроаэродинамики.
В 1963 году окончил
энергомашиностроительный
факультет Ленинградского
политехнического института имени
М. И. Калинина.
В 1969 году защитил кандидатскую
диссертацию. С 1963 по 1990 год
работал в ЛенНИИХиммаше на
научных должностях.
С 1999 года работает
в АО «НПО «Тепломаш». Автор более
чем 60 научных трудов, в том числе
2 книг и 26 изобретений.
Разработки Ю. Н. Марра последних
лет реализованы в продукции
АО «НПО «Тепломаш».

Явления самоорганизации в рабочих процессах вентиляции, отопления и кондиционирования представляют значительный интерес в плане учета создаваемых ими воздействий при разработке конструкций аппаратуры, проектировании инженерных систем и архитектурном проектировании внутренних и наружных конфигураций зданий. Так, в [1] были разобраны повсеместно встречающиеся случаи отрыва потока от плохо обтекаемого тела и поведение струй, направленных навстречу друг другу. В [2] рассмотрен эффект колеса радиального вентилятора с лопатками, загнутыми вперед, при его переносе из свободного состояния в спиральный корпус. В [3, 4] описаны особенности и возможности дистанционного всасывания сильно закрученной кольцевой струей.

В зависимости от характера технической задачи, самоорганизация может стать как конструктивным фактором, так и оказать отрицательное воздействие. В последнем случае не следует пытаться задавить явление — его нужно или использовать впрямую, или искать нетривиальное решение.

Обе рекомендации будут предметными, если есть понимание того, с чем мы имеем дело. Однако явления самоорганизации по сию пору остаются уделом ученых. Поэтому здесь предпринята попытка рассмотреть некоторые принципы формирования структур в воздушных потоках с прицелом на инженерные представления.

В середине прошлого столетия европейские ученые И. Пригожин и Г. Хакен и советский ученый А. П. Руденко разработали независимо друг от друга каждый свой подход к самоорганизации неравновесных систем. Первые — в виде теории диссипативных структур и кооперативных принципов [5, 6], второй — на основе концепции эволюционного катализа [7].

Согласно [7], в любой открытой системе поток рассеиваемой свободной энергии, направленный к равновесию, трансформируется на поток, затрачиваемый на внутреннюю полезную работу против равновесия, и поток бес-

полезно рассеиваемой энергии. Всем этим были заложены основы новой парадигмы естествознания, включающей, во-первых, не-универсальность второго закона термодинамики и, во-вторых, наличие двух фундаментальных процессов упорядочения хаоса: одного, стремящегося к равновесию (энтропийного), другого — к неравновесию (антиэнтропийного). К первому относятся квазиравновесные процессы тепломассопереноса, ламинарного течения жидкостей с линейными законами переноса и формированием монотонно изменяющихся характеристик параметров упорядоченной структуры. Ко второму — не-монотонные, иногда нерегулярные или периодические в пространстве и времени макроструктуры, вид которых часто имеет слабое отношение к условиям принуждения неравновесной системы. В отличие от энтропийных процессов организации, предсказание вида структур самоорганизации невозможно.

Характерно, что при всем различии европейской и отечественной концепций самоорганизации во главу угла ставится энтропийный процесс упорядочения. Только в рамках этого процесса запускаются механизмы развития антиэнтропийных процессов. Несмотря на провозглашенную неуниверсальность второ-

го начала термодинамики, за энтропийными процессами незримо стоит этот закон.

1. Практически все формулировки второго закона термодинамики начинаются словами «В изолированной и предоставленной самой себе системе...». Слова «предоставленная самой себе» в данном случае можно воспринимать как фигуру речи, поскольку вся последующая часть второго начала относится исключительно к изолированной системе. В отличие от изолированной, система, предоставленная самой себе, не ограничена фиксированным объемом. Такая система известна достаточно давно [8, 9].

Образ предоставленной самой себе системы возникает из рассмотрения порции газа Больцмана, адиабатно расширяющегося в пустоте, в пространстве, не имеющем ограничений. В начальный момент изоляция (если она была) скачкообразно удаляется, и система становится неравновесной. Поскольку между частицами-атомами газа Больцмана нет связей, а их взаимодействие сводится только к упругим соударениям, то такая система начнет самопроизвольно разлетаться в окружающее безграничное пространство с сохранением суммарной кинетической энергии. Далее будем обозначать такую систему СПС — система, предоставленная себе.

Принципиальным здесь является направленность эволюции после «пуска» на распространение неравновесности микроуровня внутри порции с последовательным порождением ею организованного макроскопического движения объемов газа вплоть до полного исчерпания ресурсов. Отсутствие противодействия означает, что при расширении никакая работа не совершается, внутренней энергия СПС сохраняется.

В аэродинамической интерпретации возникшая эволюция относится к задачам нестационарного движения невязкого газа [10, 11], в частности, в одномерном случае — это движение газа в трубе за уходящим поршнем. Равновесно расширяясь в вакуум в волне разрежения, газ ускорится до максимальной величины $v_{\max} = 2c_0/(k - 1)$. Здесь c_0 — скорость звука в условиях покоящегося газа, k — показатель адиабаты. Плотность, давление и температура газа монотонно убывают до нуля на границе с вакуумом. Фрагменты газа Больцмана, проходя че-

рез волну разрежения, перестают быть термодинамической системой и превращаются в систему механическую. В отличие от **«тепловой смерти»** изолированной системы, финалом СПС можно считать **«механическую смерть»**: равномерный и прямолинейный коллективный разлет в пространстве частиц начального хаоса.

2. Как видно, основной чертой поведения СПС является **организованное расширение области пространства, заполненного материалом системы**. Направленность СПС на формирование, расширение и поддержание организованного переноса материала системы в пространстве можно определить как **физическую экспансию**.

В реальных условиях экспансия встречает противодействие составных частей системы и не доходит до своей «механической смерти». Для преодоления противодействий приходится совершать работу, которая будет частично или полностью необратимо рассеиваться, переходя в тепловую форму движения микроуровня. Это соответствует введенному Томсоном представлению о **диссипации**.

Типичными примерами процессов реальной экспансии могут служить: расширение газа из баллона в атмосферу (способ выработки холода), струйное истечение жидкости, расширение газа в канале через пористую перегородку (эффект Джоуля — Томсона), перемешивание жидкости, порция газа внутри сосуда с упругими стенками — эволюция к равновесию изолированной системы (пример Больцмана). Таким образом, **диссипация неразрывно связана с реальной экспансией, является ее оборотной стороной**.

Если при рассмотрении порции газа Больцмана речь шла об экспансии материала системы, то логично расширить это понятие и говорить о физической экспансии любых субстанций системы, включая в это потоки импульса, теплоты, кинетической энергии, заряда и т. д.

Экспансия — это **способ существования** неравновесной системы: субстанция обязательно переходит оттуда, где ее «много», туда, где ее «мало». Но это не что иное, как выравнивание неоднородностей системы, т. е. уменьшение степени неравновесности, устремление системы к равновесию. В этом смысле, в соответствии с [7],

экспансия есть один из основополагающих процессов упорядочения хаоса, а именно **стремящегося к равновесию энтропийного процесса**.

Подчеркнем еще раз разницу между экспансией и стремлением к равновесию в изолированной системе. Экспансия — это энтропийный процесс **упорядочения хаоса** в открытой системе. Стремление к равновесию в изолированной системе — **полная деструктуризация и хаотизация** всех субстанций системы.

Экспансия как явление (физическая, духовная, социальная, финансовая, политическая) — это всеобщая, повсеместная, неизбежная и настолько очевидная сущность, что ее не принято наделять какими-то особыми свойствами. В связи с всеобщностью этой сущности, ее имманентности материи как глобального способа существования неравновесных систем следовало бы возвести физическую экспансию в ранг **фундаментального явления природы**.

3. В общем случае у неравновесной системы в рамках глобальной экспансии имеется несколько способов существования в зависимости от степени неравновесности. Изолированная система имеет один способ существования — «тепловая смерть». Квазиравновесная стационарная система организована принуждениями в структуру с монотонными зависимостями параметров. В ней формируется процесс экспансии, опирающийся исключительно на движение ее физического микроуровня (атомов и молекул): молекулярную вязкость, теплопроводность, массоперенос и т. д. Перенос субстанций описывается линейными законами. Именно эта ситуация обозначена в [7] как энтропийная организация.

Когда система заметно удалена от равновесия, микроуровень не справляется с «напором» субстанции. Рушится устойчивость монотонных структур. Экспансия вынуждена переходить в другую форму, которая обеспечит ее перенос с большей плотностью потока. Такие структуры называют самоорганизованными, формирующимися в антиэнтропийном процессе. В тех же условиях принуждения их способ существования зачастую полностью «игнорирует» условия принуждения и формирует подчас причудливую картину с немонотонными зависимостями.

По-видимому, во главу угла следует ставить единственное и главное принуждение — **неравновесность системы**. Степень удаленности системы от равновесия определяет способ ее существования, т. е. характер и форму экспансии, в которых второстепенные принуждения могут и не играть заметной роли.

4. Рассуждая о направленности природы к организации, следует обратить внимание на два важных факта. С одной стороны, в макромасштабе все структуры самоорганизации обладают ярко выраженной дискретностью (квазидискретностью): ячейки Бенара, вихри Кармана, Тейлора, молярный хаос турбулентности и пр. С другой стороны, поведение физического микроуровня даже в термодинамически равновесном состоянии не является полностью равномерным движением атомов и молекул по трем координатам. В хаотическом движении микроуровня всегда присутствуют квазидискретные образования — микрофлуктуации. В отличие от предположения о флуктуациях как об отклонениях параметров системы от средних значений, микрофлуктуации — это случайно возникающие в хаосе короткоживущие молекулярные сгустки [12]. В них имеет место локальное, усредненное по сгустку отклонение плотности, импульса, кинетической энергии и пр. В равновесных состояниях они малочисленны и слабы. Тем не менее подтверждением их существования может служить броуновское движение. Сдвиг частицы некомпенсированным воздействием ударов молекул и есть результат одностороннего взаимодействия частицы с микрофлуктуацией. Многочисленные примеры визуализации математического моделирования молекулярной динамики, например, [13, 14], убедительно демонстрируют наличие микрофлуктуаций даже в состояниях равновесия.

Броуновское движение считается наиболее наглядным экспериментальным подтверждением представлений молекулярно-кинетической теории о хаотическом тепловом движении атомов и молекул. Но есть и второй важнейший аспект броуновского движения — это несомненная **атрибутивность микрофлуктуаций хаотического движения**. Даже в состоянии равновесия микрофлуктуации не исчезают — броуновское движение не прекращается, и образ «тепло-

вой смерти» равновесной системы можно считать несколько преувеличенным.

5. Что стоит за самовоспроизводством микрофлуктуаций? Говоря об атрибутивности микрофлуктуаций в хаосе любой природы, следует различать математический и физический хаос. Первый опирается на абстрактные математические закономерности формирования случайных чисел. Второй даже при математическом моделировании имеет в основе физические закономерности взаимодействия составных частиц материала. Поэтому можно выделить механический, химический, электрический и т. д. разновидности хаоса.

Как и раньше, имея в виду газ Больцмана, будем говорить о механическом хаосе. И тут становится очевидным важнейшее ограничение механического хаоса газа Больцмана: **микроуровень является внутренней (упругой) изоляцией системы.** Поток кинетической энергии макроскопических движений газа Больцмана, рассеиваемый в реальной экспансии и достигший микроуровня, внутрь частиц микроуровня пройти не может, поскольку в обычных приложениях кинетическая энергия частиц несопоставимо мала в сравнении с энергией деформации атомов (в газе Больцмана атомы — абсолютно упругие шарики).

Газ Больцмана — термодинамическая система. Однако движение атомов на микроуровне — система механическая. Имея в виду ее микрофлуктуации, будем говорить о микропорциях газа, в масштабе которых движение механическое. Внутренняя изоляция микроуровня закрытой изолированной системы сохраняет среднюю кинетическую энергию хаотического движения (температура не изменится). На микроуровне нет диссипации в смысле Томсона. Переход от локальных разлетов микропорций к локальным сгущениям можно представить себе как образование кратковременных «цельностей» с коллективным в составе сгустка движением атомов. Такие переходы будут происходить безостановочно и бесконечно. Подтверждением этому служит никогда не затухающее броуновское движение.

Таким образом, в условиях внутренней изоляции через разлеты и сгущения цельностей совершается бездиссипативный круговорот

механической энергии микроуровня между элементарными самоорганизующимися формированиями-микрофлуктуациями.

6. Усиление внешней неравновесности открытой системы увеличит экспансию-диссипацию, т. е. и поток рассеиваемой свободной энергии, направленный к равновесию. Но, согласно А. П. Руденко [7], такой поток трансформируется на поток, затрачиваемый на внутреннюю полезную работу против равновесия, и поток бесполезно рассеиваемой энергии. Полезная работа в данном случае пойдет на повышение частоты формирования сгущений, увеличения их плотности, придания им квазиупругости, развития возможности непосредственного взаимодействия цельностей друг с другом в их хаотическом движении. Понятно, что до какого-то момента «квазиупругость» этих «квази-частиц» невелика. Их столкновение приведет к слиянию. Однако дальнейшее приращение плотности диссипации может довести квазиупругость цельностей до уровня, при котором они начнут вести себя подобно атомам газа. Их собственное хаотическое движение возьмет на себя часть диссипации. Оставаясь, однако, неупругими, квази-частицы при столкновениях будут деформироваться и поглощать энергию столкновения, т. е. передавать поток диссипации на физический микроуровень. Формирование хаотических движущихся цельностей означает повышение уровня квазидискретности материала системы сравнительно с дискретностью физического микроуровня. А хаотическое поведение квазичастиц ставит вопрос уже о флуктуациях в хаосе самих квазичастиц.

Таким образом, внешняя неравновесность инициирует развитие внутренней неравновесности системы — формирования более высокого уровня квазидискретности материала, повышения масштаба хаотического движения и появления вторичного флуктуационного движения в хаосе квазичастиц.

С дальнейшим усилением экспансии в открытой системе на материале собственной первичной флуктуационной структуры создается **вторичная флуктуационная надстройка** значительно большего масштаба. Повышение степени неравновесности системы неизбежно приведет к настолько сильному росту масштабов надстройки, что мож-

но говорить о **«прорастании микрофлуктуаций в макромасштаб»** (И. Пригожин) и о **«кризисе сплошности» материала в первоначальной монотонной энтропийной структуре.** Массовое «прорастание» вторичных флуктуаций делает материал системы непригодным для экспансии в форме непрерывных монотонных субстанциальных потоков в силу появления очагов коррелированного поведения квазичастиц уже в макромасштабе. Это привносит собственные внутренние возмущения в монотонные структуры. Энергия внутренних возмущений повышает энергию внешних малых возмущений. Все вместе создает условия для нарастания внешних возмущений, т. е. подпитки внешнего малого возмущения энергией основного движения системы. Деформация монотонной структуры становится необратимой, и происходит ее разрушение.

Предлагаемая гипотетическая модель повышения масштаба квазидискретности материала под действием нарастающей от внешнего воздействия диссипации фактически опирается на несомненное утверждение о внутренней изоляции физического микроуровня. Прямые подтверждения модели в физическом эксперименте неизвестны. Все наблюдения за поведением броуновских частиц проводились исключительно в равновесных системах или близких к ним. При этом характер микрофлуктуаций не принимался во внимание.

Однако для исследований в этой области еще в середине прошлого века начали разрабатывать методы молекулярной динамики с использованием вычислительных машин. Результаты численных экспериментов по молекулярному моделированию хаоса и процессов самоорганизации представлены в работах [12, 13, 14]. На картинах движения частиц при моделировании как равновесного, так и неравновесного состояний отчетливо видны возникающие в хаосе, локализованные в пространстве сгущения и разряжения атомов [12] и, аналогично, выделяющиеся при соответствующем масштабе наблюдения (осреднения) кинематические структуры [13, 14], свидетельствующие о сгущениях и разрежениях.

В работах [13, 14] проводилось компьютерное моделирование наступления неустойчивости Бенара в системе из 5050 твердых дисков-

атомов, двигавшихся и сталкивающихся в двумерном прямоугольном ящике с соотношением сторон 3/1 (описание моделирования по [15], стр. 54–56). Верхняя и нижняя стороны ящика поддерживались при различных «температурах» (диски отлетали от каждой из этих сторон с новой скоростью, соответствующей температуре стороны). Действие гравитации имитировалось внешней силой, приложенной к дискам и направленной против градиента температуры. В начальный момент диски были случайным образом распределены по ящику, а локальное распределение их скоростей соответствовало равновесному распределению при локальной температуре.

Все пространство системы было разделено на тысячу мелких «ящичков». Средняя скорость атомов-дисков определялась за некоторый промежуток времени в каждом из тысячи «ящичков». При модельной разности температур ниже критической в «жидкости» возникали малые вихри, которые быстро разрушались, не образуя устойчивых макроструктур. При условиях выше критической разности температур вихри не исчезают. Они вовлекают в свое движение все большее число дисков до тех пор, пока весь слой жидкости не окажется вовлеченным в вихревое движение. Финалом моделирования становится устойчивая макроструктура из нескольких вихрей-ячеек Бенара.

Характерно, что как до, так и после критической разности температур организованное движение (устойчивые или неустойчивые вихри) можно было обнаружить лишь при достаточно большом времени осреднения ($12 \cdot 10^6$ столкновений), т. е. при соответствующем масштабе наблюдателя или при наблюдении за явлениями соответствующего масштаба. Мгновенный снимок движений атомов-дисков показал бы, что система неупорядочена.

Учитывая размеры ящика и количество дисков, можно дать условную оценку толщины слоя «жидкости». Высота слоя составляла примерно 18 маленьких ящичков. В среднем в каждом ящике находилось 5 дисков, и в начальный момент по высоте слоя располагалось от 18 до 36 дисков-атомов. Это означает, что моделирование проводилось на очень тонком слое «жидкости». Поэтому появление и разрушение малых вихрей, размеры которых

не превышают половины высоты слоя, следовало бы отнести к микрофлуктуациям слабо неравновесного режима (квазиравновесного). С последующим ростом неравновесности и переходом через критическое значение разности температуры поведение малых вихрей соответствует нашему гипотетическому кризису сплошности материала системы и прорастанию микрофлуктуаций в макромасштаб с образованием устойчивой структуры типа ячеек Бенара.

7. Подытоживая сказанное, можно сделать следующие выводы:

1) физическая экспансия материала и субстанций в неравновесной системе, будучи направленной с диссипацией, **относится к фундаментальным явлениям движения материи в энтропийных процессах организации;**

2) энтропийная экспансия в неравновесной системе **сама готовит и запускает в действие механизм для возникновения и поддержания антиэнтропийного процесса — самоорганизации;**

3) этот механизм — рост масштабов квазидискретности материала системы;

4) самая примитивная из всех сложных механических систем — газ Больцмана — даже в состоянии равновесия демонстрирует готовность к организации через неугасающие микрофлуктуации материала, являющиеся потенциальными зародышами самоорганизации системы, скованной изоляцией.

8. Переходя к практической стороне вопроса, снова подчеркнем, что в подавляющем большинстве случаев предсказание вида структуры самоорганизации невозможно. Только богатый опыт и инженерное чутье позволяют делать оценки в малоисследованных случаях.

Помимо приведенных в начале статьи примеров самоорганизации в инженерных системах [1–4], отметим еще один интересный объект. Во всех современных воздушно-тепловых завесах, использующих диаметрально вентилируемые рабочие процесс движения воздуха через колесо является результатом самоорганизации.

Рассмотрим сначала вращающееся в неограниченном пространстве радиальное колесо барабанного типа (лопатки загнуты вперед). Вдоль внутренней вогнутой стороны каждой лопатки воздух будет выталкиваться из колеса. Всасывание в колесо от-

сутствует, и внутри колеса возникает разрежение, которое компенсируется возвратными потоками вдоль наружных выпуклых сторон лопаток. При невысокой частоте вращения формируется повторяющаяся на каждой лопатке одинаковая рециркуляционная зона. Во внешней части колеса рециркуляционная зона будет расширяться. Внутри колеса пространство ограничено, поэтому там сформируется плотно упакованная структура рециркуляционных областей от каждой лопатки. Описанная картина упорядоченного движения есть результат энтропийной организации неравновесной системы. Кажущаяся немонотонность характеристик связана исключительно со сложным устройством системы. Внутри каждой рециркуляционной зоны характеристики будут приблизительно монотонны.

С превышением частоты вращения некоторой критической величины нарастающие микрофлуктуации «подтолкнут» внешние возмущения к росту. Дальнейшая судьба структуры непредсказуема в плане конкретного ее вида. Заранее ясно только одно: красивое упорядоченное движение развалится на несколько крупных несимметричных втекающих и вытекающих из колеса потоков, охватывающих каждый по несколько лопаток. Более того, возникшие потоки станут трехмерными и нерегулярными. Они будут возникать, исчезать, появляться в новых местах. Картина антиэнтропийной самоорганизации окажется макромасштабным квазитурбулентным хаосом.

Для превращения свободного колеса в вентилятор надо было сделать один нетривиальный шаг: поместить колесо между двумя радиальными продольными стенками, разделяющими пространство на две части. Так в 1892 году француз Пауль Мортье изобрел и получил патент на тангенциальный вентилятор, в котором реализовано упорядоченное поперечное протекание потока сквозь колесо. Снаружи колеса формируются четыре области: со стороны всасывания — основной поток внутрь колеса и застойная зона, со стороны нагнетания — основной поток из колеса, повернутый на $90-180^\circ$ в направлении вращения, и интенсивная рециркуляционная зона между вытекающим потоком и стенкой. Внутри колеса образуется дугообразное протекание от стороны всасывания к нагнетанию и заходя-

щая внутрь около языка рециркуляционная зона [16, 17]. Эта зона является структурной составляющей общей картины, источником значительных потерь и невысокого КПД диаметральных вентиляторов. Многочисленные попытки подавить или рассеять зону [16, 18] приводили к значительным конструктивным осложнениям, но заметным успехом не увенчались. Тем не менее диаметральные вентиляторы имеют свои очевидные достоинства и оказались самыми востребованными во всем мире применительно к воздушно-тепловым завесам. А невысокий КПД вентиляторов в завесах не имеет значения, поскольку мощность привода обычно на один-два порядка меньше тепловой мощности завес.

9. Разработки новых устройств и технологий опираются в основном на традиционные методы расчетов с использованием теоретических моделей, построенных на энтропийных методах организации процесса (квазиравновесного, с линейными законами переноса). При этом на практике порой возникают необъяснимые отклонения от ожидаемого результата, появление в воздушных потоках непредусмотренных структур, снижающих эффективность устройства. Причины могут лежать в неосознанном использовании метода расчета за пределами применимости модели энтропийной организации, переходе в область антиэнтропийной самоорганизации. Поэтому даже общие представления о принципах, механизмах и границах самоорганизации помогут повысить надежность технического решения проблемы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Марр Ю. Н. Явления самоорганизации в инженерных системах зданий // Инженерные системы — АВОК — Северо-Запад. № 1. 2021. С. 10–17.
2. Марр Ю. Н. Еще раз о феномене радиального колеса типа Ц14-46 // Инженерные системы — АВОК — Северо-Запад. № 1. 2020. С. 6–12.
3. Марр Ю. Н. Дистанционное всасывание в технических приложениях // Инженерные системы — АВОК — Северо-Запад. № 1. 2022. С. 6–12.
4. Марр Ю. Н. Локализованное дистанционное тепловое воздействие закрученной струей // Инженерные системы — АВОК — Северо-Запад. № 3. 2022. С. 2–7.

5. Николис Г., Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах. М.: Мир. 1979. 512 с., а также И. Пригожин. От существующего к возникающему. М.: Наука. 1985. 328 с.

6. Хакен Г. Синергетика. М.: Мир. 1980.

7. Руденко А. П. Самоорганизация и синергетика. Электронный ресурс Что такое синергетика? Сайт С. П. Курдюмова «Синергетика» (spkurdyumov.ru), а также журнал «Сложные системы», 2013, № 2 (7), с. 4–39.

8. Плоткин И. Р. Некоторые замечания о законе возрастания энтропии. — Труды 6-го совещания по вопросам космогонии. М., 1959, с. 228–240.

9. Генкин И. Л. Энтропия и эволюция вселенной / Астрономия. Методология. Мировоззрение. М., Наука, 1979, с. 180–186.

10. Ландау Л. Д., Лифшиц В. М. Гидродинамика. Теоретическая физика. Т. VI. М.: Наука. 1988.

11. Седов Л. И. Методы подобия и размерности в механике. — М.: Наука. 1981.

12. Рейф Ф. Статистическая физика. Берклевский курс физики. Т. V. М.: Наука. 1972. 352 с.

13. Mareshal M., Kestemout E. Experimental Evidence for Convective Rolls in Finite two-dimensional Molecular Models // Nature. 1987. Vol. 329. P. 427–429.

14. Mareshal M., Malek Mansour M., Puhl A., Kestemout E. Molecular Hydrodynamics versus Hydrodynamics in two-dimensional Rayleigh-Benard System // Phys. Rev. Lett/ 1988. Vol. 61, p. 2550.

15. Пригожин И., Стенгерс И. Время, хаос, квант. К решению парадокса времени. Издание третье, переработанное и исправленное. Эдиториал УРСС. М. 2001. 240 с.

16. Бычков А. Г., Коровкин А. Г. О диаметральных вентиляторах. Труды ЦАГИ «Промышленная аэродинамика», вып. 24. 1962.

17. Коровкин А. Г., Феофилактов А. Н. Исследование структуры потока в диаметральной вентиляторе без внутреннего направляющего аппарата. Труды ЦАГИ «Промышленная аэродинамика», вып. № 3 (35). 1988.

18. Статьи Коровкина А. Г. с авторами в Трудах ЦАГИ «Промышленная аэродинамика». Вып. 29, 1973, вып. 1 (33), 1986, вып. 2 (34), 1987, вып. 4 (36), 1991.