

<sup>1)</sup> Межведомственная Лаборатория «ТРИБОФАТИКА», Гомель

<sup>2)</sup> Президиум НАНБ, Минск

<sup>3)</sup> ОИМ НАНБ, Минск

<sup>4)</sup> Белорусский государственный университет, Минск

## ОБ УРОВНЯХ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В МЕХАНИКЕ\*

Сосновский Л.А.<sup>1)</sup>, Витязь П.А.<sup>2)</sup>, Высоцкий М.С.<sup>3)</sup>, Журавков М.А.<sup>4)</sup>, Щербаков С.С.<sup>4)</sup>

*The short analysis of 4 levels of interdisciplinary researches in the mechanic is given; article is devoted to anniversary of known scientist-mechanic A. V. Chigarev.*

Усиление взаимосвязи наук – магистральная тенденция их современного развития [1-8]. Глубокий анализ этой тенденции дан, например, в работе [2], его главные выводы представлены на рисунке 1. Эволюцию наук можно кратко описать следующим образом. В древности существовала единая нерасчлененная (диффузная) наука, которая изучала весь мир в целом, отражаемый ею в диффузном состоянии. Затем наступает стадия дифференциации наук через их разобщение: каждая отдельная (частная) наука имела только один ( $k$  раз) свой собственный предмет, причем такое однозначное соотношение существовало для всех  $n$  наук, следовательно,  $k$  раз. Так был осуществлен принцип сепаратности и функциональности. Далее приходит время интеграции наук посредством их дифференциации. Здесь реализуется принцип комплексности и субстратности: во-первых, один объект изучается одновременно  $n$  науками; во-вторых, одна и та же наука изучает  $m$  различных объектов, причем такая ситуация повторяется бесчисленное множество раз, поскольку число изучаемых объектов практически безгранично. Наконец, прогнозируется, что единая наука будущего изучает (глобально) весь мир, во всех его проявлениях, при этом частные и комплексные науки сохраняют в ней хотя и подчиненное, но относительно самостоятельное место, изображаемое и виде точек внутри белой полосы (см. рисунок 1).

Хотя выводы, сделанные в работе [2], и могут вызвать критику, особенно относительно будущего, но несомненно одно: принцип комплексности действительно характерен для развития современных наук, а междисциплинарный характер исследований и есть тот механизм, который обеспечивает его реализацию.

Комплексность в научном исследовании – не простое сложение методов различных наук, не простое следование синтеза за анализом. Комплексность предполагает слияние наук воедино при изучении общего для них объекта – такое слияние, когда целое предшествует своим компонентам, при этом корень проблемы состоит в схватывании сущности "целого, мыслимого как многое", в выделении особых целостных свойств, позволяющих считать некоторую структуру не конгломератом разрозненных частей, а системой. Конечно, при этом предполагается, что существование целого дает возможность проводить процедуры расчленения системы на компоненты, и это разделение следует выполнять таким образом, чтобы, изучая структуру членения, получить существенные свойства системы (рисунок 2).

Итак, если объект исследования один, то и изучающие его науки должны быть взяты в единстве, которое должно соответствовать единству общего для них объекта. И если объект – система, то и его исследование должно быть выполнено на основе системного анализа. А последний направлен не только на познание существа изучаемых проблем и соответствующих объектов, но и на создание средств, обеспечивающих управление этими объектами, на разрешение имеющихся проблем [3]. Это единство исследовательских и преобразующих функций и обуславливает комплексный, междисциплинарный характер системных исследований.

\*Написано к юбилею известного ученого-механика доктора физико-математических наук профессора А.В. Чигарева.

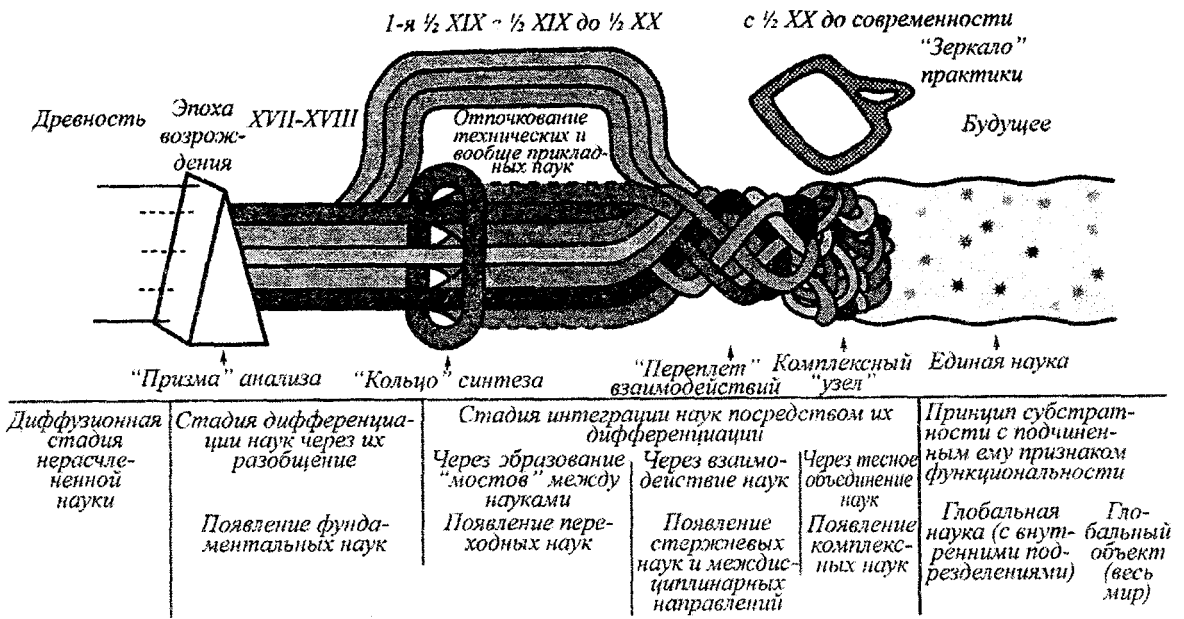
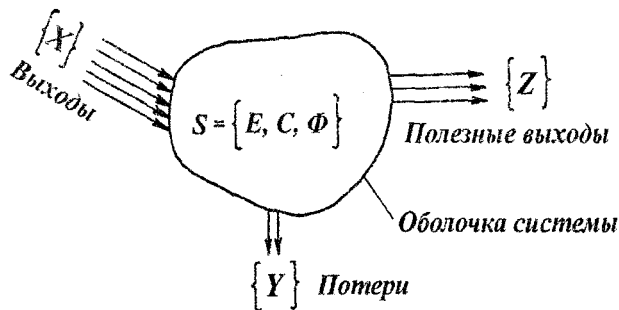


Рисунок 1 – Схема эволюции наук по Б. Кедрову

**О п р е д е л е н и е:** система есть многокомпонентная и многоуровневая совокупность элементов, взаимосвязанных структурно и функционально.

- I. Структура:  $S = \{E, C, \Phi\}$   
 а) элементы:  $E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$ ,  $k = 1, 2, \dots, n$   
 б) свойства:  $C = \{C(e_k)\}$   
 в) соотношения:  $\Phi = \{\Phi(e_k, e_m)\}$

- II. а) входы:  $\{X\}$   
 б) выходы:  $\{Y\}, \{Z\}$



- III. Функция:  $\{X\} \xrightarrow{Th} \{Y\}, \{Z\}$

Рисунок 2 – Схема системного анализа

Описанные выше исходные положения были в полной мере использованы при разработке методологических основ трибофатики [9-15]. Ее рождение и место среди разделов механики иллюстрируется на рисунке 3. Согласно этому рисунку, изучение простейшего материального объекта в виде движущейся точки привело к созданию теоретической механики. Когда было понято, что под воздействием многообразных нагрузок происходит своеобразное движение системы взаимосвязанных точек внутри твердого тела, возникла механика деформируемого твердого тела.

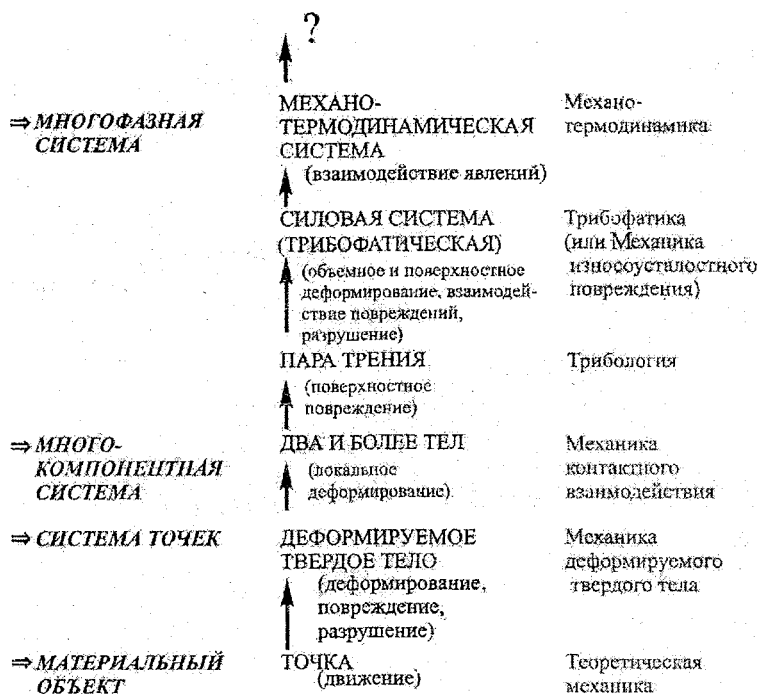


Рисунок 3 – Иерархическая структура некоторых объектов, изучаемых в механике: от простого к сложному

Деформируемое твердое тело – лишь один из компонентов многочисленных и разнообразных механических систем. Уже простейший случай сжатия двух неподвижных твердых тел вызвал развитие нового подхода в теории упругости – его называли контактной задачей. Она стала началом механики контактного взаимодействия тел (компонентов) при статическом, ударном, циклическом и других нагружениях. Очередной объект – пара трения, главной особенностью которой является относительное движение двух твердых тел, находящихся под действием контактной нагрузки. И появилась специальная научная дисциплина – трибология, основной задачей которой стало изучение закономерностей и особенностей трения и поверхностного повреждения различных материалов при скольжении, качении, проскальзывании, ударе и т.д. По существу, любая пара трения – многокомпонентная система: в ней неизбежно организуется так называемое третье тело, формируемое в области подвижного контакта за счет смазочного материала и/или продуктов трибодеструкции тонких поверхностных слоев контактирующих тел.

Более сложным, чем пара трения, является своеобразный объект – силовая (или трибофатическая) система, представление о которой введено совсем недавно (в конце XX века) [9]. Так называют всякую механическую систему, которая воспринимает и транзитно передает рабочую циклическую нагрузку и в которой одновременно реализуется процесс трения в любом его проявлении – при скольжении, качении, ударе и т.д. Другими словами, трибофатическая система – это пара трения, хотя бы один из элементов которой подвергается объемному повторно-переменному деформированию. Для таких систем характерно комплексное – износоусталостное повреждение; оно обусловлено кинетическим взаимодействием явлений усталости, трения, изнашивания, эрозии, коррозии и др. [11, 12]. Естественно, что обнаружение нового и специфического объекта привело к возникновению очередной научной дисциплины, которая получила краткое название: трибофатика (от греч. *tribo* – трение, франц. *fatigue* – усталость) Другое (более длинное) ее название – механика износоусталостных повреждений, или, в более широкой трактовке, механика трибофатических систем [10-12].

Трибофатика создавалась в результате междисциплинарных исследований на основе нескольких фундаментальных разделов механики (рисунок 4). С одной стороны, теории трения, изнашивания, смазки были объединены в единую научную дисциплину – трибологию ( $T$ ). Это естественно, потому что в парах трения реально сочетаются и взаимодействуют процессы трения и изнашивания, в том числе и со смазкой. С другой стороны, среди общих проблем динамики, прочности и устойчивости вычленилась механика усталостного разрушения ( $F$ ) как дисциплина, имеющая особое практическое значение для современного машиностроения. Чтобы эффективно решать комплексные задачи обеспечения надежности ( $R$ ) наиболее ответственных систем машин и оборудования по важнейшим критериям работоспособности, потребовалось создать трибофатику ( $TF$ ). Ее базой (фундаментом) стали многие разделы классической механики (см. внизу рисунок 4).

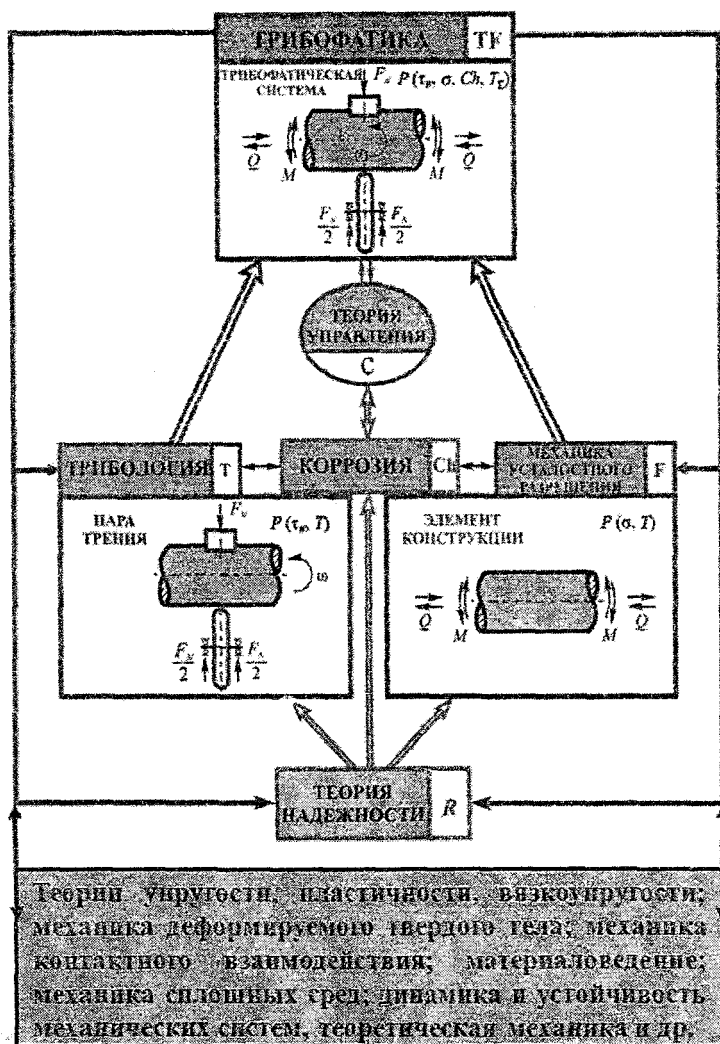


Рисунок 4 – Трибофатика как комплексная научная дисциплина

От частного к общему – таков путь познания, указанный на рисунке 4 широкими стрелками, направленными вверх. Но, конечно, не менее важен и обратный путь: от общего к частному; на рисунке 4 он указан жирными линиями со стрелками, которые идут вниз от трибофатики к другим дисциплинам. Общие идеи и методы, развиваемые в трибофатике, должны существенно обогащать и развивать частные научные дисциплины.

Таким образом, междисциплинарные исследования базируются на изучении взаимодействия наук, т.е. на выяснении взаимообусловленности явлений (процессов), ими изучаемых.

Мы различаем, в первом приближении, четыре уровня взаимодействия наук.

**Первый уровень** – это своего рода «скорая помощь в науке»: методы той или иной (одной) науки применяются и оказываются весьма полезными для другой (тоже одной) науки. Приведем два характерных примера.

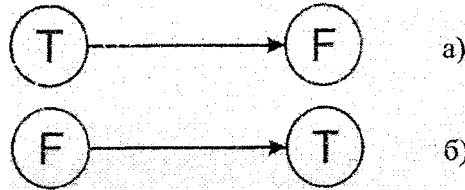
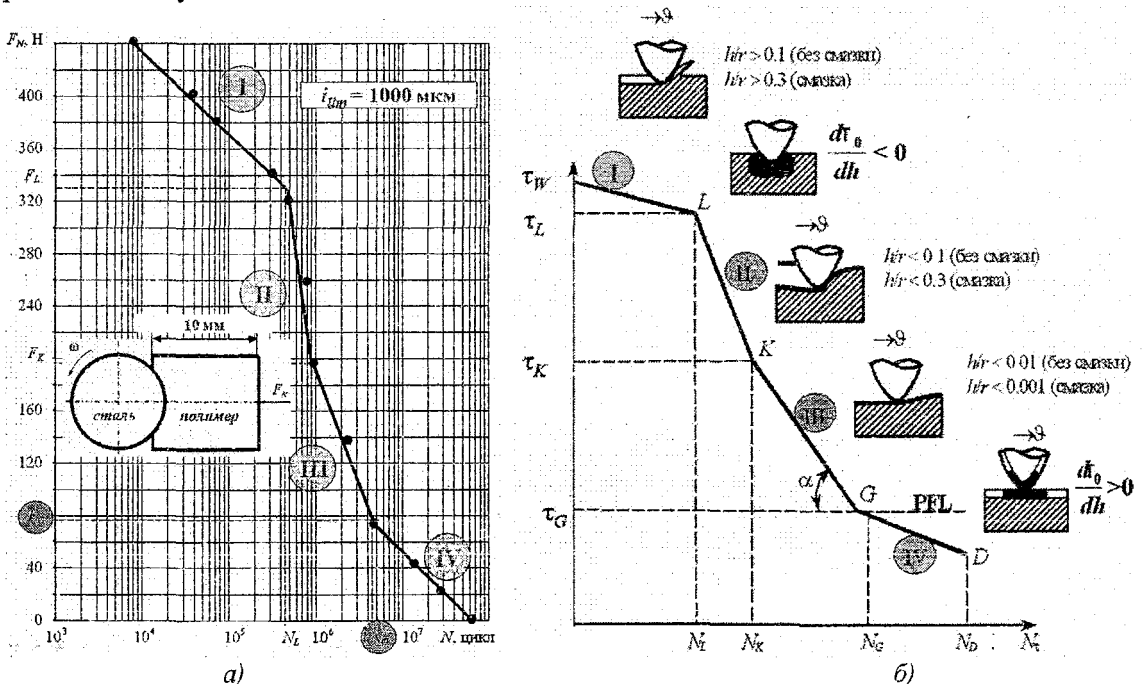


Рисунок 5 – Схема первого уровня междисциплинарных исследований

В 20-х годах прошлого столетия в рамках механики трения (обозначено Т на рисунке 5, а) была предложена линейная гипотеза суммирования повреждений – применительно к подшипникам качения [16, 17]. Позднее она была воспринята в механике усталостного повреждения и разрушения (обозначение F на рисунке 5, а) и получила широкое и эффективное применение в машиностроении (см., например, [18, 19]). Более того, она стала исходной идеей для разработки многих и разных (линейных и нелинейных) гипотез и теорий накопления повреждений материалов и технических объектов, работающих в разнообразных условиях [20].

Со временем, наоборот, оказалось, что некоторые методы и результаты исследований в механике усталостного повреждения и разрушения были восприняты и оказались полезными в трибологии (см. рисунок 5, б). Пример реализации такой «помощи» дан на рисунке 6 [21]. Как видно, для трибологии впервые предложена и реализована экспериментально обоснованная методика построения полной кривой фрикционной усталости.



- I – Квазистатическое повреждение ( $< 5 \cdot 10^3$  циклов);
- II – Малоцикловое повреждение ( $5 \cdot 10^3 \dots 10^6$  циклов);
- III – Многоцикловое повреждение ( $10^6 \dots 5 \cdot 10^6$  циклов);
- IV – Высокоресурсное повреждение ( $> 5 \cdot 10^6$  циклов)

Рисунок 6 – Кривая фрикционной усталости пары трения сталь 45 / полимер Ф4-ВМ (а) и ее схематизация с учетом механизмов трения по Крагельскому (б)

Если обратиться к истории науки, то можно обнаружить огромное число подобных примеров «скорой помощи»; она, такая помощь, – один из простейших «механизмов» развития научных исследований и быстрого получения новых результатов.

**Второй уровень** взаимодействия наук (в результате междисциплинарных исследований) можно определить как «*семейный подряд*» (рисунок 7). Как уже говорилось, три «близкие» теории (трения, смазки, изнашивания) были объединены в комплексную науку – трибологию, которую на рисунке 7 символизирует «законченный» круг. И такое объединение, как хорошо известно, оказалось не только эволюционно естественным, но и весьма плодотворным для современной техники [22–24].

Конечно, второй уровень более плодотворен, чем первый – ввиду его комплексности.

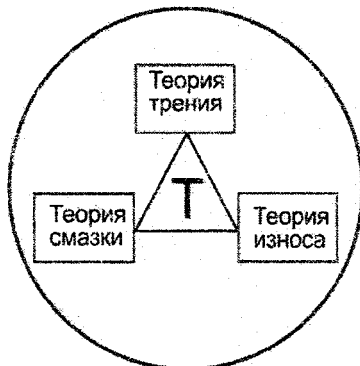


Рисунок 7 – Схема второго уровня междисциплинарных исследований

**Третий уровень** взаимодействия наук (в результате междисциплинарных исследований) представлен на рисунках 4, 8 и 9 – его можно определить как «*коллективизацию*». Этот подход ведет к разработке новых принципов исследований. Их реализация в трибологии привела к установлению двух эффектов [11, 12]. *Прямой эффект*: влияние процессов и условий трения и изнашивания на изменение характеристик сопротивления усталости; его называют [11, 14] эффектом Сосновского-Серенсена. *Обратный эффект*: влияние процессов и условий усталостного повреждения на изменение характеристик износостойкости; его называют [11, 14] эффектом Сосновского-Шара. На рисунках 8 и 9 эти эффекты представлены схематически.

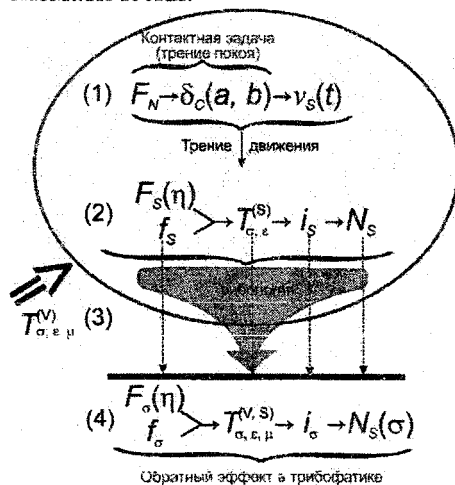


Рисунок 8 – Схема влияния поля объемного деформирования (тензор  $T_{y, \epsilon, \mu}^{(V)}$ ) на изменение характеристик трения, изнашивания и ресурса ( $F_s, f_s$  – сила и коэффициент трения,  $i$  – износ,  $N_s$  – износостойкость,  $T_{y, \epsilon}^{(S)}$  – тензор напряжений (деформаций) при контактном взаимодействии)

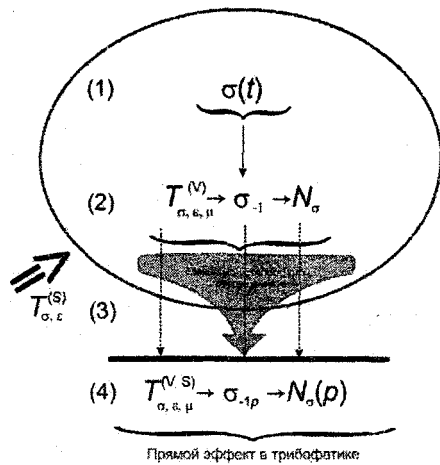


Рисунок 9 – Схема влияния поля поверхностного (контактного) деформирования (тензор  $T_{y, \epsilon}^{(S)}$ ) на изменение характеристик сопротивления усталости ( $\sigma_{-1}$  – предел выносливости,  $N_y$  – усталостная долговечность,  $T_{y, \epsilon, \mu}^{(V)}$  – тензор напряжений (деформаций) при объемном (циклическом) нагружении)

В обоих случаях результаты частных исследований (1), (2) и (3) в каждой из наук дают принципиально новые результаты (4) и для одной, и для другой науки: прямой эффект – для механики усталостного разрушения (см. рисунок 9) и обратный эффект – для трибологии (см. рисунок 8). А оба эти эффекта (4) в совокупности

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{\sigma}(\eta) \\ f_{\sigma} \end{array} \right\} \rightarrow T_{\sigma, \epsilon, \mu}^{(V, S)} \rightarrow i_{\sigma} \rightarrow N_s(\sigma) \quad (5)$$

$$T_{\sigma, \epsilon, \mu}^{(V, S)} \rightarrow \sigma_{-1p} \rightarrow N_{\sigma}(p)$$

и составляют принципиально новую научную дисциплину – трибофатику [7-15]. На рисунках 8 и 9 обозначено:  $T_{y, \epsilon, \mu}^{(V, S)}$  – объединенный (совмещенный) тензор напряжений (деформаций), обусловленный контактной и внеконтактной (объемной) нагрузками (одновременно и в единой области деформирования, называемой опасным объемом в трибофатической системе);  $\sigma_{-1p}$  и  $N_y(p)$  – предел выносливости и усталостная долговечность объекта с учетом влияния условий трения и изнашивания (индекс  $p$ );  $F_y(z)$  и  $f_y$  – сила и коэффициент трения, определенные с учетом условий циклического нагружения (индекс  $y$ );  $i_y$ ,  $N_s(y)$  – износ и долговечность по критерию износостойкости, установленные с учетом влияния  $y$ .

Эффективность и плодотворность такого уровня междисциплинарных исследований известны [10-12] и иллюстрируются здесь результатами некоторых исследований (рисунки 10 и 11). Как видно из этих рисунков, оба эффекта являются практически весьма значимыми. Так, сопротивление усталости высокопрочной стали снижается на 30 % и более, а долговечность – в 10 раз и более, если в опасном сечении реализуется процесс трения скольжения (см. рисунок 10). Примерно в такой же мере изменяется коэффициент трения в зависимости от уровня циклической (неконтактной) нагрузки (см. рисунок 11). Такого рода экспериментальные данные позволили сформулировать [11, 12] обобщенный закон трения (в трибофатической системе): в общем случае сила трения пропорциональна как контактной, так и объемной нагрузке, если последняя возбуждает циклические напряжения ( $\pm u_a$ ) в области контакта.

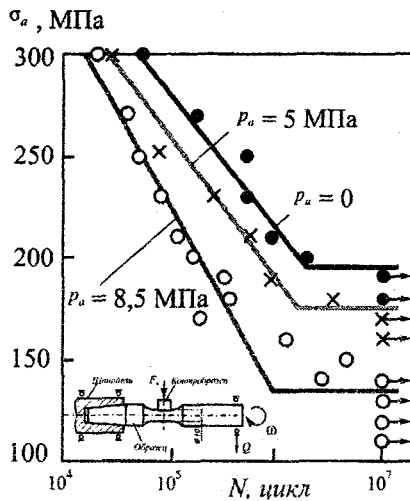


Рисунок 10 – Прямой эффект – результаты испытаний на фрикционно-механическую усталость системы сталь 40Х (вал) / полимер ВКВ-30Н (подшипник)

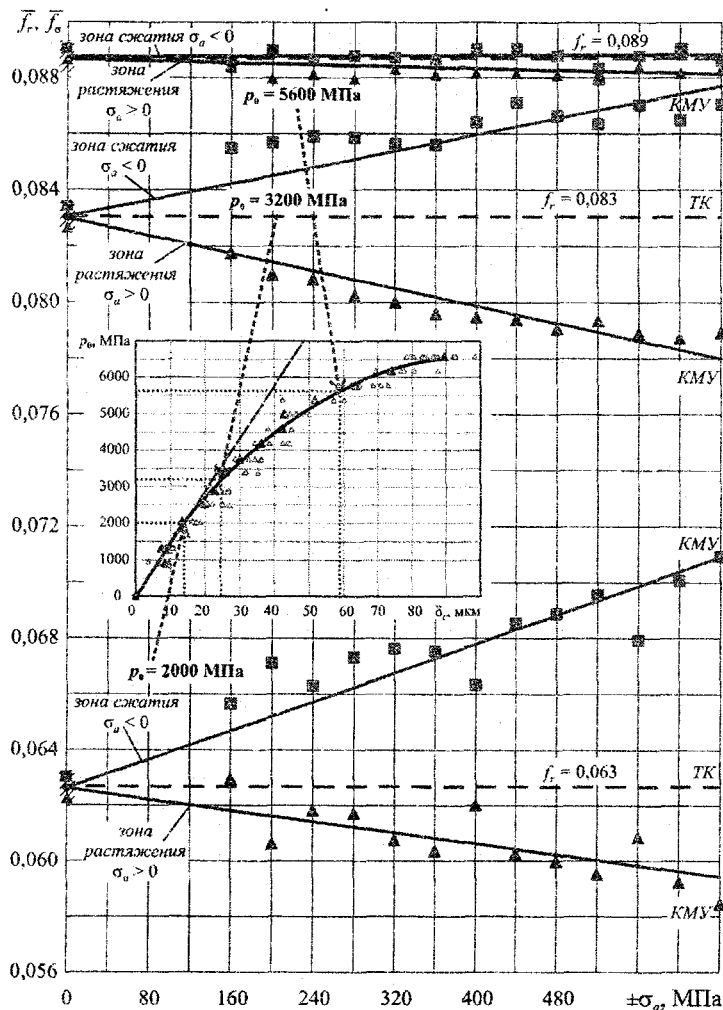


Рисунок 11 – Обратный эффект – зависимость средних значений коэффициента сопротивления качению  $\bar{f}_y$  для трибофатической системы сталь 18ХГТ / сталь 18ХГТ от амплитуды напряжений  $\sigma_a$  (пунктиром указано значение  $\bar{f}_r$  в паре трения) ( $p_0$  – давление в центре контактной площадки, ТК – трение качения, КМУ – контактно-механическая усталость)

Результаты, полученные при междисциплинарных исследованиях данного уровня, в ряде случаев оказываются новыми и полезными для других – классических разделов механики. Рассмотрим, например, общее решение (поставленной в трибо-



фатике) задачи о напряженно-деформированном состоянии трибофатической системы (рисунок 12).

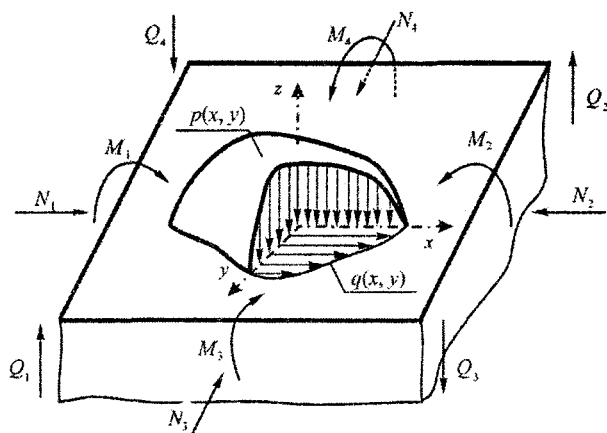


Рисунок 12 – Общая схема нагружения трибофатической системы

В соответствии с этим рисунком, напряженное состояние в любой точке  $M(x, y, z)$  определяется из общего соотношения

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^{(n)} + \sigma_{ij}^{(\tau)} + \sigma_{ij}^{(b)}, \quad i, j = x, y, z, \quad (6)$$

где  $\sigma_{ij}^{(n)}$ ,  $\sigma_{ij}^{(\tau)}$ ,  $\sigma_{ij}^{(b)}$  – тензоры напряжения, вызванные соответственно нормальной контактной нагрузкой, касательной контактной нагрузкой, внеконтактными нагрузками.

Совмещенное напряженное состояние, определяемое выражением (6), имеет вид [11]

$$\begin{aligned} \sigma_{ij} &= \sigma_{ij}^{(n)} + \sigma_{ij}^{(\tau)} + \sigma_{ij}^{(b)} = \left[ \sigma_{ij}^{(hs)} \underset{z}{\nabla} \sigma_{ij}^{(surf)} \right] + \sigma_{ij}^{(\tau)} + \sigma_{ij}^{(b)} = \\ &= \left[ \iint_{S(\xi, \eta)} p(\xi, \eta) \sigma_{ij}^{(B)}(\xi - x, \eta - y, z) d\xi d\eta \underset{z}{\nabla} \sigma_{ij}^{(S)}(x, y) \right] + \\ &+ \iint_{S(\xi, \eta)} q(\xi, \eta) \sigma_{ij}^{(C)}(\xi - x, \eta - y, z) d\xi d\eta + \sigma_{ij}^{(M)}(x, y, z) + \\ &+ \sigma_{ij}^{(N)}(x, y, z) + \sigma_{ij}^{(Q)}(x, y, z). \end{aligned} \quad (7)$$

Отметим: объединенное напряженное состояние описывается в модели Сосновского – Журавкова – Щербакова (7) суперпозицией напряжений, обусловленных как контактной, так и внеконтактными нагрузками. Поэтому, с точки зрения трибофатики, анализ (7) возможен с двух позиций. С одной стороны, можно интересоваться, как поле напряжений, обусловленных объемным деформированием, возмущается в локальной области, в которой одновременно возбуждается поле контактных напряжений. Такой анализ полезен, когда в трибофатической системе реализуется прямой эффект. По существу, это задачи теории упругости, освобожденные от принципа Сен-Венана. С другой стороны, можно интересоваться, как изменяется локальное поле контактных напряжений, когда на него накладывається поле напряжений, обусловленных объемным деформированием. Такой анализ полезен, когда в трибофатической системе реализуется обратный эффект. По существу, это новый класс задач в механике контактного взаимодействия. Понятно, что уравнение (7) позволяет делать подобные анализы как в количественном отношении, так и в качественном плане практически при любых условиях нагружения.

Еще примеры.

Используя методологию трибофатики, дано развитие основных положений *механики поврежденности*. Так, введено обобщенное представление о повреждении: это всякое изменение состава, строения, размеров, массы, объема, сплошности и, следовательно, механо-физико-химических свойств материала; разрушение (в традиционном понимании) трактуется как один из видов повреждения (критическое повреждение). Численно обобщенное повреждение может характеризоваться любым числом в интервале  $0 \leq \omega \leq \infty$ ; при этом, если  $\omega \rightarrow \infty$ , то это значит, что характерный размер продуктов распада тела  $d_\omega \rightarrow 0$ , т.е. происходит его разложение на сколь угодно малые частицы, атомы и т.д. В общем плане рассматривается два принципиально разных типа состояний поврежденности: докритическое (традиционное понимание:  $0 \leq \omega \leq 1$ ) и закритическое – разделение тела на большое число (множество) частей:  $1 < \omega \rightarrow \infty$ .

В *механике деформируемого твердого тела* плодотворной стала разработанная в трибофатике обобщенная модель объектов с опасным объемом. Кратко изложим основные этапы ее формирования.

В сопротивлении усталости материалов и элементов конструкции такого рода мера поврежденности была предложена в рамках статистической модели деформируемого твердого тела с опасным объемом [33]. Ее разработка иллюстрируется на рисунке 13 на простейшем примере изгиба вала. Когда стало ясно, что в условиях усталости модель тела с опасной точкой (рисунок 13, а) несостоятельна, были предложены две новые модели – тела с опасным сечением Серенсена-Когеева (рисунок 13, б) и тела с опасной поверхностью Ваганова (рисунок 13, в) [34, 35]. Первая из них учитывала то обстоятельство, что первичные усталостные повреждения (в том числе и микротрещины) возникают не только в точке на поверхности, но и на некоторой глубине циклически деформируемого твердого тела. Вторая из них принимала во внимание тот факт, что указанные повреждения обнаруживаются не только в опасном сечении (с максимальным уровнем напряжения), но и на прилегающей к нему поверхности, где напряжения на 5...15 % меньше максимального.

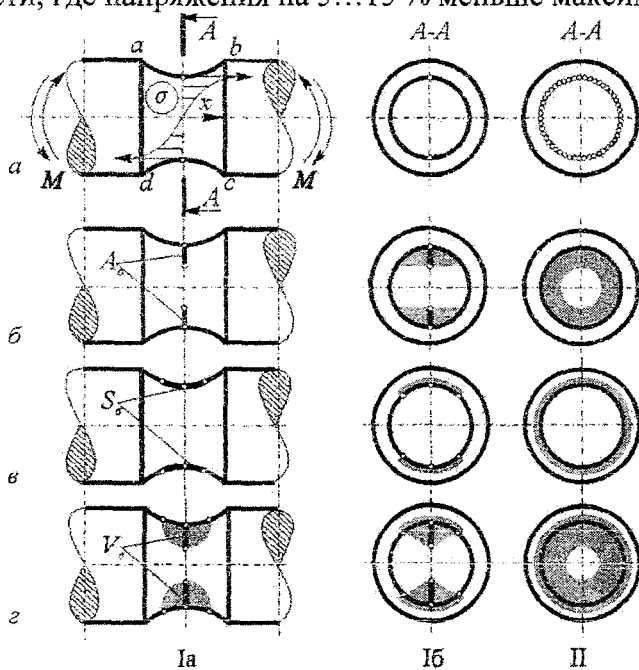


Рисунок 13 – Схематическая иллюстрация моделей деформируемого твердого тела с опасной точкой (а), с опасным сечением (б), с опасной поверхностью (в) и с опасным объемом (г) при статическом (I а, I б) и циклическом (II) нагружении

Естественным обобщением этих частных моделей и стала модель тела с опасным объемом Сосновского (называемая моделью ТОПО) (рисунок 13г), согласно которой абсолютная мера поврежденности

$$V_{py} = \iiint_{\sigma \geq \sigma_{-1min}} dx dy dz \quad (8)$$

определяется как объем материала с критическим уровнем напряжений в нем. Критерием ограничения опасного объема (8) служит условие

$$\sigma \geq \sigma_{-1min}, \quad (9)$$

где  $\sigma_{-1min}$  – нижняя граница  $\sigma_{-1min}$  рассеяния пределов выносливости ( $\sigma_{-1}$ ). В случае плоского изгиба мера (8) является, по существу, статической, или, лучше сказать, квазистатической (рисунок 13, I а и I б), а при изгибе вала с вращением – динамической, поскольку она формируется за один его оборот (рисунок 13, II). На рисунках 13, I и 13, II дано сравнение конфигураций опасных объемов в обоих случаях.

Если  $V_0$  – рабочий объем элемента конструкции, то вводится *относительная мера поврежденности*

$$0 \leq \frac{V_{py}}{V_0} = \omega_\sigma \leq 1, \quad (10)$$

в соответствии с которой необратимая повреждаемость отсутствует, если

$$\omega_\sigma = \frac{V_{py}}{V_0} = 0, \quad (10a)$$

так что (10a) рассматривается как *обобщенное условие надежности* (неразрушения) *элемента конструкции по критерию сопротивления усталости*. Когда

$$\omega_\sigma = \frac{V_{py}}{V_0} = 1 \quad (10б)$$

наступает *предельное состояние по критерию усталостного разрушения* (разделение элемента конструкции на части). Любые состояния поврежденности описываются, следовательно, неравенством

$$0 < \omega_\sigma = \frac{V_{py}}{V_0} < 1. \quad (10в)$$

В трибологии представление о том, что износ определяется «слоем интенсивно деформируемого материала» является общепризнанным (см., например, [23, 36, 37]), однако критерии ограничения такого слоя не формулируются, поэтому строгая методика определения опасного объема при трении отсутствует. И только в трибофатике дано обоснованное решение этой задачи.

Поскольку в области контакта напряженно-деформированное состояние является существенно трехмерным, то модель (8) трансформируется следующим образом:

$$V_{ij} = \iiint_{g_{ij}(\cdot) \geq 1} dV \quad (11)$$

где  $g_{ij} = \sigma_{ij} / \sigma_{ij}^{*lim}$  – повреждающие напряжения,  $\sigma_{ij}^{*lim}$  – предельные напряжения.

Модель (11) разработали Л.А. Сосновский, М.А. Журавков и С.С. Щербаков [11, 38, 39].

Согласно (11), в паре трения можно вычислить целый ряд характеристик (мер) поврежденности, которые определяются, например, компонентами контактных напряжений, главными или октаэдрическими напряжениями, тензором напряжений и т. д. При этом, как и с помощью модели (8), определяются и статические, и динамические опасные объемы. Если указанные частные опасные объемы пересекаются в заданных условиях испытания или эксплуатации, образуется совмещенный опасный объем, в котором наиболее вероятно возникновение первоначальных микротрещин – источников поверхностного и подповерхностного разрушения (износа) при трении.

В трибофатической системе опасные объемы формируются тензорами напряжений, обусловленных как контактной, так и неконтактными нагрузками. И в таком случае возможно определение комплексного опасного объема

$$(V_{ij}^{(\sigma)} + V_{ij}^{(p)}) \Lambda_{ij} = V_{ij}, \quad \Lambda_{\sigma, p} \geq 1, \quad (12)$$

в котором и развивается комплексное же износоусталостное повреждение.

Комплексная мера (12), по существу, опосредованно характеризует концентрацию повреждений в опасных областях элементов трибофатической системы. При этом, в зависимости от условий взаимодействия, концентрация повреждений может либо возрасть (и тогда  $\Lambda_{ij} > 1$ ), либо, наоборот, снижаться (и тогда  $\Lambda_{ij} < 1$ ). Следовательно, функция взаимодействия  $\Lambda_{ij}$  обобщенно описывает не только результат, но и направленность взаимодействия повреждений, и, значит, их опасность.

На рисунке 14 представлены опасные объемы  $V_{int}$  для разных условий деформирования. Из данного рисунка видно, что поврежденность при одновременном действии как контактных, так и неконтактных сил ( $V_{int}^{(n+\tau+b)}$ ) примерно на 17% больше, чем в случае действия лишь нормальной контактной нагрузки ( $V_{int}^{(n)}$ ).

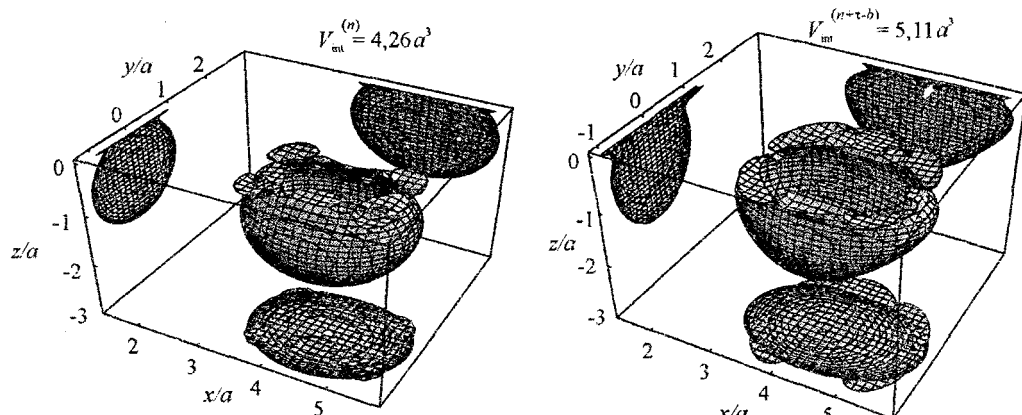


Рисунок 14 – Опасные объемы  $V_{int}^{(n)}$ ,  $V_{int}^{(n+\tau+b)}$  при  $\sigma_{xx}^{(b)} = 0.02(18 - x/a)(1.5 + z/a)$ ,

$$\sigma_{int}^{*lim} = 0.18 p_0, f = 0.05, b/a = 0.5$$

Таким образом, поскольку многообразные и бесчисленные акты и эффекты взаимодействия повреждений многих типов не могут быть точно описаны и предсказаны, вводится представление о взаимодействии опасных объемов, которое и содержит реальный комплекс необратимых повреждений (дефектов), порождаемых действием соответствующих полей напряжений (деформаций). Опасный объем может служить эквивалентом комплекса повреждений, поскольку его величина пропорциональна уровню напряжений (деформаций) и, следовательно, количеству (концентрации) дефектов (повреждений).

Еще один пример – это открытие явления тропи [27, 28], которое органически входит в практически важный раздел классической механики – динамику и устойчивость механических систем. Явление тропи – это образование нерегулярных остаточных поверхностных волнообразных повреждений в результате нестационарного процесса циклического упругопластического деформирования в зоне контактного взаимодействия при трении качения. Оказалось, что такие повреждения характерны для железнодорожных рельсов в тяжелых условиях эксплуатации.

Таким образом, коллективизация – это тесное (органическое) взаимодействие и плодотворная взаимопомощь в развитии ряда разделов механики, использующих методологию и результаты какой-либо одной (как правило – новой) научной дисциплины.

И наконец, *четвертый уровень* взаимодействия наук (в результате междисциплинарных исследований) – его можно определить как *объединение и обобщение явлений*.

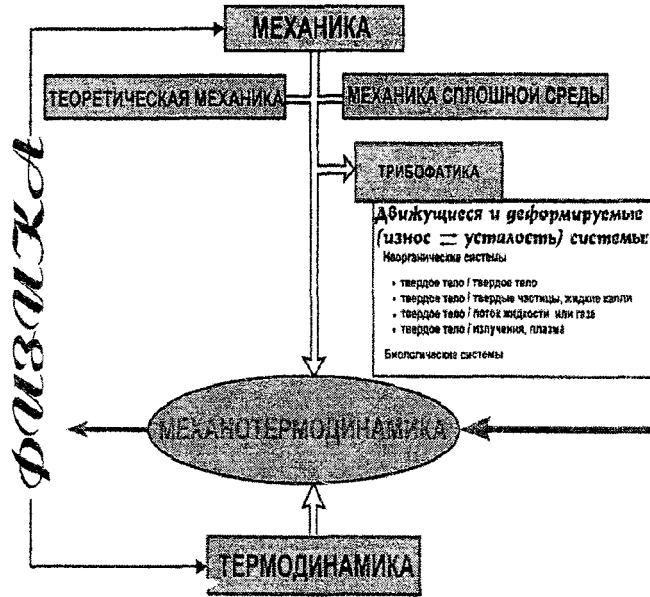


Рисунок 15 – Пути к механотермодинамике

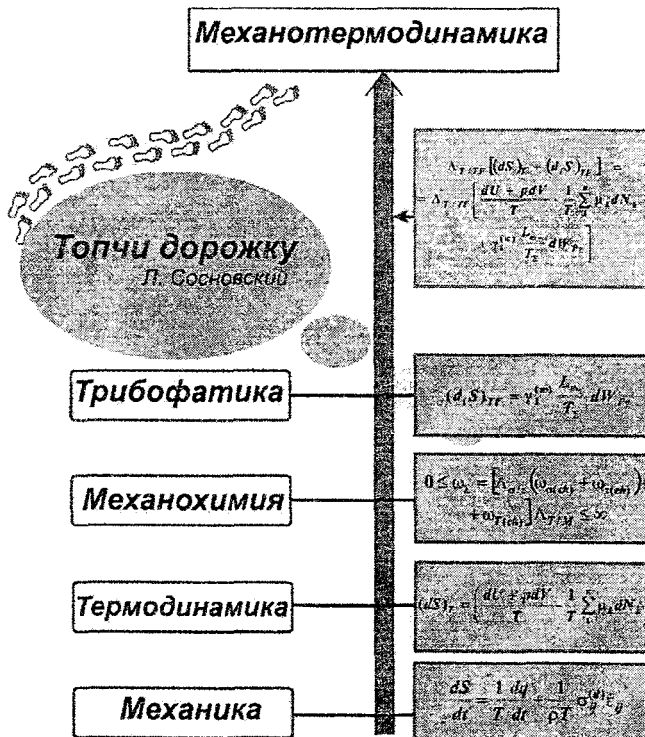


Рисунок 16 – К формированию механотермодинамики

В качестве примера речь может идти о возможности (и необходимости) построения новой физической дисциплины – механотермодинамики (рисунок 15 и 16), которая базируется на двух началах [25-28].

Первое начало механотермодинамики утверждает, что *повреждаемость всего сущего не имеет мыслимых границ*:

$$\bar{\omega}_{\Sigma} = \bar{\omega}_{\Sigma}(U_{\Sigma}^{eff}) \xrightarrow{\vec{I}} \infty \quad (13)$$

Это означает, что для эволюции всякой системы неизбежен односторонний процесс ее повреждения и разложения – в конечном счете на бесконечно большое количество малых составляющих (фрагментов, атомов, элементарных частиц и т. д.). По существу, оно равносильно признанию тезиса о нескончаемости эволюции, если принять во внимание, что продукты имеющего быть распада любой системы становятся строительным материалом для новых систем. Иными словами, наша Вселенная неуничтожима, поскольку она эволюционирует по поврежденности. Это соответствует философскому представлению о том, что материя и движение вечны, а повреждаемость есть фундаментальное свойство (и обязанность) всех систем, в том числе живых и разумных.

Второе начало механотермодинамики утверждает, что *потоки эффективной энергии (энтропии), обусловленные источника разной природы, не аддитивны – они взаимодействуют диалектически:*

$$U_{\Sigma}^{eff} = U_{\Sigma}^{eff}(\Lambda_1, \dots, \Lambda_m, U_1, \dots, U_n), \quad m < n \quad (14)$$

$\Lambda$ -функции взаимодействия должны принимать три класса значений ( $\Lambda \approx 1$ ), чтобы описать не только единство и борьбу, но и направленность процессов физического упрочнения-разупрочнения в системе, т.е. эволюцию системы по поврежденности.

По нашему мнению, развитие исследований по механотермодинамике является одной из самых актуальных и перспективных проблем современной механики.

Наконец, вернемся к рисунку 3, вверху которого поставлен красноречивый вопрос: а что дальше? На рисунке 17 дано продолжение рисунок 3 – всего на одну ступень: мы ожидаем развития биомеханики [29, 30], которое связываем с исследованием феномена жизни с позиций трибофатика как процесса накопления необратимых повреждений – биологических, физических, экологических, нравственно-психологических, интеллектуальных и др. [8, 27, 28, 31]. В первом приближении оказывается возможным изучить некоторые аспекты поведения динамической системы с элементами разума (пленарный доклад по этой теме сделал один из авторов данной статьи на V Белорусском Конгрессе по теоретической и прикладной механике «Механика-2011» (Минск, 26-28 октября 2011 г.)).

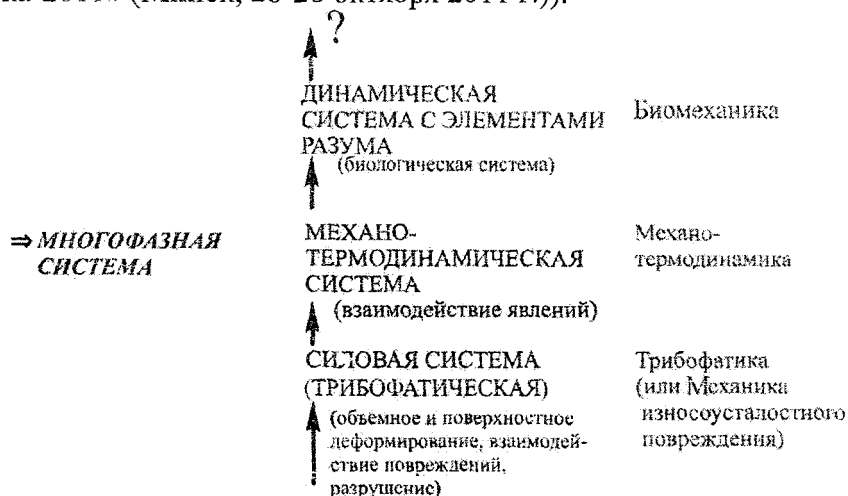


Рисунок 17 – К динамической системе с элементами разума

В заключение еще раз заметим, что, согласно рисункам 3 и 17, чем выше располагается та или иная наука на иерархической лестнице, тем она сложнее и, если можно так выразиться, мощнее.

А что будет дальше – за динамической системой с элементами разума? В работах [11, 32] прогнозируется: по большому счету – реальная система; в указанных работах формализуется постановка этой архисложной проблемы (в первом приближении, конечно).

В качестве общего заключения к этой работе можно сказать следующее: XXI век – это, пожалуй, век междисциплинарных исследований; они-то и обеспечат (вряд ли предсказуемый нынче, в 2011 г.) поток удивительных научных открытий.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Взаимодействие наук. Теоретические и практические аспекты / отв. ред. Б.М. Кедров и П.В. Смирнов. – М.: Наука, 1984. – 350 с.
2. Кедров, Б.М. О современной классификации наук (основные тенденции в ее эволюции) / Б.М. Кедров // Диалектика в науке о природе и человеке. Единство и многообразие мира, дифференция и интеграция научного знания. – М.: Наука, 1983. – С. 5–45.
3. Гвишиани, Д.М. Теоретико-методологические основания системных исследований и разработка проблем глобального развития / Д.М. Гвишиани // Системные исследования. Методологические проблемы: Ежегодник. – М.: Наука, 1982. – С. 7–25.
4. Степин, В.С. Институциональные изменения в современной науке / В.С. Степин // Наука и инновации. – 2009. – № 12(82). – С. 5–9.
5. Лазаревич, А.А. Наука в постиндустриальном обществе / А.А. Лазаревич // Наука и инновации. – 2009. – № 12(82). – С. 15–18.
6. Можейко, М.А. Теория хаоса, или Порядок через флуктуацию / М.А. Можейко // Наука и инновации. – 2009. – № 12(82). – С. 28–30.
7. Водопьянов, П.А. Синергетика и глобальный эволюционизм: диалог науки и философии / П.А. Водопьянов, Л.Л. Мельникова // Проблемы управления. – 2008. – № 2(27). – С. 225–232.
8. Философия, синергетика и трибофатика. Научная сессия: тр. VI-го Международного симпозиума по трибофатике (ISTF 2010), 25 октября – 1 ноября 2010 г., Минск (Беларусь) / редкол.: М.А. Журавков (пред.) [и др]. – Минск: БГУ, 2010. – Т. 1. – С. 155–164.
9. Слово о трибофатике / ред.-сост. А.В. Богданович; авт.: В.И. Стражев [и др.]. – Гомель–Минск–Москва–Киев: Remika, 1996. – 132 с.
10. Sosnovskiy, L.A. Tribo-fatigue. Wear-fatigue damage and its prediction (Foundations of engineering mechanics) / L.A. Sosnovskiy. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005.
11. Сосновский, Л.А. Механика износоусталостного повреждения / Л.А. Сосновский. – Гомель: БелГУТ, 2007. – 434 с.
12. Сосновский, Л.А. Введение в трибофатику. Пособие к лекционному курсу / Л.А. Сосновский, М.А. Журавков, С.С. Щербаков. – Минск: БГУ, 2010.
13. Витязь, П.А. От науки к образованию и производству / П.А. Витязь // Наука и инновации. – 2010. – № 9(91). – С. 12–16.
14. Высоцкий, М.С. Новое слово в механике / М.С. Высоцкий // Наука и инновации. – 2010. – № 9(91). – С. 17–19.
15. Журавков, М.А. Фундаментальные и прикладные задачи трибофатики: тр. VI-го Международного симпозиума по трибофатике (ISTF 2010), 25 октября – 1 ноября 2010 г., Минск (Беларусь) / редкол.: М.А. Журавков (пред.) [и др]. – Минск: БГУ, 2010. – Т. 1. – С. 87–96.
16. Palmgren, A. Die Lebensdauer von Kugulagern VDJ. – 1924. – S. 339.
17. Miner, M.A. Cumulative damage in fatigue / M.A. Miner // J. Appl. Mech. – 1945. – 12. – S.A. 159.
18. Коллинз, Дж. Повреждение материалов в конструкциях: анализ, предсказание, предотвращение / Дж. Коллинз. – М.: Мир, 1984. – 624 с.

19. Трощенко, В.Т. Соппротивление усталости металлов и сплавов: справочник в 2 т. / В.Т. Трощенко, Л.А. Сосновский. – Киев: Наукова думка, 1987. – Т. 1. – 510 с.; Т. 2. – 825 с.
20. Сосновский, Л. А. Механика усталостного разрушения: словарь-справочник: в 2 т. / Л.А. Сосновский. – Гомель: НПО «ТРИБОФАТИКА», 1994. – Т.1. – 328 с.; Т. 2. – 340 с.
21. Сосновский, Л.А. Основы трибофатики: учебное пособие для студентов высших технических учебных заведений: в 2 т. / Л.А. Сосновский. – Гомель: БелГУТ, 2003. – Т. 1. – 246 с.; Т. 2. – 234 с.
22. Крагельский, И.В. Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
23. Основы трибологии / А.В. Чичинадзе [и др.]. – М.: Машиностроение, 2001. – 663 с.
24. Мышкин, Н.К. Трибология. Принципы и приложения / Н.К. Мышкин, М.И. Петраковец. – Гомель: ИММС НАНБ, 2002. – 304 с.
25. Сосновский, Л.А., О возможности построения механотермодинамики / Л.А. Сосновский, С.С. Щербаков // Наука и инновации. – 2008. – № 2 (60). – С. 24–29.
26. Высоцкий, М.С. Механотермодинамическая система как новый объект исследования / М.С. Высоцкий, П.А. Витязь, Л.А. Сосновский // Механика машин, механизмов и материалов. – 2011. – № 2. – С 5–10.
27. Сосновский, Л.А. Сюрпризы трибофатики / Л.А. Сосновский, С.С. Щербаков. – Гомель: БелГУТ, 2005. – 192 с.
28. Sosnovskiy, L.A. Surprises of Tribo-Fatigue / L.A. Sosnovskiy, S.S. Sherbakov. – Minsk: Magic book, 2009. – 200 p.
29. Чигарев, А.В. Биомеханика: учебник / А.В. Чигарев, Г.И. Михасев. – Минск: Изд-во Гревцова, 2010. – 284 с.
30. Бранков, Г. Основы биомеханики / Г. Бранков. – М.: Мир, 1981. – 254 с.
31. Сосновский, Л.А. Трибофатика: о диалектике жизни / Л.А. Сосновский. – 2-е изд. – Гомель: НПО ТРИБОФАТИКА, 1999. – 116 с.
32. Витязь, П.А. Об объектах, изучаемых в механике / П.А. Витязь, М.С. Высоцкий, Л.А. Сосновский // Теоретическая и прикладная механика: Межведомственный сборник научно-методических статей. – Вып.23. – Минск: БНТУ, 2008. – С. 3–12.
33. Сосновский, Л.А. Статистическая механика усталостного разрушения / Л.А. Сосновский. – Минск, 1987. – 288 с.
34. Серенсен, С.В. Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность / С.В. Серенсен, В.П. Когаев, Р.М. Шнейдерович. – М. – 488 с.
35. Вагапов, Р.Д. Статистическая теория рассеивания случайной координаты повреждения тела / Р.Д. Вагапов // Машиноведение. – 1970. – № 4. – С. 63–74.
36. Прочность материалов и конструкций / редкол. : В.Т. Трощенко [и др.]. – Киев, 2005. – 1088 с.
37. Сысоев П.В. Деформация и износ полимеров при трении / П.В. Сысоев, П.Н. Богданович, А.Д. Лизарев. – Минск, 1985. – 239 с.
38. Труды V Международного симпозиума по трибофатике (ISTF 2005), 3–7 октября 2005 г., Иркутск (Россия): в 3 т. / отв. ред. А.П. Хоменко. – Иркутск, 2005. – Т. 1. – 497 с.; Т. 2. – 383 с.; Т. 3. – 388 с.
39. Журавков, М.А. Расчет опасных объемов при контактном нагружении / М.А. Журавков, С.С. Щербаков // Вестн. БГУ. – Сер. 1. – 2007. – № 1. – С. 117–122.

*Поступила 14.12.11*