НОВАЯ НАУКА

Международный центр
научного партнерства

NEW SCIENCE

International Center
for Scientific Partnership

ИННОВАЦИОННОЕ РАЗВИТИЕ НАУКИ: ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ

Монография

г. Петрозаводск
МЦНП «Новая наука»
2021

УДК 001.12
ББК 70
И66

Рекомендовано к публикации редакционной коллегией МЦНП «Новая наука»

Рецензенты:

Доровских Г. Н.
доктор медицинских наук
ФГБОУ ВПО «Красноярский медицинский университет
им. проф. В.Ф. Войно-Ясенецкого»

Андрианова Л. П.
доктор технических наук
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»

Коллектив авторов:

Базарова Л.В., Викторов А.А., Галкин С.В., Гиляева Э.Н., Гладких В.Д.,
Головина Н.А., Горленко Н.П., Гусева Т.М., Дебелова Н.Н., Зубкова О.А.,
Игнатов В.Н., Канина И.В., Леонтьев Р.В., Лотов В.А., Мазаева Т.В.,
Михайлова В.К., Мустафаев Н.Г., Никифоров А.Н., Саркисов Ю.С., Стоева Т.Р.,
Ушаков Е.В., Хайруллина Д.Д., Шепеленко Т.С., Шопов Д.Г.

И66 ИННОВАЦИОННОЕ РАЗВИТИЕ НАУКИ: ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ
И ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ : монография / [Базарова Л. В. и др.]. –
Петрозаводск : МЦНП «Новая наука», 2021. – 291 с. : ил. – Коллектив авторов.

ISBN 978-5-00174-325-5

В монографии рассматриваются актуальные вопросы, стоящие перед современными исследователями, предлагаются оригинальные решения научно-методических и технических вопросов. Издание может быть полезно научным работникам, специалистам-практикам, преподавателям всех уровней образования, интересующимся проблемами развития современной науки и образования.

Авторы несут ответственность за содержание своих работ, точность цитат, легитимность использования иллюстраций, приведенных цифр, фактов, названий, персональных данных и иной информации, а также за соблюдение законодательства Российской Федерации и сам факт публикации.

Полные тексты статей в открытом доступе размещены в Научной электронной библиотеке Elibrary.ru в соответствии с Договором № 467-03/2018К от 19.03.2018 г.

УДК 001.12
ББК 70

ISBN 978-5-00174-325-5

ОГЛАВЛЕНИЕ

РАЗДЕЛ I. ЗДОРОВЬЕСБЕРЕЖЕНИЕ КАК КЛЮЧЕВОЙ ВЕКТОР ГОСУДАРСТВЕННОЙ ПОЛИТИКИ..... 5

Глава 1. МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ РИСКА
ЗДОРОВЬЮ НАСЕЛЕНИЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НЕГАТИВНЫХ
ФАКТОРОВ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА ОСНОВЕ КИНЕТИЧЕСКОЙ
ТЕОРИИ СТАРЕНИЯ ЖИВЫХ СИСТЕМ..... 5

Гладких Вадим Дмитриевич, Викторov Александр Александрович

Глава 2. ЭФФЕКТИВНОСТЬ МЕДИЦИНСКИХ ВМЕШАТЕЛЬСТВ:
МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ НАУЧНОГО ОБОСНОВАНИЯ..... 107

Ушаков Евгений Владимирович

Глава 3. ПАЦИЕНТ КАК ИНДИКАТОР КАЧЕСТВА
МЕДИЦИНСКИХ УСЛУГ 123

*Шопов Димитър Георгиев, Михайлова Ванина Кръстева,
Стоева Теодора Радева*

Глава 4. ВЛИЯНИЕ ТЕХНОГЕНЕЗА НА АНТАГОНИСТИЧЕСКУЮ
АКТИВНОСТЬ МИКРОБНОГО СООБЩЕСТВА ПОЧВЫ 139

*Гусева Татьяна Михайловна, Головина Наталья Александровна,
Канина Ирина Владимировна*

РАЗДЕЛ II. ДИССЕМИНАЦИЯ ИННОВАЦИОННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОПЫТА..... 155

Глава 5. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ
ПРИ МЕЖДУНАРОДНОМ АУДИТЕ ЗАПАСОВ УГЛЕВОДОРОДОВ 155

Галкин Сергей Владиславович

Глава 6. КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЦЕМЕНТАХ СИСТЕМАХ..... 173

*Горленко Николай Петрович, Саркисов Юрий Сергеевич,
Лотов Василий Агафонович, Зубкова Ольга Александровна,
Шепеленко Татьяна Станиславовна, Дебелова Наталья Николаевна*

Глава 7. ВОЛНОВОЙ РЕЗОНАНС РОТОРА
С ЖИДКОСТЬЮ И ПЕРЕГОРОДКАМИ 209

Никифоров Андрей Николаевич

Глава 8. КОМПЛЕКС СРЕДСТВ СВЯЗИ ИСПЫТАТЕЛЬНОЙ
МОДЕЛИРУЮЩЕЙ УСТАНОВКИ. ПРОБЛЕМЫ
И ВАРИАНТЫ РЕШЕНИЯ 236

*Мустафаев Нияз Гаджикурбанович, Леонтьев Роман Владимирович,
Игнатов Виталий Николаевич*

Глава 9. ПРОБЛЕМА ДВИЖУЩИХ СИЛ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ В СОВРЕМЕННОМ МИРЕ: ЛИНЕЙНЫЕ И НЕЛИНЕЙНЫЕ МОДЕЛИ.....	262
<i>Ушаков Евгений Владимирович</i>	
Глава 10. ВОЗМОЖНОСТИ ЦИФРОВОГО ОБРАЗОВАНИЯ ПРИ ОБУЧЕНИИ ИНОСТРАННЫМ ЯЗЫКАМ В ВЫСШЕЙ ШКОЛЕ	277
<i>Мазаева Татьяна Викторовна, Гилязева Эмма Николаевна, Базарова Лилия Вязировна, Хайруллина Динара Дилиатовна</i>	

**РАЗДЕЛ I.
ЗДОРОВЬЕСБЕРЕЖЕНИЕ КАК КЛЮЧЕВОЙ ВЕКТОР
ГОСУДАРСТВЕННОЙ ПОЛИТИКИ**

УДК 613.6.02.

Глава 1.

**МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ РИСКА ЗДОРОВЬЮ
НАСЕЛЕНИЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НЕГАТИВНЫХ ФАКТОРОВ
ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА ОСНОВЕ КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ
СТАРЕНИЯ ЖИВЫХ СИСТЕМ**

Гладких Вадим Дмитриевич

д.м.н., профессор

Викторов Александр Александрович

д.т.н., доцент

ФГУП НПЦ «Фармзащита» ФМБА России

Аннотация: В монографии рассмотрены основные положения и перспективы использования разрабатываемой авторами общей кинетической теории старения живых систем, отражающей представления о сущности жизни с позиций детерминационной теории медицины и позволяющей с большой степенью вероятности оценивать риски здоровью и жизни от воздействия негативных факторов окружающей среды. В качестве инструмента исследования предлагается общая математическая модель старения, описывающая кинетику процессов структуризации-деструктуризации биологических систем безотносительно к их иерархическому уровню на протяжении всей жизни и отражающая непрерывный процесс адаптивного реагирования организма на факторы окружающей среды. Представлена статистическая модель оценки риска перехода здоровья человека в донозологическое и патологическое состояние под воздействием неблагоприятных экологических факторов. Приведены практические примеры

оценок экологических рисков здоровью населения.

Ключевые слова: здоровье, загрязнение окружающей среды, математическая модель, оценка риска, старение

**METHODOLOGICAL APPROACHES TO ASSESSING THE RISK
TO PUBLIC HEALTH UNDER THE INFLUENCE OF NEGATIVE
ENVIRONMENTAL FACTORS BASED ON THE KINETIC THEORY
OF AGING OF LIVING SYSTEMS**

**Gladkikh Vadim Dmitrievich
Viktorov Alexander Alexandrovich**

Abstract: The monograph considers the main provisions and prospects for the use of the general kinetic theory of aging of living systems developed by the authors, reflecting the ideas about the essence of life from the standpoint of the determinative theory of medicine and allowing to assess the risks to health and life from the impact of negative environmental factors with a high degree of probability. As a research tool, a general mathematical model of aging is proposed that describes the kinetics of the processes of structuring-destructurization of biological systems regardless of their hierarchical level throughout life and reflects the continuous process of adaptive response of the body to environmental factors. A statistical model for assessing the risk of transition of human health to a prenosological and pathological state under the influence of adverse environmental factors is presented. Practical examples of assessments of environmental risks to public health are given.

Key words: health, environmental pollution, mathematical model, risk assessment, aging

ПРЕДИСЛОВИЕ

В последние десятилетия происходит бурное развитие междисциплинарных направлений науки и практики, связанных с проблемами экологии человека, исследующих различные аспекты влияния среды обитания (природной и техногенной) на популяции, группы людей и здоровье отдельного человека.

Развиваемая авторами теория старения биологических систем [1-9] позволяет с большой степенью вероятности оценить риски здоровью и жизни от воздействия негативных факторов окружающей среды. В качестве инструмента исследования предлагается общая математическая модель старения, описывающая кинетику процессов структуризации-деструктуризации биологических систем безотносительно к их иерархическому уровню на протяжении всей жизни (от момента рождения до перехода в патологическое состояние и/или гибели) и отражающая непрерывный процесс адаптивного реагирования организма на факторы окружающей среды.

Рассмотренный кинетический подход базируется на философских аспектах методологии биологических исследований, разработанных академиком И.Т. Фроловым [10-11], исходит из понимания и интерпретации основных жизненных процессов и явлений с позиций теорий диссипативных структур Ильи Пригожина [12] и гиперциклов Манфреда Эйгена [13], отражает современные научные представления о биологической сущности жизни с позиций детерминационной (гомеостатического, эволюционного, экологического и адаптивного детерминизма) теории медицины и концепции адаптивного реагирования [14-15].

1. КОНЦЕПТУАЛЬНО-МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РИСКА ЗДОРОВЬЮ НАСЕЛЕНИЯ

В 1984 г. американским физиологическим обществом был выработан классификационный подход по части медико-биологического математического

моделирования, в соответствии с которым до настоящего времени выделяют аналитические модели (или модели данных) и системные модели.

Аналитические модели (или, точнее, модели данных) – это модели, которые не требуют, не используют и не отображают каких-либо гипотез о физических процессах (системах), при рассмотрении которых они были использованы. К этому классу моделей относятся статистические и эмпирические модели, представляющие результаты исследований в виде определенного вида математических зависимостей, адекватно отображающие описываемые процессы в их внешнем проявлении со всей возможной полнотой.

Системные модели (или модели систем) – это модели, которые строятся в основном на базе физических законов и гипотез о том, как система структурирована и как она функционирует. В подобных моделях используется описание структуры системы, а происходящие в ней процессы описываются уравнениями, отражающими механизмы взаимодействия внутренних процессов системы.

Общепринятым интегральным показателем здоровья человека является продолжительность жизни, изучение механизмов которой связано с исследованием процессов старения организма, и которая находится из решения общего уравнения $\int_0^{t_m} (dD/dt) dt = 1$, где верхний предел интегрирования t_m и является продолжительностью жизни, так как при условии $D = 1$ все гибнут. При поиске t_m , используют функциональную зависимость $dD(t)/dt$, значение интеграла может быть принято близким к единице (0,95÷0,99).

В геронтологии при моделировании процессов принята следующая терминология.

Риск смерти или кумулятивная функция распределения смертности $D(t)$ – вероятность смерти в возрасте не старше t . Вероятность смерти изменяется в пределах от 0 до 1; при возрастании возраста t функция D стремится к 1, а при уменьшении t функция D принимает значения меньше 1 (при $t=0$ функция $D=0$).

Кумулятивная функция дожития – функция $S(t)$, связанная с функцией $D(t)$ соотношением $S(t) = 1 - D(t)$, представляющим собой вероятность того, что время жизни не меньше t , т.е. превышает t .

Функция плотности вероятности смерти (риска смерти) $dD/$ — предельное значение отношения вероятности гибели в возрастном интервале $[t, t + \Delta t]$ к ширине этого интервала Δt , когда его ширина стремится к нулю.

Функция интенсивности смертности (сила смертности, удельная смертность) – предельное значение отношения вероятности гибели в возрастном интервале $[t, t + \Delta t]$ к функции дожития $S(t)$ при условии, что ширина интервала Δt стремится к 0: $(dD/dt)/S(t) = dD/dt/(1 - D(t)) = \mu(t)$.

К настоящему времени разработано множество моделей старения и смертности [16-22]. Одним из основателей современного метода построения таблиц продолжительности жизни является бельгийский ученый А. Кетле [23].

При рассмотрении когорт биологических организмов, численность которых измеряется через равные промежутки времени n , в когортные таблицы смертности включают следующие величины:

- lt – число доживших до возраста t ;
- dt – число умерших в интервале $(t, t + n)$;
- $qt = \frac{dt}{lt}$ – вероятность смерти в возрастном интервале $(t, t + n)$;
- $Lt = n \cdot lt + n + \left(\frac{n}{2}\right) dt$ – суммарное время жизни в возрастном интервале $(t, t + n)$;
- $t = Lt + \dots + Lw$ – суммарное время жизни всех членов когорты в возрасте t и выше;
- w – значение возраста, соответствующего началу последнего интервала;
- $et = Tt/lt$ – ожидаемая продолжительность жизни для индивидуума, дожившего до возраста t ;

– $\mu(t) = -dl(t)/l(t)dt$ – интенсивность смертности.

Существующие теории старения сводятся к двум группам: стохастической (старение как сумма последствий неблагоприятных случайных событий в результате накопления функционально-морфологических повреждений) и программируемой (старение как заложенный природой эволюционный процесс) [24].

Наблюдаемый с определенного возраста (30-40 лет), стохастический процесс устойчивого возрастания смертности населения описывается экспоненциальной функцией (закон Гомпертца). Математическая модель интенсивности смертности (уравн. 1.1), предложенная Б. Гомпертцем (1820), представляет собой аппроксимацию функции интенсивности смертности экспоненциальной зависимостью в определенном возрастном интервале внутри общего интервала изменения времени $[0, t_{mb}]$, где t_{mb} соответствует значению $D = 1$:

$$(dD/dt)/(1 - D) = R \exp(\alpha t) \quad (\text{уравн. 1.1})$$

где R и α – положительные параметры, причем параметр $\alpha > 0$.

Область применимости закона Гомпертца довольно ограничена и находится в пределах 35–75 лет. Б. Гомпертц предположил, что аналитическое выражение его модели может включать и компоненту, обусловленную внешними причинами, не связанными с растущей с возрастом степенью износа организма. Это предположение математически сформулировано У. Мейкхемом (уравн. 1.2), и в дальнейшем получило название *закона (модели) Гомпертца–Мейкхема*:

$$(dD/dt)/(1 - D) = A + R \exp(\alpha t), \quad (\text{уравн. 1.2})$$

где A называется фоновой компонентой смертности.

Дополнение Мейкхема, помимо того, что уменьшает несоответствие между реальностью и аппроксимацией Гомпертца в области малых возрастов, вносит в идеологию причины смертности помимо биологически обусловленной компоненты износа организма – независимую от возраста фоновую компоненту

(фактор воздействия окружающей среды) [19,23]. Модель Гомпертца–Мейкхема основана на экспоненциальном росте смертности, что не соответствует изменению смертности в детском возрасте (для которого характерно уменьшение смертности с больших значений сразу после рождения в первый год жизни и в дальнейшем до 10–15 лет), а также для долгожителей (начиная с 80–85 лет интенсивность смертности начинает заметно уменьшаться).

Биологическое обоснование модели Гомпертца–Мейкхема впервые было предпринято Вильямсом и в дальнейшем развито Т. Киквурдом и соавт. [26]. Согласно их теории ресурсы организма распределяются между его подсистемами, обеспечивающими воспроизводство и репарацию (восстановление) повреждений. Недостаточное восстановление повреждений приводит к увеличению интенсивности смертности.

До настоящего времени вопрос о необходимости включения в модель интенсивности смертности фоновой компоненты является дискуссионным. Некоторые авторы полагают, что вклад влияния внешней среды в величину смертности хорошо отражает параметр R модели Гомпертца, в то время как параметр α описывает возрастную компоненту смертности, обусловленную возрастными изменениями организма.

Изменение продолжительности жизни является косвенным показателем влияния окружающей среды на здоровье человека.

Общий коэффициент смертности, в частности, используемый в России как показатель продолжительности жизни в системе социально-гигиенического мониторинга, определяется как отношение числа умерших за год к среднегодовой численности населения и рассчитывается на Q человек, чаще всего на 1000, по уравнению 1.3:

$$m = (M \cdot Q) / S, \quad (\text{уравн. 1.3})$$

где m – общий коэффициент смертности; M – число умерших людей за год; S – среднегодовая численность населения.

Подход к оценке качества управления здоровьем по критерию общей смертности правомерен при условии, когда все факторы, определяющие здоровье, действуют одинаково на все население. Однако таких случаев практически не существует, за исключением чрезвычайных ситуаций безотносительно к их генезу. Поэтому при решении подобных задач необходимо учитывать показатели смертности в зависимости от возрастного распределения населения.

В «нагрузочных» моделях интенсивности смертности воздействие неблагоприятных факторов окружающей среды представлено в виде нагрузочной функции. Понятие нагрузки на организм, отражающее воздействие внешней и внутренней среды на организм, приводящей постепенно к его смерти, введено А.Т. Губиным [25].

При этом состояние организма характеризуется накоплением повреждений (дефектов), которые уменьшают жизнеспособность организма. В подобных моделях интенсивность смертности $\mu(t, P)$ описывается произведением функции, характеризующей состояние организма – $\beta(t, P)$, и функцией интенсивности нагрузки – $h(t, P)$:

$$\mu(t, P) = h(t, P) \cdot \beta(t, P), \quad (\text{уравн. 1.4})$$

где P – параметр, характеризующий вредное воздействие окружающей среды.

Для интенсивности нагрузки $h(t, P)$ принимается следующее выражение:

$$h(t, P) = h(t) + \Delta h(t, P), \quad (\text{уравн. 1.5})$$

где $h(t) = h(t, 0)$; а $\Delta h(t, P)$ – дополнительный компонент нагрузки, обусловленный действием негативного фактора.

После определенных преобразований приближенное выражение интенсивности смертности записывается как произведение функции интенсивности смертности при отсутствии негативного воздействия факторов окружающей среды – $\mu(t)$, функции, учитывающей дополнительный компонент внешней нагрузки — $(1 + \Delta h(t, P)/h(t))$ и функции накопления повреждений за время t_0 от начала негативного влияния в виде экспоненты:

$$\mu(t, t_0, P) = \mu(t) \left(1 + \frac{\Delta h(t, P)}{h(t)}\right) \exp\left(\alpha \int_{t_0}^t \frac{h}{h_1} dt\right), \quad (\text{уравн. 1.6})$$

где при постоянной нагрузке α и h_1 являются константами.

Развитие *системных математических моделей старения* требует учета представлений об объекте моделирования с биологических и физиологических позиций, что представляет собой до настоящего времени неразрешенную задачу, так как отсутствует общая концептуальная модель старения.

В настоящее время насчитывается более ста концепций механизмов старения живых систем, лежащих в основе частных математических моделей механизмов старения [16,23-24]. При этом выделяют различные типы биологического проявления и старения живых систем.

а) *Старение как результат загрязнения биологических систем (БС), с нарастанием «зашлакованности» клеток, тканей, органов с последующим снижением адаптационных возможностей организма.* Подобный механизм старения обусловлен растущими ограничениями возможностей выведения из организма продуктов метаболизма. Механизмами противодействия этому процессу являются активирование естественных механизмов самоочищения организма и использование искусственных методов, стимулирующих этот процесс. Проявления старения по данному типу заключаются в повышении сухого (зольного) остатка и снижении количества воды в тканях; в образовании нерастворимых «неживых» включений (камни почек и желчных протоков), накоплении декомпенсаторных физических (субклинический радикулит и пр.) и психических (старческие деменции и пр.) отклонений, формирующих клинический симптомокомплекс стареющего организма, отражающий проявление общего закона возрастания энтропии.

в) *Старение как «недостаточность сил эволюционного отбора».* Главным механизмом старения в данном случае является накопление многообразия изначально однородных структур, распад на подсистемы и дезинтеграция организма как целого. Проявляется данный тип старения

увеличением разнообразия молекул, субклеточных структур, клеток и снижением координирующих функций между различными структурами. Конкретные симптомы и синдромы в принципе те же, что и при иных типах старения, хотя и формируются они в ином порядке.

с) *Старение как «исчерпание необновляемого».* Внутреннее самообновление не обеспечивает существование во времени несамокопирующихся на своем уровне организации морфологических (например, гибель нервных клеток, альвеол и пр.) и биохимических (например, развивающиеся в процессе старения: дофаминергическая недостаточность, влекущая нарушение когнитивных, двигательных функций; серотониновая недостаточность, ведущая к дисфункции миоцитов гладкой мускулатуры, нарушению микроциркуляции, возникновению тканевой гипоксии и нарушению преобразования энергии в тканях различных органов, с последующей моно- и полиорганной недостаточностью) структур организма. Вторичными последствиями данного процесса являются: снижение объема и нарушение функций органов и систем, а также отдельных клеток; общее снижение энергетики организма, органов, клеток и пр.

d) *Старение как дезрегуляция клеточного роста и самообновления,* обусловленное запуском апоптоза (запрограммированной гибели клетки), изменениями T-лимфоидной системы и пр.

e) *Старение как снижение адаптационных возможностей организма* вследствие нарушения гомеостатического регулирования. Гомеостатический подход к старению предполагает «смерть от старости» как процесс, обусловленный законом возрастания энтропии.

С позиции термодинамики БС рассматривается как система, эволюционирующая во времени, что затрудняет анализ биологической эволюции на основе молекулярных процессов, для которых время не имеет направленности и не может быть эволюционным фактором.

Состояние неживой системы характеризуется функцией энтропии, которая, согласно закону Больцмана, определяется следующим уравнением:

$$S = k \ln W, \quad (\text{уравн. 1.7})$$

где k – постоянная Больцмана, W – термодинамическая вероятность существования неживой системы. Термодинамическая вероятность W имеет тенденцию возрастать со временем до некоторой максимальной величины.

Состояние живой системы характеризуют функцией негэнтропии, которая по своему содержанию имеет противоположный функции энтропии смысл, указывая на степень упорядоченности живой системы. Функцию негэнтропии определяют уравнением 1.8, которое формально подобно уравнению Больцмана, но по своему физическому содержанию указывает на противоположную тенденцию развития живой системы по сравнению с развитием неживой системы:

$$S_{\text{уд.нег}} = -k \ln W_{\text{биол}} = k \ln \frac{1}{W_{\text{биол}}}, \quad (\text{уравн. 1.8})$$

где $S_{\text{уд.нег}}$ – удельная негэнтропия живой системы, $W_{\text{биол}}$ – термодинамическая вероятность живой системы.

Данное определение функции негэнтропии означает, что элементы, составляющие живую систему, не стремятся к достижению хаотического, наиболее вероятного распределения, а наоборот, стремятся к такому распределению, которое соответствует все более упорядоченному состоянию структуры живой системы.

Производство энтропии в окружающей живую систему среде равно в количественном отношении производству негэнтропии внутри живой системы. Организм создает внутри себя негэнтропию, потребляя энергию, а вне себя – энтропию, выделяя тепло. Состояние, когда поступающая в живую систему энергия полностью тратится на поддержание структуры живой системы и в том же количестве непрерывно выделяется в виде тепла, соответствует следующему равенству:

$$\left| \frac{dS_{уд}}{dt} \right| = \left| \frac{dS_{уд,нег}}{dt} \right| \quad (\text{уравн. 1.9})$$

Производство негэнтропии выражается, исходя из уравнения 1.8, следующим образом:

$$\left| \frac{dS_{уд,нег}}{dt} \right| = -k \frac{d \ln W_{биол}}{dt} \quad (\text{уравн. 1.10})$$

Скорость возникновения удельной энтропии как функции от времени может быть выражена в виде уравнения 1.11:

$$\frac{dS_{уд}}{dt} = \left(\frac{dS_{уд}}{dt} \right)_{max} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right), \quad (\text{уравн. 1.11})$$

где τ – индивидуальная продолжительность цикла клеточного деления для определенной клетки.

Результат, выраженный в уравн. 1.11. может быть сформулирован как *термодинамическая теорема биологической эволюции*: биологическая эволюция стремится к уменьшению энтропии первоначального состояния системы в добиологической эре, т.е. биологическая эволюция, протекающая во времени, стремится к состоянию минимальной термодинамической вероятности, когда время стремится к бесконечности. Эти рассуждения справедливы и для отдельного организма, и для популяции.

После сопоставления уравнений 1.10 и 1.11 на основе равенства 1.9 получаем уравнения следующего вида:

$$-k \frac{d \ln W_{биол}}{dt} = \left(\frac{dS_{уд}}{dt} \right)_{max} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right), \quad (\text{уравн. 1.12})$$

или

$$-\ln W_{биол} = K \int_{t_0}^t \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) dt \simeq K(t - t_0), \quad (\text{уравн. 1.13})$$

т.к. величина $K \text{textr}(-t/\tau)$ быстро становится значительно меньше, чем Kt , из-за того, что

$$\tau \ll t, \text{ где } K = \frac{1}{k} \left(\frac{dS_{уд}}{dt} \right)_{max}. \quad (\text{уравн. 1.14})$$

Из уравнения 1.13 следует:

$$W_{биол} \simeq W_0 e^{-K(t-t_0)}, \quad (\text{уравн. 1.15})$$

где W_0 – биологическая вероятность существования системы к начальному моменту времени биологической эволюции (или существования организма), когда $t = t_0$. Т.е. термодинамическая вероятность системы W_0 в момент времени t_0 может быть определена на основе закона Больцмана (уравн. 1.16):

$$W_0 = W = e^{\frac{S}{k}} \quad (\text{уравн. 1.16})$$

Подставляя уравнения 1.16 в 1.15 и учитывая уравн. 1.14, получим уравн. 1.17:

$$W_{\text{биол}}(t) \simeq e^{\frac{S}{k} - \frac{1}{k} \left(\frac{dS_{\text{уд}}}{dt} \right)_{\text{max}} (t - t_0)} \quad (\text{уравн. 1.17})$$

Сущность старения как общего для живой и неживой материи явления, как показано выше, объясняется вторым законом термодинамики: во всякой обособленной системе все процессы имеют такой характер, что общая энтропия системы со временем только увеличивается. Следовательно «старение» можно рассматривать как процесс ухудшения функционирования сложных систем во времени вследствие общего накопления энтропии (хаоса) на всех их структурных уровнях.

Старение определяется как внутренними причинами (второй закон термодинамики), так и внешними (внешние факторы недостаточно компенсируют внутренние изменения), что может быть преодолено только внешними влияниями.

Главной особенностью, отличающей жизнь от чисто химического процесса, является самовоспроизведение, аналогом чего в химии является *аутокатализ* – способность молекул стимулировать возникновение аналогичных молекул в ходе химических реакций. Требование увеличения энтропии должно выполняться и здесь, т.е. параллельно с аутокатализом и синтезом компонентов должен идти процесс ускоренного распада других компонентов среды.

При неменяющихся условиях среды самовоспроизведение любой единицы A выражается уравнением 1.18:

$$\frac{dA}{dt} = cA, \quad (\text{уравн. 1.18})$$

где c – постоянная.

Самовоспроизведение, зависящее только от самого себя и не ограниченное другими условиями, развивается по экспоненциальному закону. Следующая формула (уравн. 1.19) описывает динамику некоторой самовоспроизводящейся и самоограничивающейся единицы A :

$$\frac{dA}{dt} = \frac{cA}{(c_1A + c_2)}, \quad (\text{уравн. 1.19})$$

где c, c_1, c_2 – постоянные.

В реальном живом организме такие взаимосвязи весьма разнообразны и сами находятся в постоянной «подстройке», формируя организм и приспособлявая его жизнедеятельность к условиям окружающей среды в каждый данный момент. Имеет место динамическое равновесие всех факторов, любое отклонение автоматически выправляется. Для не слишком сильно меняющихся внешних условий имеет место в первом приближении колебательный процесс относительно общего стационарного состояния.

В такой системе жизнь возможна только как постоянное самовоспроизведение всех компонентов, а старение является результатом ограничения самообновления. Очевидным механизмом старения системы как ограниченной от окружающей среды единицы является накопление внутри нее некоторого вещества M , которое не участвует в самообновлении продукта реакции.

Встает вопрос о мутации самовоспроизводящихся единиц. В случае изменения, сохраняющего их в структуре системы, возможны два варианта:

- 1) мутантная единица не изменяет своей способности к самовоспроизведению или увеличивает ее;
- 2) мутантная единица снижает скорость самовоспроизведения, что со временем приводит к ее элиминации из системы.

Для моделирования таких процессов используют уравнение 1.19, вводя в него обозначения мутантных единиц mA и коэффициенты гибели и мутации нормальных и мутантных единиц k_1, k_2, k_3 , учитывая, что убыль за счет мутации нормальных клеток пополняет число мутировавших, а мутации мутировавших пополняют их самих и могут в первом приближении не учитываться:

$$\frac{dA}{dt} = \frac{cA}{(c_1A+c_2A)} - k_1A - k_2A, \quad (\text{уравн. 1.20})$$

$$\frac{dA}{dt} = \frac{c_3mA}{(c_4mA+c_5A)} - k_3mA + k_2A, \quad (\text{уравн. 1.21})$$

где c, c_1, c_2, c_4, c_5 – постоянные.

При описании процессов, протекающих в биосистеме, следует учитывать два аспекта. Первый связан с тем, что живая система является открытой; в ней протекают процессы получения, накопления, передачи и использования энергии, обеспечивающие специфические функции биосистемы. Второй аспект связан с управлением возможностью сохранения структуры, ее роста; для его описания вводят понятия пассивного (внутреннего) и активного (внешнего) управления.

Эти управляющие процессы в совокупности образуют единую систему замкнутых контуров управления, комплекс прямых и обратных связей в системе.

Под управлением в данном контексте понимаем такое воздействие одних элементов системы на другие, которое приводит систему к заданному состоянию, позволяя достичь определенных целей или нужных результатов.

Процессы управления – динамические процессы, протекающие в системах, в которых потоки информации, а также решения и действия для достижения цели управления структурно реализуются в виде замкнутых контуров, систем с обратной связью. Элементы, осуществляющие управление, относятся к управляющей части системы, а элементы, испытывающие на себе управленческое воздействие, к объектам управления.

Выделяют две большие группы целей управления в биосистемах:

- сохранение вида, к которому принадлежит организм (с этим связаны способность клеток к делению, способность организмов к размножению, половые рефлексы, забота о потомстве);
- сохранение жизнедеятельности отдельной особи в течение биологически обусловленного периода.

В зависимости от положения устройства управления по отношению к управляемому объекту в структурной цепи в теории управления различают каналы прямой и обратной связи. Главным отличием является то, что прямая связь не учитывает степень изменения состояния объекта после получения управляющего воздействия. В случае обратной связи часть выходного сигнала поступает на вход системы, ослабляя (отрицательная связь) или усиливая (положительная связь) его.

Признаком неравновесного стационарного состояния является выполнение для любого компартмента системы с переменной x_i , $i = 1, 2, \dots, n$ равенства

$$\frac{dx_i}{dt} = 0. \quad (\text{уравн. 1.22})$$

Это состояние может сохраняться только в том случае, если

$$\sum_{j=1}^m p_{ij} w_j = - \sum_{k=1}^l q_{ik} y_k, \quad (\text{уравн. 1.23})$$

где w_j и y_k – входные и выходные потоки компартмента (с номерами соответственно i и k); p_{ij} и q_{ik} показывают, какая часть потока от компартмента j или k поступает к компартменту i .

Соотношение в матричной форме

$$Pw = -Qy \quad (\text{уравн. 1.24})$$

называется условием удовлетворения потребностей. Так как гомеостаз поддерживается не только за счет пассивных, но и, главным образом, активных механизмов, на его поддержание тратится немало энергии. Следовательно «гомеостатируется» только часть переменных состояния организма. Качество

гомеостаза переменной состояния i при j -м воздействии оценивается, например, по величине частной производной:

$$\sigma_{ij} = \left| \frac{d\bar{x}_i}{d\bar{v}_j} \right|, \quad (\text{уравн. 1.25})$$

где $d\bar{x}_i$ и $d\bar{v}_j$ – стационарные значения уровней вещества в компартментах системы и во внешней среде соответственно.

В идеале значение σ_{ij} должно равняться нулю, но фактически степень выраженности гомеостаза считается приемлемым, если выполняется неравенство

$$\sigma_{ij} \ll \sigma_{ij}^0, \quad (\text{уравн. 1.26})$$

где σ_{ij}^0 – некоторое характерное значение этой величины вне области гомеостаза.

Для математического моделирования организма человека предложено двухуровневое описание гомеостатического комплекса организма. Верхний уровень представляет модель его «естественной технологии», воспроизводящей в обобщенном виде основные жизненные процессы. Нижний уровень составляют произвольные по сложности описания всех систем физиологического комплекса, обеспечивающих процессы верхнего уровня. Для математического моделирования жизненного цикла организма человека приемлемой является «минимальная» версия модели «естественной технологии организма», где каждой организменной функции отвечает минимально необходимое число компартментов. В модель включены четыре компартмента, соответствующие основным подсистемам организма человека: дыхательная система, сердечно-сосудистая система, система крови и выделительная система (печень и почки).

Процессы жизнедеятельности (синтез биополимеров, проведение нервного импульса и др.) представлены «ведущей переменной» – скоростью расходования энергии в организме, измеряемой в кислородном эквиваленте. В балансе энергии участвуют энергетические потоки: расход и поступление

кислорода, обеспечиваемые системой дыхания, и внутренний транспорт, обеспечиваемый сердечно-сосудистой системой и системой крови.

Баланс вещества строится для продуктов обмена – «организменных шлаков», которые возникают в ходе жизненных процессов, а их элиминация и выведение осуществляются печенью и почками. Предполагается диффузный механизм потоков вещества, для которых также записывается транспортная система уравнений. Предполагается, что в области гомеостаза физиологические системы функционируют нормально, смерть наступает при условии, когда происходит исключение из физиологического процесса хотя бы одной из жизненно важных функций, – математический 0 в безразмерной области изменения во времени функциональности любой из систем жизнеобеспечения, задаваемой в диапазоне от 0 до 1.

«Естественное» старение биологической структуры моделируется ослаблением эффективности физиологических регуляторов со временем в виде спадающей экспоненты (уравнение Клайберга), описывающей темп старения. Внешние факторы влияния накладываются на естественный процесс старения и сокращают естественную «номинальную» продолжительность жизни. Эти факторы в общем случае могут зависеть от времени.

Таким образом, модель учитывает наряду с процессами естественной технологии влияние «внутренних» факторов, описываемых экспоненциальной функцией старения, и «внешних», определяемых экологическими, в том числе и социальными, факторами, задаваемыми относительными величинами, характеризующими темп развития патологического состояния любой физиологической системы. Совместное решение системы дифференциальных уравнений позволяет оценивать продолжительность жизни и наносимый ущерб в потерянных годах жизни.

Кинетическая теория старения живых систем, развиваемая авторами данной работы [2-9], математически в общем виде описывает процесс старения как непрерывное адаптивное взаимодействие биологических систем различного

иерархического уровня организации с окружающей средой на основе структурирования и деструкции системы от момента ее рождения до гибели.

Кинетический подход моделирования старения живых систем был апробирован авторами настоящей работы для оценки ущерба населению г. Тулы (в потерянных годах жизни) от влияния факторов окружающей среды (По результатам расчета ожидаемая продолжительность жизни для мужчин и женщин по городу равна 72 и 78,9 лет соответственно, что составляет от 8 до 11,1 потерянных лет жизни, обусловленных негативным влиянием загрязнения окружающей среды).

Результаты этого исследования, наряду с данными моделирования (с привлечением материалов радиобиологических экспериментов, выполненных А.В. Шафиркиным [27], позволили развить математическую модель формирования поражения организма при стационарном воздействии негативных факторов окружающей среды.

Развитие поражения во времени на уровне организма при хроническом облучении (величина эффективной остаточной дозы $D_{эф}$ согласно этой модели) определяется на основе следующего уравнения:

$$\begin{cases} \frac{dD_{эф}}{dt} = K(\gamma)\gamma(t), \text{ при } t \leq \tau \\ \frac{dD_{эф}}{dt} = K(\gamma)\gamma(t) - \beta_0 e^{-[\lambda_0 + \lambda_p(\gamma, t)]t} D_{эф}(t - \tau), \text{ при } t > \tau \end{cases} \quad (\text{уравн. 1.27}),$$

где γ – мощность дозы, сЗв/сут; $K(\gamma)$ – зависимый от мощности дозы коэффициент эффективности протяженного воздействия, обусловленный реализацией быстрых процессов восстановления на клеточном уровне; τ – время задержки процессов восстановления на уровне организма; β , λ_0 , λ_p – экспериментально полученные параметры, определяющие скорость процессов восстановления на уровне организма. Параметр λ_0 определяет снижение скорости процессов восстановления в организме за счет процессов старения, а функционал $\lambda_p(\gamma, t)$ характеризует радиационно обусловленное снижение скорости восстановления на уровне организма, которое отмечено в

большом числе радиобиологических исследований с увеличением мощности дозы и длительности радиационного воздействия.

На основе обобщенной дозы H_0 А.В. Шафиркиным и соавт. [28], разработана методика оценки радиационной опасности для космонавтов при осуществлении космических полетов. Этот дозиметрический функционал позволяет осуществить переход от сложного характера облучения в условиях космического пространства от различных источников космических излучений к условиям стандартного радиационного воздействия, для которого известны основные радиобиологические проявления в ближайшем и отдаленном периоде.

Было сделано предположение, что изменение суммарного объема компенсаторных резервов организма $Q(t)$, определяющего его адаптационные возможности и жизнеспособность в условиях длительного воздействия радиации, может быть записано следующим образом:

$$\frac{dQ(t)}{dt} = -cJ_m[\Sigma F_i + F_p(\gamma)]Q(t), \quad (\text{уравн. 1.28})$$

где ΣF_i – сумма всех функционалов от интенсивности возмущающих факторов внешней среды нерадиационной природы, определяющих степень включения и истощения компенсаторного резерва в процессе жизнедеятельности организма с возрастом; $F_p(\gamma)$ – включение компенсаторных процессов применительно к повреждениям, вызванным радиационным фактором. Величина J_m обусловлена различной скоростью метаболизма у млекопитающих.

Предполагая в первом приближении постоянным значение суммы функционалов от нерадиационных воздействий, уравнение 1.28 можно представить в виде:

$$\frac{dQ(t)}{dt} = -cJ_m[A + F_p(\gamma)]Q(t). \quad (\text{уравн. 1.29})$$

Решение уравнения для зависимости компенсаторного резерва от времени (1.29) будет иметь вид:

$$Q(t) = Q_0 \exp\{-[\lambda_0 + \lambda_p(\gamma, t)]t\}, \quad (\text{уравн. 1.30})$$

где Q_0 – детерминированный генотипически, достигший к периоду половой зрелости максимального развития, объем компенсаторных резервов организма; λ_0 – параметр, определяющий снижение компенсаторных возможностей в процессе старения; $\lambda_p(\gamma, t) = (cJm/t) \int F_p(\gamma) d\tau$ – член, определяющий снижение компенсаторных возможностей за счет облучения; $F_p(\gamma)$ – функционал, зависящий от мощности дозы и характеризующий интенсивность радиационной нагрузки.

В этом случае с учетом допущения, что функционал $F_p(\gamma)$ представляет собой степенную функцию от мощности дозы и что облучение осуществляется с постоянной мощностью дозы, уравнение (1. 30) можно переписать в виде:

$$Q = Q_0 \exp[-\lambda_0 - B(\gamma)^\delta] t. \quad (\text{уравн. 1.31})$$

Таким образом, степень снижения компенсаторного резерва организма определяется как величиной поглощенной дозы D , так и мощностью дозы γ . В определенном диапазоне мощностей доз, при которых показатель степени δ близок к 1, выполняется соотношение:

$$Q = Q_0 \exp[-\lambda_0 t - BD(\gamma)^{\delta-1}]. \quad (\text{уравн. 1.32})$$

Если предположить, что вероятность гибели для половозрелых животных обратно пропорциональна величине компенсаторного резерва организма, то для коэффициента смертности облученных животных в зависимости от времени получим в общем виде следующее выражение:

$$\mu^{\text{раз}}(t) = \mu(0) \exp[\lambda_0 + B(\gamma)^\delta] t = \mu(t) \exp[BD(\gamma)^{\delta-1}], \quad (\text{уравн. 1.33})$$

и при $\delta \approx 1$ и при использовании значений обобщенных доз

$$\mu^{\text{раз}}(t) = \mu(t) \exp[BH_0], \quad (\text{уравн. 1.34})$$

где $\mu(t)$ – зависимость коэффициентов смертности для контрольных необлученных животных.

Следует отметить, что адаптируемая в Российской Федерации методология оценки риска [29], имеет ряд недостатков, основными из которых, на наш взгляд, являются:

а) прогнозирование потенциальных рисков здоровью населения, как правило, выполняется на дальнесрочную перспективу (для канцерогенов – на 70 лет, на 30 лет хронического воздействия для взрослого населения, на весь период жизни детей в возрасте до 6 лет) и не предусматривает оценку рисков в режиме реального времени. Следовательно, подобные прогностические оценки в подавляющем большинстве случаев не могут быть проверены в популяционном или групповом эксперименте;

б) количественная оценка сопровождается большими (достигающими нескольких порядков) погрешностями от номинальных величин рисков, обусловленными недостаточной представительностью, полнотой и надежностью исходных данных социально-гигиенического и экологического мониторингов;

с) используемый подход не позволяет прогнозировать риски развития донозологических состояний.

Отмеченные недостатки базового варианта (на основе модели US EPA) методологии оценки рисков здоровью фактически переводят результаты прогностических оценок при воздействии химически опасных веществ в область преимущественно качественных относительных показателей риска и ранжирования факторов опасности. Это обстоятельство требует дальнейшего совершенствования методологии оценки риска и развития иных подходов, позволяющих отвечать не только на вопрос: «Что будет, если...», но и на вопрос: «Какова причина того, что мы наблюдаем сейчас?»

В этом аспекте определенный интерес представляет методический подход к оценке риска дополнительной смертности и отдаленных последствий здоровью населения при длительном воздействии негативных факторов окружающей среды [30-31], основанный на предположении, что изменение компенсаторно-восстановительного потенциала организма $Q(t)$, определяющего его адаптационные возможности и жизнеспособность в

условиях длительного воздействия негативных факторов окружающей среды, может быть записано, по аналогии с уравнением 1.32, в виде:

$$Q(t) = Q_0 \exp\{-(\lambda_0 + B_p \Gamma + B_3 I_3 + B_x I_x + B_c I_c)t\}, \quad (\text{уравн. 1.35})$$

где λ_0 – определяет скорость снижения резервов при нормальных экологических условиях, когда негативные факторы влияния пренебрежимо меньше, чем в исследуемом районе. Второй член в фигурных скобках является функционалом от мощности дозы радиационного воздействия (Γ), следующие три функционала – соответственно от интенсивности воздействия ЭМИ (I_3), химической нагрузки (I_x), интенсивности длительного социального стресса (I_c), которые определяют степень включения и истощения компенсаторного резерва $Q(t)$ при компенсации возникающих изменений и поддержании гомеостаза.

Предполагается, что вероятность гибели организма обратно пропорциональна величине компенсаторных резервов организма. Тогда, соответственно, интенсивность смертности $\mu(t)$ от возраста на экспоненциальном участке кривой (закон Гомпертца) определяется выражением:

$$\mu(t) = \mu(0) \exp\{(\lambda_0 + B_p \Gamma + B_3 I_3 + B_x I_x + B_c I_c)t\}, \quad (\text{уравн. 1.36}),$$

в котором учтена интенсивность воздействия негативных факторов окружающей среды, повышающая интенсивность смертности.

Если факторы негативного воздействия начинают действовать с момента времени t_0 , то для расчета в уравн. 1.36 нужно заменить t на $(t - t_0)$, а $\mu(0)$ на $\mu(t_0)$.

Основными источниками химического загрязнения населенных пунктов являются атмосферные выбросы токсикантов в виде аэрозолей, загрязняющие в результате распространения и выпадения на земную поверхность почву и водоемы.

Интегральный показатель интенсивности химической нагрузки за счет загрязнения атмосферы предложено рассчитывать в виде:

$$I_x = \sum_{i=1}^n (1/f)(C_i/\text{ПДК}_i) = \sum_{i=1}^n (1/f)K_i, \quad (\text{уравн. 1.37})$$

где C_i – концентрация отдельных химических веществ в воздухе, K_i – кратность превышения ПДК, f – функция от класса опасности (в ряде случаев значения функции соответствуют номеру класса опасности).

Альтернативный подход предполагает представить интенсивность химической нагрузки на население I_{xj} от загрязнения одной из j -х сред (воздух, вода, почва) в виде:

$$I_{xj} = \sum_{i=1}^n A_{ij} [1 + \lg(C_{ij}/\text{ПДК}_{ij})] = \sum_{i=1}^n A_{ij} [1 + \lg(K_{ij})], \quad (\text{уравн. 1.38})$$

где C_{ij} – концентрация i -го соединения для j -й среды, K_{ij} – кратность превышения ПДК для i -го соединения, A_{ij} – коэффициент, равный обратной величине показателя класса опасности химического соединения. При этом предполагается, что имеется некоторая пороговая величина загрязнения, равная 0,1 ПДК.

Общая интенсивность химической нагрузки от всех j -х загрязнителей j -х сред (воздух, вода, почва) может быть определена выражением:

$$I_x = \sum_{j=1}^m a_j \sum_{i=1}^n A_{ij} [1 + \lg(K_{ij})], \quad (\text{уравн. 1.39})$$

где a_j – коэффициент, определяющий индивидуальный вклад каждой среды в общую интенсивность химической нагрузки.

Ввиду неполноты и ненадежности результатов экологического, социально-гигиенического мониторингов в настоящее время такая детализация расчетов пока невозможна. Поэтому предложен более надежный расчет обобщенного показателя интенсивности химической нагрузки:

$$I_x = \ln(W/W_{\text{п}}) \text{ при } W > W_{\text{п}}, \quad (\text{уравн. 1.40})$$

где W – общие объемы выбросов вредных веществ за год в изучаемом районе, $W_{\text{п}}$ – пороговое значение выбросов за год, при увеличении которого отмечается достоверное ухудшение показателей здоровья населения.

Интенсивность смертности на экспоненциальном участке кривой (закон Гомпертца) линейно возрастает с увеличением обобщенного показателя интенсивности химической нагрузки:

$$\Delta \ln[\mu(t)]/\Delta t = B_x \ln(W/W_n), \quad (\text{уравн.1.41})$$

где $B_x = 0,009 \text{ год}^{-1}$.

В результате изменение коэффициентов смертности при преимущественном химическом загрязнении окружающей среды записывается следующим образом:

$$\mu_x(t) = \mu(t) \exp[0,009\tau \cdot \ln(W/W_n)], \quad (\text{уравн.1.42})$$

где $\mu(t) = \mu(0)\exp(\lambda_0 t)$ – возрастная зависимость коэффициентов смертности при отсутствии химической нагрузки, τ – время действия химической нагрузки, λ_0 – константа.

Следует отметить, что последний подход позволяет прогнозировать риски здоровью по показателю интенсивности смертности на экспоненциальном участке кривой, не распространяясь на участки детской, подростковой смертности и смертности долгожителей.

1.2. Методологический подход оценки риска здоровью населения на основе кинетической теории старения живых систем

1.2.1. Базовая математическая модель влияния окружающей среды на старение живых систем

Как уже отмечалось (гл.1.), кинетическая теория старения живых систем, развиваемая авторами настоящей работы, математически в общем виде описывает процесс старения как непрерывное адаптивное взаимодействие биологических систем различного иерархического уровня организации с окружающей средой на основе структурирования и деструкции системы от момента ее рождения до гибели.

С точки зрения теории адаптивного реагирования, с момента рождения жизнь человека является постоянной адаптацией к окружающей среде. Представим адаптацию биологической системы любого уровня (организма, его

отдельных систем, органов, тканей, клетки) в общем виде как составляющий конкуренцию процесс разрушения (повреждения и деструкции) и восстановления (или рекомбинации) от момента рождения до перехода в новое состояние (патология, смерть).

Процессы внутриутробного развития здесь не рассматриваются. Тогда момент рождения $t = 0$ биосистемы (БС) есть начало процессов воздействия окружающей среды (ОС) и адаптации к ней. Интервал времени t_{mb} от рождения БС до ее гибели назовем долговечностью; изменения во времени скорости повреждения (старение) и степени поврежденности системы – кинетикой и динамикой старения. Любая БС неизбежно гибнет, но долговечность, динамика и кинетика старения будут различны в зависимости от индивидуальных особенностей БС, вида и условий воздействия ОС и адаптационных резервов.

На основе математической модели механотермодеструкции твердого тела, находящегося в механически напряженном состоянии (С.Н. Журков и соавт., 1953), уравнений химической кинетики и принципа Ле-Шателье устойчивости любой системы для реализации химического равновесия прямой и обратной реакций можно получить следующее феноменологическое кинетическое уравнение:

$$dn/dt = K_{0r} \cdot \varphi_r(n) \cdot \exp(-E_g) - K_{0d} \cdot \varphi_d(n) \cdot \exp(-E_g + (\mu \cdot n_0)/n),$$

(уравн. 1.43)

которое будем использовать для описания изменения во времени $t = 0 \div t_{mb}$ концентрации функциональных связей БС $n(t)$, где $\varphi_d(n)$ и $\varphi_r(n)$ – кинетические законы их деструкции и восстановления; K_{0r} и K_{0d} – постоянные множители; $E_g = \frac{E_a}{kT}$ – безразмерный параметр, задающий уровень генетической устойчивости БС. Здесь E_a – энергия активации связи, k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура БС; $n_0 = n(0)$; μ – безразмерный параметр, характеризующий вид и интенсивность воздействия окружающей

среды (ОС) и изменяющий порог разрушения структурных связей $E_r = E_g \mu \cdot n_0/n$ тем сильнее, чем старше БС; $K_{d,r} = K_{0d,0r} \cdot \exp(-E_g)$ – величины, которые можно рассматривать как константы скоростей генетического старения и рекомбинации разрушенных связей.

Уравнение 1.43 предполагает, что воздействие ОС равномерно распределено между всеми функциональными связями БС. Кинетические законы деструкции и восстановления связей выберем для определенности в виде:

$$\varphi_d(n) = (n/n_0)^{m_d}, \varphi_r(n) = (1 - n/n_0)^{m_r}, \quad (\text{уравн. 1.44})$$

где $m_d > 0$, $m_r > 0$ (с уменьшением концентрации связей n интенсивность их деструкции падает, а восстановления растет).

В безразмерных переменных

$$0 \leq D = 1 - \left(\frac{n}{n_0}\right) \leq 1, \tau = (K_d / n_0) \cdot t \quad (\text{уравн. 1.45})$$

уравнение 1.43 принимает вид:

$$dD/d\tau = (1 - D)^{m_d} \exp(\mu/(1 - D)) - \varkappa D^{m_r}, \quad (\text{уравн. 1.46})$$

где $\varkappa = K_r/K_d = K_{0r}/K_{0d}$ – относительная константа скорости процесса старения.

Уравнение 1.46 можно интерпретировать как «брутто-кинетику» старения БС, обусловленную накоплением повреждений с учетом генетической устойчивости организма (параметр E_g), интенсивностью и видом негативного воздействия (параметр μ) и адаптационными способностями БС (параметр $\varkappa$), которые тем выше, чем больше степень повреждения D .

Уравнение 1.46 позволяет при постоянных $E_g(t)$, $\mu(t)$, $\varkappa(t)$ и $m_{d,r}$ относительно легко установить основные закономерности процессов старения.

Время $t = t_{mb}$ ($\tau = \tau_{mb}$), при котором $D = 1$, можно рассматривать как продолжительность жизни (долговечность БС), а текущее значение D – как степень риска возникновения заболеваний. Безразмерное время τ есть

биологическое время, определяемое скоростью деструкции функциональных связей. На него влияет, в частности, значение E_g : чем оно больше, тем, естественно, медленнее течет для БС астрономическое время t .

Поэтапно обобщая, проведем анализ динамики старения.

1. Отсутствие негативных воздействий ($\mu = 0$) и адаптации организма ($\alpha = 0$).

Уравнение 1.46 принимает вид $\frac{dD}{d\tau} = (1 - D)^{m_d}$, откуда следуют соотношения:

$$\tau(D) = \int_{1-D}^1 \frac{dx}{x^{m_d}} dx = \frac{1 - (1-D)^{1-m_d}}{1-m_d},$$
$$D(\tau) = \left[\frac{(m_d-1)\tau}{1+(m_d-1)\tau} \right]^{\frac{1}{m_d-1}}, \quad (\text{уравн. 1.47})$$

Из уравнения 1.47 следует, что долговечность БС $\tau_{mb} = 1/(1 - m_d)$ при $m_d < 1$ и $\tau_{mb} = \infty$ при $m_d \geq 1$. Таким образом, скорость деструкции $dD/d\tau$ монотонно падает с ростом повреждений от 1 при $D = 0$ до 0 при $D = 1$, причем тем медленнее, чем больше m_d .

При $m_d < 1$ долговечность τ_{mb} конечна и увеличивается с ростом m_d ; τ_{mb} бесконечна при $m_d \geq 1$. При учете того, что БС нежизнеспособна уже, например, при $D = 0,95$, τ_{mb} также увеличивается с ростом m_d . С уменьшением скорости деструкции долговечность БС возрастает.

2. Наличие негативных воздействий ($\mu \neq 0$) при отсутствии адаптации ($\alpha = 0$).

Уравнение 1.46 принимает вид $dD/d\tau = (1 - D)^{m_d} \exp\left(\frac{\mu}{1-D}\right)$, откуда следует:

$$\tau = \frac{1}{\mu(m_d-1)} \int_{\mu}^{\mu/(1-D)} x^{m_d-2} \cdot \exp(-x) dx. \quad (\text{уравн. 1.48})$$

Для целочисленных значений $m_d \geq 2$ интеграл в 1.48 выражается через элементарные функции (И. С. Градштейн и соавт., 1963), что в этом случае позволяет получить уравнение:

$$\tau(D) = \mu^{1-m_d} \cdot \{f(\mu) - f[\mu/(1-D)]\}, \quad (\text{уравн. 1.49})$$

где $f(z) = \exp(-z) \cdot \sum_{i=0}^{m_d-2} z^{m_d-2-i} \cdot \prod_{j=0}^{i-1} (m_d - 2 - j)$.

Из уравн. 1.39 определяется выражение для долговечности системы:

$$\tau_{mb} = \lim_{D \rightarrow 1} \tau(D) = \mu^{1-m_d} \cdot f(\mu). \quad (\text{уравн. 1.50})$$

При $m_d = 2$ выражение (1.49) имеет простое решение относительно D (рис. 1.1).

$$D(\tau) = \{1 + \mu / [\ln(\exp(-\mu) - \mu \cdot \tau)]\}, \quad (\text{уравн. 1.51})$$

где $\tau \leq \tau_{mb} = (1/\mu) \cdot \exp(-\mu)$.

Рис. 1.1. Зависимость поврежденности D биосистемы от времени τ для различных значений негативной нагрузки при отсутствии самореабилитации поврежденных связей и $m_d = 2$.

Значения μ : кривая 1 – 1; кривая 2 – 0,5; кривая 3 – 0,1; кривая 4 – 0

При $\mu \gg 1$ подынтегральная функция в 1.48 имеет резкий максимум для любых m_d . Тогда, используя метод интегрирования быстро меняющихся функций, получим:

$$\tau_{mb} = \begin{cases} (1/|\mu + 2 - m_d|) \cdot \exp(-\mu), m_d < 2 \\ (\tau_{mb})_{max} \cong \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \mu^{\frac{3}{2}} \cdot \exp(-\mu), \text{ при } m_d = 2 + \mu \\ \sqrt{2\pi}\mu^{1-m_d} \cdot (m_d - 2)^{m_d - \frac{3}{2}} \cdot \exp(2 - m_d), m_d > 2 + \mu \end{cases} \quad (\text{уравн. 1.52})$$

При $m_d = 2$ решение уравнения 1.52 совпадает с решением уравнения 1.51. Как следует из уравнения 1.52, долговечность БС при $0 \leq m_d < 2 + \mu$ растет с ростом m_d , а при $m_d > 2 + \mu$ она падает.

Итак, при негативном воздействии на БС ($\mu > 0$) и отсутствии адаптации ($\alpha = 0$) долговечность системы конечна, и тем меньше, чем больше воздействие.

3. Наличие негативных воздействий ($\mu \neq 0$) и адаптации ($\alpha \neq 0$).

Из уравнения 1.46 следует (если при каком-то $\tau = \tau_s$ значение $D(\tau) = D_s$, где D_s – корень уравнения):

$$(1 - D)^{m_d} \exp[/(1 - D)] = \alpha \cdot D^{m_r}, \quad (\text{уравн. 1.53})$$

то затем устанавливается стационарный режим (мода): $D(\tau) = D_s = \text{const}$ при $\tau = \tau_s$.

Из-за компенсации деструкции рекомбинацией (динамическое равновесие) разрушение БС прекращается. Она адаптируется к нагрузке при некотором уровне поврежденности D_s , значение которого зависит от параметров БС и величины нагрузки.

Однако анализ показывает (см. ниже), что существует область параметров, в которой даже при малых изменениях μ возможен резкий переход от стационарной моды к нестационарной, то есть возможен «срыв» адаптации – критическое явление, когда старение резко ускоряется и БС переходит в новое состояние или разрушается ($D \rightarrow 1$).

Подобные различные моды, зависящие от значений внутренних и внешних параметров, наблюдаются и в других системах, например в лавинных фотодиодах. Отметим лишь, что «математическое бессмертие» означает существование длительного стационарного состояния, которое бесконечно для БС продолжаться не может.

Критическое значение $\mu = \mu_{cr}(\alpha)$ при заданных значениях m_d и m_r можно найти с помощью метода Н. Н. Семенова [32]. Поведение кривых $D(\tau)$ при переходе μ через μ_{cr} резко изменяется. Если при $\mu \leq \mu_{cr}$ со временем устанавливается постоянная концентрация связей, то при $\mu > \mu_{cr}$ происходит взрывоподобный разрыв всех связей.

Условие устойчивого динамического равновесия системы $D_{cr}(\mu_{cr})$ определяется равенством скоростей разрушения и восстановления связей, а также равенством их первых производных по D и имеет вид:

$$m_r \cdot (1 - D_{cr}) = D_{cr} \cdot [\mu_{cr}/(1 - D_{cr}) - m_d]. \quad (\text{уравн. 1.54})$$

Условие нарушения динамического равновесия иллюстрирует рис. 1.2: если кривая 4-й скорости разрушения связей пересекается с кривой скорости их восстановления, то точка G соответствует состоянию устойчивого равновесия; если же скорость разрушения (кривые 1, 2) всегда больше скорости рекомбинации (сплошная кривая), то система разрушается.

Критическое значение D_{cr} соответствует такому наибольшему значению $D(\mu)$, при любом превышении которого равновесие уже невозможно (точка G_{cr} на рис. 1.2), – это состояние неустойчивого равновесия.

Рис. 1.2. Зависимость скоростей $dD/d\tau$ деструкции Vd (---) и восстановления Vr (-.-) связей БС от поврежденности D для различных значений μ

В точке G ($Vd=Vr$) наступает устойчивое ($D = \text{const}$) динамическое равновесие. В точке G_{cr} динамическое равновесие становится критическим: при $D > D_{cr}$ происходит разрушение системы со срывом адаптации. Принято: $\varkappa = 5$, $m_d = m_r = 2$. Значения μ : кривая 1 – 2; кривая 2 – 1,2; кривая 3 – 1; кривая 4 – 0,25.

С учетом неравенства (уравнение 1.45), из уравнения 1.54 следует, что

$$D_{cr} = \left[\frac{1 + 2\mu_{cr}/(M + \mu_d - m_{cr})}{M = \sqrt{(\mu_d - m_{cr})^2 + 4\mu_{cr}m_{cr}}} \right]^{-1}, \quad (\text{уравн. 1.55})$$

а из уравнения 1.54 получим уравнение 1.56:

$$\begin{aligned} \varkappa &= D_{cr}^{-m_r} \cdot (1 - D_{cr})^{m_d} \cdot \exp\left(\frac{\mu_{cr}}{1 - D_{cr}}\right), \\ \mu_{cr} &= (1 - D_{cr}) \ln\left(\frac{(\varkappa D_{cr})^{m_2}}{(1 - D_{cr})^{m_1}}\right). \end{aligned} \quad (\text{уравн. 1.56})$$

При известных значениях m_d , m_r и $\varkappa$ уравнения 1.55 и 1.56 позволяют рассчитать μ_{cr} и D_{cr} , соответствующие критическому состоянию системы G_{cr} . Область «безопасных» нагрузок ОС определяется неравенством $\mu \leq \mu_{cr}$.

Адаптация не будет эффективной при условии $(1 - D)^{m_d} \exp(\mu/(1 - D)) \gg \kappa D^{m_r}$. Это условие выполняется с высокой точностью при $\mu \geq 2 + \mu_{cr}$. Подобный случай можно интерпретировать как острое или подострое воздействие, кинетика гомеостаза почти полностью определяется

деструкцией и рассмотрена ранее. В области параметров, близких к критическим, рекомбинационным членом пренебрегать нельзя.

Определение области критических значений воздействия является важной практической задачей оценки адапционных возможностей БС. При $\mu > \mu_{cr}$ происходит срыв адаптации – резкое ускорение деструкции, происходящее тем раньше, чем больше степень негативного воздействия μ . С увеличением $\mu > \mu_{cr}$ срыв адаптации происходит при меньших степенях повреждений D . Момент срыва адаптации определяется условием ($d^2D/d\tau^2 = 0$).

Когда адаптация существенна, то долговечность БС (уравн. 1.57)

$$\tau_{mb} = \int_{1-D}^1 [x^{m_d} \exp(-\mu/x) - \alpha(1-x)^{m_r}]^{-1} dx, \quad (\text{уравн. 1.57})$$

как и кинетика ее поврежденности D , требует проведения численного анализа. Пример расчетов приведен на рис. 1.3 (кривые со срывом адаптации соответствуют типовой кривой гомеостаза биосистем, принятой в геронтологии).

Рис. 1.3. Зависимости $Y(\tau)$ поврежденности (D) и функции дожития ($1-D$) БС от времени τ при $\alpha = 10$ и $m_{d,r} = 2$ ($\mu_{cr} = 1,248$, $D_{cr} = 0,616$) для различных значений μ : кривая 1 – 1,5; кривые 2 и 5 – 1,3; кривая 3 – 1,2; кривая 4 – 1,1.

Изложенную методологию можно использовать для оценки средней продолжительности жизни τ_{mb} популяции. Зависимости $D(\tau)$ и $1-D(\tau)$ можно рассматривать как кумулятивную функцию распределения смертности и функцию дожития, $dD/d\tau$ и $(dD/d\tau)/[1-D(\tau)]$ как плотность распределения смертности и интенсивность смертности.

Для молодого, среднего и старшего возраста расчетные кривые интенсивности смертности удовлетворяют закону Гомпертца-Мейкема. Для детского возраста эти кривые проходят существенно выше, чем для молодого и среднего возраста.

Феноменологическая математическая модель влияния окружающей среды на старение биосистем концептуально основана на медицинской доктрине адаптационного реагирования, выводах биологической термодинамики, кинетике химических каталитических реакций, кинетической теории прочности твердых тел (неживых систем) [12-15, 33-34].

Модель предполагает, что отклик («брутто-кинетика») БС любого уровня есть конкуренция с момента рождения двух противоположно направленных процессов: деструкции функциональных связей БС под влиянием ОС и их восстановления (рекомбинации нарушений). Введены параметры, отражающие генетическую устойчивость, воздействие ОС и адаптационный отклик. Предполагается, что кинетика различных состояний БС и ее переходов в новые (из донологии в патологию, смерть, между уровнями донологии и патологии) однотипна. Переходы в новые состояния происходят при срыве адаптации экспоненциально. В общем случае новое состояние имеет и новые параметры.

Предлагаемую методологию можно использовать на популяционном уровне при математической обработке и анализе статистических множеств.

Модель предполагает наличие устойчивых и неустойчивых состояний. Состояния устойчивого динамического равновесия – докритические «долгоживущие» – возникают в результате уравнивания адаптации и

деструкции при уровнях воздействия ОС ниже критического. Динамическое равновесие становится неустойчивым, когда скорость деструкции больше скорости рекомбинации при уровне воздействия ОС выше критического. Тогда БС переходит в новое состояние. Критический уровень воздействия может стать основой гигиенического нормирования воздействия неблагоприятного фактора.

Полученные закономерности хорошо согласуются с наблюдаемыми. Введенный в работе безразмерный показатель – степень поврежденности системы – описывает риск БС находиться в определенном состоянии при любых видах внешнего воздействия. Его можно использовать для установления и прогнозирования причин наблюдаемых и возможных донозологических состояний, заболеваний, патологий и смерти.

Главной отличительной особенностью кинетики живой системы от неживой является физический смысл рекомбинации нарушенных связей. Он состоит в самообновлении клеток БС в процессе ее обмена с ОС массой и энергией. Для неживой же системы ее сопротивляемость к разрушению связана с восстановлением разорванных связей тепловыми флуктуациями.

Отличием является также выраженная автокаталитичность деструкции и рекомбинации по сравнению с неживой структурой. Вследствие этих различий наблюдается меньшая долговечность БС, так как самокопирование клеток при их делении может происходить с ошибками. Иных принципиальных отличий в кинетике взаимодействия с окружающей средой живых и неживых систем нет [26, 35].

Дальнейшее развитие данной математической модели требует анализа основного уравнения 1.46 при нестационарном воздействии ОС, исключения состояния «математического бессмертия», поиска эмпирических параметров модели, оценки допустимых уровней воздействия окружающей среды по критерию допустимого риска, выработке рекомендаций по профилактике

здоровья и принятию управленческих решений по улучшению качества жизни человека и окружающей среды.

В рамках предложенной модели необходимо учитывать и саморазвитие БС, если в правую часть уравнения 1.46 добавить положительный член, растущий с увеличением концентрации функциональных связей, а повышенную детскую смертность отмечать параметрами $\mu(t)$ и $\alpha(t)$, отражающими стресс при рождении и несовершенную адаптацию к новой окружающей среде.

1.2.2. Оценка риска здоровью населения при стационарных и нестационарных воздействиях негативных факторов окружающей среды на основе кинетической теории старения живых систем

Процесс структуризации и деструктуризации материи представляет собой одну из основных форм ее движения. Выше (гл. 1.2.1) была изложена базовая математическая модель старения биологических систем. Концепция подхода основана на следующем постулате: постоянная адаптация БС к окружающей среде (ОС) с момента рождения системы до ее гибели и непрерывная структуризация-деструктуризация БС как противоположно направленные процессы, обеспечивающие динамическое существование БС.

Скорость старения как скорость накопления повреждений БС в процессе гомеостаза рассматривается в виде двух конкурирующих альтернативных процессов – деструкции функциональных (системообразующих) связей БС и структурировании разрушенных связей (рекомбинации). Скорости конкурирующих процессов представлены в виде кинетических уравнений аутокаталитических химических реакций. Основными определяющими старение БС факторами являются: генетический фактор, фактор влияния ОС и фактор рекомбинации разрушенных связей БС. Воздействие ОС на БС рассматривается как один из факторов, определяющих кинетику старения с момента рождения БС.

Базовая математическая модель в безразмерных величинах имеет вид:

$$dD/d\tau = (1 - D)^{m_d} \cdot \exp(\mu/(1 - D)) - \varkappa \cdot D^{m_r}, \quad (\text{уравн. 1.58})$$

где D – степень повреждения БС (риск), $(0 \leq D \leq 1)$; μ – безразмерный параметр воздействия ОС; $\varkappa = \frac{K_r}{K_d} = \frac{K_{0r}}{K_{0d}}$ – отношение констант скоростей реакций рекомбинации разрушенных связей и их деструкции; $K_{d,r} = K_{0d,0r} \cdot \exp(-E_g)$, $E_g = E_a/kT$ – энергетический безразмерный параметр, определяющий уровень генетической устойчивости; k – постоянная Больцмана E_a – энергия активации связи; T – абсолютная температура БС; t и $\tau = (K_d/n_0)t$ – астрономическое и биологическое (безразмерное) время; n_0 – начальная концентрация функциональных связей БС – начальное количество физических связей в единице объема БС, определяющих степень старения БС; $m_{d,r} > 0$ – порядки реакций деструкции и рекомбинации связей.

В базовой модели параметры $\mu(\tau)$ и $\varkappa(\tau)$ считались постоянными, не зависящими от времени. Эта модель, основываясь на концепции адаптивного реагирования, вводит понятие негативного воздействия ОС, критического состояния БС и срыва адаптации. Она однотипна для БС любой сложности – клетки, ткани, органа, внутренней системы, организма, популяции.

Модель не описывает наблюдаемый в специальных токсикологических экспериментах отклик БС в виде затухающей осцилляции при импульсном (часы, сутки) введении токсиканта. Не рассмотрены также возможности базовой модели для описания детской смертности при рождении и в послеродовой период (в зависимости от возраста ребенка, географического места и социальных условий проживания) при изменении параметра негативного воздействия $\mu(\tau)$ от текущего времени жизни τ .

Введем в базовую модель соответствующие поправки и дополнения и рассмотрим ее новые возможности, в том числе в условиях нестационарности негативного воздействия.

Учет истощения адаптационных резервов. Для учета истощения адаптационных резервов со временем воздействия и степенью повреждения D рекомбинационный второй член в уравнении 1.48 запишем в виде

$$-A_r = \alpha \cdot D^{m_r} \cdot (1 - D)^{m_{em}} \cdot \exp(-\tau/\tau_r), \quad (\text{уравн. 1.59})$$

где τ_r – характерное время релаксации истощения адаптационного резерва, например в результате ослабления иммунитета и других возможных причин, $m_{em} > 0$.

Уравнение 1.59, в отличие от монотонно растущего рекомбинационного члена с увеличением D в уравнении 1.58, отражает как увеличение, так и истощение адаптационных возможностей биосистемы в процессе поддержания гомеостаза.

Из условия экстремума уравн. 1.59 $\frac{\partial A_r}{\partial D} = 0$ вычисляется значение $D = \hat{D}$, соответствующее максимуму скорости адаптации:

$$\hat{D} = \frac{m_r}{m_r + m_{em}} \cdot \alpha \cdot \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_r}\right). \quad (\text{уравн. 1.60})$$

С увеличением текущего времени жизни биосистемы τ экстремальное значение $D = \hat{D}$ уменьшается. В частном случае $m_r = 1$ для наиболее характерных значений m_{em} имеем:

$$D_{ad}^{ext} = \alpha \cdot \exp(-\tau/\tau_r) \begin{cases} 0,50 & m_{em} = 1 \\ 0,33 & \text{при } m_{em} = 2 \\ 0,25 & m_{em} = 3 \end{cases}. \quad (\text{уравн. 1.61})$$

Базовая модель допускает математическое бессмертие БС при значениях параметра внешнего воздействия $\mu(\tau) < \mu_{cr}(\tau)$. Введение экспоненциального множителя в рекомбинационный член уравнения 1.49 запускает процесс, при котором действующая исходно докритическая величина $\mu(\tau)$ через некоторое время «условного бессмертия» БС оказывается для нее критической.

Произведение $\alpha \cdot \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_r}\right)$ в рекомбинационном члене за это время успевает уменьшиться настолько, что создает возможность перехода системы

из подкритического в надкритическое состояние. Таким образом, состояние бессмертия исключается при любых значениях параметра $\mu(\tau) > 0$ (рис. 1.4).

Рис. 1.4. Зависимость степени повреждения БС D от времени τ

Кривые 1 ($\mu = 1,1$); 2 ($\mu = 1,2$); 3 ($\mu = 1,3$); 4 ($\mu = 1,5$) соответствуют кинетическому уравнению старения (уравн. 1.58) при значениях параметров $\kappa = 10$, $m_d = m_r = 2$; (для этого случая $\mu_{cr} = 1,248$, $D_{cr} = 0,616$); кривая 5 ($\mu = 1,2$) соответствует кинетическому уравнению (уравн. 1.58) с рекомбинационным членом (1.59), в котором $m_{em} = 0$ и $\tau_r = 5$.

Учет нестационарности негативного воздействия окружающей среды

Характер негативного воздействия на БС чаще всего является нестационарным, в том числе стохастическим. Однако длительные стохастические воздействия ОС на БС можно свести к квазистационарному простым усреднением интенсивности воздействия ОС при условии незначительных ее колебаний вблизи среднего значения.

Рис. 1.5. Зависимость степени повреждения БС D от времени τ для кинетического уравнения старения (1) при $\alpha = 0$, $m_d = 2$

Пунктиром обозначен участок кинетической кривой при $\mu = 0,5$ и $\tau > 0,7$.

$$\text{Кривая 1: } \mu(\tau) = \begin{cases} 0,5 & \text{при } 0 \leq \tau \leq 0,7 \\ 0,1 & \text{при } \tau > 0,7 \end{cases},$$

$$\text{Кривая 2: } \mu(\tau) = \begin{cases} 0,1 & \text{при } 0 \leq \tau \leq 0,5 \text{ и } \tau \geq 1,25 \\ 0,3 \cdot |\sin[8,37 \cdot (\tau - 0,5)]| & \text{при } 0,5 < \tau < 1,25 \end{cases}$$

При чрезвычайных ситуациях аварийного характера могут возникнуть резкие изменения негативного воздействия во времени. Такие воздействия необходимо учитывать в модели, вводя реальные зависимости $\mu(\tau)$.

Введение зависимости μ от времени τ принципиально усложняет решение кинетического уравнения 1.58, сводя его к численным методам (рис. 1.5).

Особый интерес представляют случаи импульсного токсического воздействия на БС. На основании анализа и обобщения результатов экспериментов, приведенных Т. Н. Грибановой и соавт. [36], описаны математически общие закономерности адаптационной способности организма при повторных химических воздействиях. Подтверждение достоверности и повторяемости явлений было проведено на различных уровнях биологических организаций (целостного организма, отдельных органов).

Было установлено, что динамика адаптационных процессов при воздействии любых химических веществ независимо от пути их поступления, уровня воздействия и показателя, по которому оценивается действие токсиканта, характеризуется затухающей колебательной кривой. Сделан вывод, что характер изменения адаптационной способности организма не является случайным и единичным, а является универсальным и обусловлен причинно-следственной связью между химическим агентом окружающей среды и определенной совокупностью внутренних свойств биосистемы.

Биологический адаптационный отклик системы может иметь временное запаздывание, зависящее от свойств токсиканта и пути его поступления в организм. Отклик системы при таких воздействиях яда в переносимых дозах представляет собой затухающую осциллирующую кривую, стремящуюся к некоторому установившемуся значению (рис. 1.6). Длительность осцилляции наблюдалась до десятков суток при длительности первичных импульсов (поступление яда) в пределах одних суток.

Рис. 1.6. Зависимость степени повреждения БС D от времени τ для кинетического уравнения 1.58 при $\alpha = 0$, $m_d = 2$

Кривая 1 соответствует случаю $\mu = 0,1$; кривая 3 соответствует значениям $\mu(\tau)$ в виде зависимости (уравн. 1.62) при значениях параметров $\mu_{en} = 0,4$; $\tau_1 = 0,043$; $\gamma = 2$; $a = 0,4$; $\tau_2 = 0,368$; $\beta = 18$ при $\tau > 0,5$. Кривая 2 (пунктир) соответствует случаю, когда $\mu = 0,4$ при $\tau > 0,5$. Кривая 4 представляет собой алгебраическую разность между кривыми 3 и 1; кривая 5 – экспериментальные результаты оценки активности ферментов печени в зависимости от времени отклика биосистемы, при импульсном токсическом воздействии на животных

Изменение параметра $\mu(\tau)$, связанное с «внутренними» свойствами биосистемы – запаздыванием ее отклика на изменение внешнего воздействия и «подстройкой» к оптимальному состоянию, можно учесть посредством ввода соответствующих функций:

$$\mu(\tau) = \mu_{en}(\tau) \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{\tau}{\tau_1} \right)^\gamma \right] \right\} \left\{ 1 + \left[a \cdot \exp \left(- \frac{\tau}{\tau_2} \right) \right] \sin \beta \tau \right\}, \text{ (уравн. 1.62)}$$

где $\mu_{en}(\tau)$ – функция изменения интенсивности внешнего негативного воздействия ОС; γ и τ_1 – параметры, характеризующие запаздывание отклика биосистемы; τ_2 – характерное время релаксации процесса затухания осцилляции; a и β – амплитуда и круговая частота осцилляции.

Из уравнения 1.62 следует, что в случае $\mu_{en}(\tau) = \text{const}$, амплитуда a порядка единицы и $\gamma > 1$; начиная с момента времени $\tau = 0$ постоянное значение $\mu(\tau)$ с точностью до 5 % достигается при значении $\tau \cong \bar{\tau} = 3(\tau_1, \tau_2)_{max}$, так как:

$$\exp(-\tau/\tau_1)|_{\tau=\bar{\tau}} \cong 0,05. \quad \text{(уравн.1.63)}$$

При значениях $\tau > \bar{\tau}$ с точностью не ниже 5% можно считать, что $\mu(\tau) = \mu_{en}(\tau)$.

Возможности моделирования детской смертности и смертности долгожителей. Детская смертность, как правило, существенно выше, чем в молодом и зрелом возрасте, заметно различается в зависимости от места рождения ребенка, социальных условий, медицинского обслуживания.

Максимум детской смертности наблюдается сразу после рождения ребенка и в послеродовой период в первый год жизни, уменьшаясь 10–15 годам. Дети могут рождаться с врожденными дефектами, испытывать родовые травмы и сильный нервный стресс при рождении, попадая в новую для себя окружающую среду.

Таким образом, БС исходно может быть подвергнута краткосрочному (стресс при рождении, родовые травмы) или долгосрочному (дефекты БС, возникающие в процессе развития плода) негативному воздействию, которое необходимо учитывать при дальнейшей адаптации БС. Базовая математическая модель предполагает одинаковые условия состояния детей при рождении.

Вариабельность базовой модели, необходимая для описания реально наблюдаемой клинической картины детской смертности и последующего влияния исходных дефектов БС, может быть достигнута введением параметра начального негативного воздействия $\mu_0(\tau)$, дополнительного к параметру негативного воздействия ОС $\mu_1(\tau)$, изменяя его амплитуду, длительность и характер зависимости от времени:

$$\mu(\tau) = \mu_0(\tau) + \mu_1(\tau). \quad (\text{уравн. 1.64})$$

Имеющиеся клинические факты констатируют существенное замедление с возрастом скорости смертности долгожителей [18]. Математическая модель Гомпертца–Мейкхема этого замедления не учитывает. Анализ характера замедления интенсивности смертности долгожителей позволяет это замедление учесть введением дополнительного коэффициента θ в показатель экспоненты в уравнении 1.58 в виде $\exp(\mu/(1 - \theta \cdot D))$, $0 \leq \theta < 1$. Введение такого коэффициента позволяет исключить срыв адаптации, происходящий математически при бесконечно большой скорости $\frac{\partial D}{\partial \tau}$, и после некоторых значений τ замедлить процесс накопления повреждений D до нулевой скорости при $D = 1$. При этом начало замедления процесса будет зависеть от величины θ : чем больше θ , тем при меньших значениях D будет наблюдаться уменьшение скорости повреждений (рис. 1.7).

Рис. 1.7. Сравнение расчетных результатов, полученных по кинетической теории старения, с экспериментальными данными В.Н. Крутько и соавт. [17] для когорт населения, по показателям кумулятивной функции смертности $D(\tau)$, плотности вероятности распределения смертности $\partial D / \partial \tau$, кумулятивной функции дожития $1 - D(\tau)$

Результаты получены из решений кинетического уравнения 1.55 при $\mu = 1,2$; $m_d = m_r = 1$; $\theta = 0,4$; $\alpha = 34$; $m_{em} = 3$, $\tau_r = \infty$ для функций: $\partial D / \partial \tau$, (кривая 5), D (кривая 3), $1 - D$ (кривая 4). Экспериментальные данные соответствуют функциям: D (кривая 2), $1 - D$ (кривая 1), $\frac{\partial D}{\partial \tau}$ (дискретные экспериментальные значения, нормировка расчетных и экспериментальных данных для проведения сравнения выполнена при $\tau = 0,3$). На оси абсцисс $\tau = 1$ соответствует $t = 100$ лет.

В окончательном варианте, с учетом всех наблюдаемых особенностей существования БС в процессе ее взаимодействия с ОС, уравнение кинетики старения примет вид:

$$\frac{\partial D}{\partial \tau} = (1 - D)^{m_d} \cdot \exp \left[\frac{\mu(\tau)}{1 - \theta D} \right] - \alpha \cdot D^{m_r} \cdot (1 - D)^{m_{em}} \cdot \exp \left(-\frac{\tau}{\tau_r} \right), \text{ (уравн. 1.65)}$$

где $\mu(\tau) = \sum_{i=1}^n \mu_i(\tau)$, а источники i -х негативных нагрузок $\mu_i(\tau)$, их интенсивность, длительность и характер зависимости от времени определяются

социальными условиями (для человека), видом и качеством ОС (вода, воздух, почва, продукты питания), типом воздействия (химическое, радиационное, биологическое и др.), повреждениями зародыша в процессе развития, родовыми травмами, стрессом при рождении и др.

При импульсных токсических воздействиях на БС, когда время внешнего воздействия существенно меньше характерного времени биологического отклика БС, следует учитывать запаздывание биологического отклика БС.

Динамика старения и риски состояния здоровья отыскиваются численным интегрированием уравн. 1.65:

$$D(\tau) = \int_0^{\tau} \frac{\partial D}{\partial \tau} d\tau. \quad (\text{уравн. 1.66})$$

Продолжительность жизни (долговечность) БС $\tau = \tau_{mb}$ отыскивается из решения уравнения 1.66; при значении поврежденности БС $D = 1$ – из решения уравнения 1.67:

$$\int_0^{\tau_{mb}} [\partial D / \partial \tau] d\tau = 1. \quad (\text{уравн. 1.67})$$

Биологический возраст БС определяется степенью поврежденности D .

Кинетическое уравнение 1.65 содержит параметры, которые могут быть получены из специальных медико-экологических экспериментов и обследований состояния здоровья населения и качества ОС, начиная с условий стационарности ОС. Это позволяет вначале исключить параметры нестационарности, а затем сократить и иные параметры, исходя из принципа максимальной простоты модели и достаточной точности оценок, рассматривая отдельно периоды детства, зрелости, старости и долгожительства.

Для каждой индивидуальной БС вследствие действия второго начала термодинамики (закона возрастания энтропии) физическая гибель системы со временем неизбежна. Закон предполагает неизбежность накопления хаоса со временем в любой открытой системе.

Вследствие этого типы старения могут проявляться множеством конкретных механизмов старения как в одном организме, так и для организмов

разных видов. Различные механизмы старения приводят к одному и тому же интегральному результату – накоплению повреждений БС и, как следствие, ослаблению адаптации.

Количество параметров, требуемых для описания кинетики старения, в общем случае определяется степенью детализации решения (для каждой индивидуальной БС, каждой когорты и популяции имеет место свой набор параметров, отличающихся в той степени, в какой наблюдаются реальные отличия индивидуальных БС или их множеств, с теми особенностями, которые обусловлены характеристиками окружающей среды).

Однако, как следует из наблюдений и представленной математической модели, отражающей реальные свойства БС, скорость процесса старения может быть замедлена, поврежденность системы уменьшена. Долговечность может увеличиваться при уменьшении интенсивности негативных нагрузок и повышении адаптационных способностей БС.

Уменьшение скорости старения. Рассмотрим два возможных случая уменьшения скорости старения: изменение внешнего воздействия и саморегуляцию.

В первом случае наиболее эффективными являются целенаправленные действия по уменьшению уровня негативного воздействия окружающей среды – $\mu(\tau)$. Такое управленческое воздействие может быть предпринято лишь на основе результатов медико-экологического мониторинга состояния здоровья БС, качества ОС и оценок рисков здоровью (при установлении основного источника негативного влияния и этиологии заболевания).

Уменьшение интенсивности негативного воздействия приводит к изменению уровня состояния здоровья БС на соответствующей меньшей скорости старения и увеличению продолжительности жизни. Медицинское вмешательство может привести лишь к временному улучшению состояния здоровья, так как возврат БС и те же внешние условия приведут к продолжению

процесса старения при той же интенсивности негативного воздействия окружающей среды.

Другой механизм уменьшения скорости старения обусловлен активным саморегулированием процесса адаптации за счет прямой биологической функциональной связи между интенсивностью негативного воздействия $\mu(\tau)$ и скоростью адаптации БС.

Рассмотренный вариант саморегулирования является гипотетическим. Возможность и характер БС осуществлять единичные или повторные акты саморегулирования требует специального медицинского экспериментального подтверждения. Саморегулирование можно также учесть, сделав в рекомбинационном члене замену $D^{m_r} \rightarrow (D + \xi \cdot \mu)^{m_r}$.

Введем такую связь в рекомбинационный член уравнения 1.55:

$$\begin{aligned} \partial D / \partial \tau = & (1 - D)^{m_d} \cdot \exp[(\mu(\tau)) / (1 - \theta D)] - \alpha \cdot [1 + \delta \cdot \mu(\tau)] \cdot D^{m_r} \cdot \\ & (1 - D)^{m_{em}} \cdot \exp(-\tau / \tau_r), \end{aligned} \quad (\text{уравн. 1.68})$$

где $\delta > 0$ – параметр, отражающий степень отклика рекомбинационной способности БС на негативное воздействие.

В данном случае при надкритических значениях $\mu(\tau)$ состояние БС может возвращаться в «условно подкритическое» состояние, скорость старения при котором будет уже определяться не столько первым деструктивным членом, сколько биологически определенным временем релаксации τ_r , входящим в экспоненциальный множитель рекомбинационного члена уравнения 1.65. Однако при выходе БС из зоны подкритических состояний ее по-прежнему неизбежно ждет срыв адаптации.

Рассмотренный выше кинетический подход позволяет выполнять оценки интегральных показателей здоровья населения (риска смертности $D(\tau)$, функции дожития $(1 - D(\tau))$, интенсивности смертности $\partial D / \partial \tau / (1 - D(\tau))$, плотности вероятности смертности $\frac{\partial D}{\partial \tau}$ и продолжительности жизни t) при

известных значениях параметров математической модели, которые могут быть получены при специальной обработке статистических медицинских данных (методика такого поиска параметров представлена в гл. 1.3.1.).

В то же время для оценки рисков возникновения и развития отдельных видов патологий для ограниченных когорт населения (или отдельных лиц) необходимы исходные данные по дифференциальным показателям здоровья, которые, как правило, недоступны исследователям. В этом случае возникает необходимость формирования показателя клинических исходных данных (а также данных об их статистической представительности, достоверности и надежности с целью их пригодности для математической обработки), включающего комплекс характеристик оценки биологического возраста, степени старения, состояния здоровья. В данном случае степень повреждения БС математически может быть выражена в виде уравнения:

$$D(\tau) = \sum_{i=1}^n g_i \cdot \frac{N_i(\tau)}{N_{icr}}, \quad (\text{уравн. 1.69})$$

где n – полное число показателей повреждения БС, $N_i(\tau)$ и N_{icr} – текущее значение i -го показателя старения БС и критическое значение этого показателя, соответствующее срыву адаптации и достижению значения $D = 1$; g_i – весовой множитель для i -го показателя старения, отражающий степень влияния каждого из них на процесс старения. При этом должно соблюдаться условие нормировки весовых множителей: $\sum_{i=1}^n g_i = 1$. Весовые множители могут устанавливаться экспертно.

Изложенный выше методический подход математически описывает кинетику процессов структуризации-деструктуризации биологической системы любого иерархического уровня (от момента рождения до перехода в патологическое состояние и гибели), отражающих непрерывный процесс адаптивного реагирования на факторы окружающей среды. Одним из параметров предложенной математической модели является параметр негативного воздействия, отражающий как внешнее воздействие окружающей

среды (антропогенное и природное), так и внутренние негативные факторы, возникающие в процессе онтогенеза.

Рассмотренный кинетический подход отражает современные научные представления о существе жизни как о процессе детерминированной случайности или случайной детерминированности [14], адаптивно «фильтрующем» через сеть ограничений развития особенности генотипа и таким образом создающим набор возможных фенотипов.

Биологический возраст определяется степенью повреждения БС – $D(\tau)$, а биологическое время τ течет с разной скоростью в зависимости от биологического возраста D , в то время как астрономическое время t течет с постоянной скоростью. Скорость течения биологического времени определяется зависимостью скорости изменения степени повреждения D от времени τ , которая не линейна (большие скорости течения биологического времени наблюдаются в детском возрасте и в старости, наименьшие – в зрелом возрасте и среди долгожителей).

Генетический параметр является наиболее устойчивым на протяжении всей жизни БС. Однако даже небольшие его вариации (а E_g) могут существенно влиять на биологическое время. Так, например, при номинальном значении $E_g = 5$ биологическое время БС со значением $1,05 E_g$ будет протекать примерно в 1,3 раза медленнее времени другой БС, имеющей номинальное значение E_g .

Наиболее сложным членом математической модели является член структуризации (адаптации) биологической системы, отражающий временную обратную связь «чем больше степень деструкции, тем больше скорость восстановления функций БС», которая с течением времени из-за истощения адаптационных ресурсов нарушается, а срыв адаптации становится неизбежным. Принципиально возможно расширение модели до саморегулирующейся системы посредством математического описания непрерывного колебательного процесса вблизи критического состояния,

обусловленного прямой зависимостью параметра адаптации от величины параметра негативного воздействия.

Кинетическая математическая модель старения построена на конкуренции двух противоположно направленных процессов – деструкции и структурирования функциональных связей БС. Она предполагает критическое явление: срыв адаптации при негативных воздействиях выше критических и более медленный процесс старения при меньших нагрузках с последующим срывом адаптации из-за истощения адаптационных ресурсов. Подобные критические явления наблюдаются и при иных видах конкурирующих процессов в неживых системах. Количественный показатель степени повреждения $D(\tau)$, нормированный на единицу, должен содержать комплекс измеряемых или экспертно оцениваемых характеристик здоровья.

Предложенная структура математической модели старения и ее параметры позволяют описывать известные результаты наблюдений медицинской статистики, потенциально оценивать риски заболеваний и патологий как индивидуальной БС, так и БС когорт и популяций, идентифицировать

1.2.3. Статистические подходы оценки риска донозологических и патологических состояний при воздействии негативных факторов окружающей среды

Поиск показателей здоровья, значимых и пригодных для использования в кинетической теории, может быть облегчен их статистическим анализом. Специальный метод их статистического анализа может быть также успешно применен для предварительной оценки рисков возможных донозологических и патологических состояний. Ниже приведены наиболее часто встречающиеся в медицинской клинической практике частотные распределения биохимических показателей здоровья, статистические методы их обработки и статистический подход к оценке риска здоровью по таким индивидуальным характеристикам.

Показатели здоровья являются случайными величинами. Одним из основных критериев влияния негативных факторов окружающей среды на здоровье является различие статистических множеств показателей здоровья в исследуемом и контрольном районах (территориях, где предположительно экологические факторы исследуемого района отсутствуют).

Отсутствие экологически приоритетных факторов влияния в контрольном районе устанавливается сравнением экологических показателей качества ОС (вода, воздух, почва, продукты питания) и результатов анализа содержания приоритетных экотоксикантов в биосубстратах (кровь, моча, волосы, ногти) проживающих на сравниваемых территориях. В связи с этим необходимо знать виды возможных статистических распределений показателей здоровья, статистические параметры распределений и выбрать критерии совпадения статистических множеств.

Статистический анализ множества реальных частотных распределений показателей здоровья на организменном, органном, системном и биохимическом уровнях показал возможность существования трех видов статистических непрерывных распределений: нормальное, логнормальное и асимметричное полимодальное.

Виды характерных статистических распределений показателей здоровья:

а) Нормальное распределение

Непрерывная случайная величина L называется нормально распределенной с параметрами m и s ($m, s = \text{const}, s > 0$), если ее функция плотности распределения $P(L)$ имеет вид:

$$P(L) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \exp(-(L - m)^2 / (2 \cdot \sigma^2)), \quad (\text{уравн. 1.70})$$

где $m = M(L)$ – математическое ожидание; σ^2 – дисперсия ($s = \sqrt{\sigma^2}$ — среднее квадратичное отклонение).

График функции $P(L)$ называют нормальной кривой или кривой Гаусса. В точке $L = M$ кривая имеет максимум, а точки $L = M \pm \sigma$ являются точками перегиба кривой, которая симметрична относительно $L = M$ (рис. 1.8).

Рис. 1.8. Функция плотности нормального распределения

Рис. 1.9. Функция плотности логарифмически нормального распределения с различными значениями дисперсий

Вид кривой Гаусса зависит от значений M и σ ; значения M сдвигают кривые конгруэнтно, значения σ изменяют форму кривой. С увеличением σ кривая становится более пологой, с уменьшением – более узкой. Распределение $L = N (M = 0, \sigma = 1)$ называют стандартным нормальным распределением.

в) Логарифмически нормальное (логнормальное) распределение

Случайная величина Y имеет логнормальное распределение, если $\ln(Y)$ соответствует нормальному распределению; или если величина x имеет нормальное распределение, то величина $y = \exp(x)$ имеет логнормальное распределение. Плотность логнормального распределения (рис. 1.9):

$$P(x) = \frac{1}{\sigma \cdot x \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp(-(\ln(x) - \ln(a))^2 / (2 \cdot \sigma^2)). \text{ (уравн. 1.71)}$$

Средняя величина $m = a \cdot \exp(0,5\sigma^2)$, дисперсия $D = a^2 \cdot \exp(\sigma^2) \cdot (\exp(\sigma^2) - 1)$.

с) Асимметричное полимодальное распределение

Согласно опубликованным в литературе экспериментальным данным, а также результатам клинических обследований населения, проживающего вблизи химически опасных объектов, частотные распределения физиологических показателей (в дальнейшем показатели) при клинических обследованиях могут представлять собой, как правило, асимметричные кривые, не соответствующие в общем случае закону нормального распределения. Однако, несмотря на это, для удобства статистической обработки делается априорное допущение о соответствии этих распределений нормальному закону.

Частотные распределения показателей, встречающиеся на практике, трудно разделить на области «нормы» и «патологии», так как они четко не разделяются на дихотомические, и тем более полимодальные, (хотя явное разделение наблюдается в редких случаях). Они не имеют различных выделенных пиков, из которых один соответствовал бы «нормальному» состоянию здоровья, а другой – «патологическому».

На практике анализируются показатели «смешанных» групп людей, и одни и те же показатели для «больных» и «здоровых» перекрывают друг друга. Это обстоятельство является типичным для частотных распределений показателей.

В случае заметного «вырождения» фактического распределения показателя в сторону дихотометрии или полимодальности, особенно при наблюдении областей показателей, лежащих за пределами установленных численных пограничных нормативов, возможно и целесообразно разделять «смешанную» функцию распределения (смешанную по «норме» и «патологии») анализируемого показателя на отдельные функции распределения – для «нормы» и «патологии». Для каждой группы таких условных категорий состояния здоровья функция распределения показателя предполагается соответствующей нормальному распределению.

Такое разделение целесообразно проводить при анализе причинно-следственных связей заболеваемости и источников негативного влияния для раздельного изучения «нормальных» и «патологических» групп.

Предположим, что $P(L)$ непрерывная функция распределения частоты P по значению показателя L . При увеличении числа наблюдений P можно рассматривать как величину, приближающуюся к плотности вероятности наблюдения показателя.

При этом область изменения накопленной вероятности соответствует интервалу $[0,1]$, а область изменения показателя L в общем случае не ограничена, т.е. может изменяться от $-\infty$ до $+\infty$.

В соответствии с принятыми условиями такую функцию можно разложить в ряд по функциям Гаусса:

$$P(L) = \sum_{i=1}^n g_i P_i(L), \quad (\text{уравн. 1.72})$$

где n – количество членов разложения, достаточное для требуемой точности аппроксимации разложения, i – порядковый номер члена разложения, $P_i(L)$ – i -я функция Гаусса, имеющая свои индивидуальные параметры: дисперсию σ_{Li}^2 и

среднее значение $\bar{L}_i$, g_i — константа — весовой множитель i -го члена разложения, представляющий собой полную вероятность наблюдения показателей i -го члена разложения.

В соответствии со свойствами функции Гаусса и определениями математической статистики параметры распределения можно найти следующим образом:

$$\bar{L} = \int_{-\infty}^{+\infty} L \cdot P(L) dL, \quad (\text{уравн. 1.73})$$

$$\sigma_L^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} P(L) \cdot (L - \bar{L})^2 dL, \quad (\text{уравн. 1.74})$$

$$\alpha = \int_{-\infty}^{+\infty} P(L) \cdot dL, \quad (\text{уравн. 1.75})$$

где L_α — значение показателя L , выше которого вероятность иметь значение $L \geq L_\alpha$ равна α (α — накопленная вероятность).

Уравнения 1.73–1.75 справедливы для произвольного вида гладкой кривой $P(L)$. Аналогичным образом записываются выражения для каждого члена уравнений 1.73–1.75:

$$\bar{L}_i = \int_{-\infty}^{+\infty} L \cdot P_i(L) dL, \quad (\text{уравн. 1.76})$$

$$\sigma_{Li}^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} P_i(L) \cdot (L - \bar{L}_i)^2 dL, \quad (\text{уравн. 1.77})$$

$$\alpha_i = \int_{-\infty}^{+\infty} P_i(L) \cdot dL. \quad (\text{уравн. 1.78})$$

Условия нормировки для уравнений 1.70–1.76:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} P(L) dL = \int_{-\infty}^{+\infty} P_i(L) dL = 1, \text{ т.е., } \sum_{i=1}^n g_i = 1. \quad (\text{уравн. 1.79})$$

Так как каждый член разложения 1.72 представляет собой нормальное распределение, сохраняется возможность оперировать с каждым членом разложения параметрами нормального распределения. Зная статистические параметры i -го члена разложения, после определенных преобразований нетрудно отыскать статистические параметры «смешанного» распределения:

$$\bar{L} = \sum_{i=1}^n g_i \cdot \bar{L}_i, \quad (\text{уравн. 1.80})$$

$$\sigma_L^2 = \sum_{i=1}^n g_i \cdot \sigma_{Li}^2 + \sum_{i=1}^n g_i \cdot (\bar{L}_i - \bar{L})^2, \quad (\text{уравн. 1.81})$$

т.е. среднее значение $\bar{L}$ и дисперсия σ_L^2 полного распределения $P(L)$ легко отыскиваются по соответствующим характеристикам гауссовых членов разложения с учетом их весовых коэффициентов g_i .

Проведенный таким образом анализ результатов биохимических обследований, в частности крови, показал, что в случаях заметного количества пациентов, у которых часть показателей лежит существенно вне областей нормы (ниже или выше нормы), достаточно трех членов разложения.

В ряде случаев функция распределения может быть аппроксимирована одним членом разложения 1.72, когда области «нормы» и «патологии» практически конгруэнтны или области «патологии» не наблюдаются.

Таким образом, представленный подход является развитием применения методов математической статистики в теории доказательной медицины, расширяющим возможности математической обработки данных физиологических клинических измерений. Полимодальная статистическая модель точнее отражает количественные и качественные представления. Традиционно используемое на практике допущение об одномодальном (нормальном) распределении физиологических показателей является частным случаем изложенного подхода. Это обобщение позволяет учесть «хвосты» реальных распределений и таким образом «патологические» области так же, как и «нормальную» область показателей, характеризовать средними значениями и дисперсиями, соответствующими нормальным членам разложения.

Ниже для примера практической реализации этого подхода представлены реальные функции распределения и параметры их аппроксимации для некоторых биохимических показателей крови: холинэстераза, альфа-2, общий белок – параметры биохимического анализа, использованные при выполнении работы [37]. Общее число обследованных пациентов составляет 84 человека (рис. 1.10-1.12). Нормативы физиологических показателей для различных возрастов одинаковы.

Поиск членов ряда разложения представляет собой в существенной степени искусство исследователя. Первым этапом является оценка возможности аппроксимации частотного распределения одной функцией Гаусса, как, например, на рис. 1.10. (Здесь дискретные наблюдения в правом «хвосте» соответствуют 3 пациентам, и этими наблюдениями пренебрегается при дальнейшей аппроксимации ввиду их малости в общем множестве наблюдений).

Рис. 1.10. Частотное распределение показателя крови «Холинэстераза», L . а – гистограмма построена по реальным данным суммированием числа обследованных пациентов N , имеющих значение показателя L в равных интервалах шириной 100 ед. Холинэстеразы (СНЕ): $N = f(L)$; б – плотность вероятности как функция безразмерного показателя $U = (L - L_{\text{ср}})$, гистограмма – перестроенная в этих координатах гистограмма (рис. 1.10а), сплошная линия – аппроксимация этого распределения одномодальной кривой Гаусса

При невозможности одномодальной аппроксимации оцениваются возможности двух-, затем трехмодальной аппроксимации. При этом восстановление членов разложения начинается по левым и правым частям членов разложения с учетом незначительности влияния смежного члена разложения. Опыт подобной обработки показывает достаточность двух-трех итераций. Оценка сходимости фактических данных и результатов аппроксимации производится по величине относительной погрешности расхождения исходя из реального числа обследований. Интегральное

расхождение результатов не превышает 1%, дифференциальное, при отдельных значениях показателя, – до 30 процентов.

Рис. 1.11. Частотное распределение показателя крови «Альфа 2», L

Рис. 1.12. Частотное распределение показателя крови «Общий белок», L

Гистограмма на рис. 1.11 построена по реальным данным суммированием числа обследованных пациентов N , имеющих значение показателя L в равных интервалах шириной 1 ед. Сплошными линиями обозначены члены двухмодального разложения N : N_1 , N_2 и (N_1+N_2) , построенные в выбранных координатах $N=f(L)$ для наглядности точности аппроксимации и выбора параметров. Вертикальными линиями обозначены границы нормы, соответствующие 6 и 10 единицам.

Гистограмма на рис. 1.12 построена по данным суммированием числа обследованных N , имеющих значение показателя L в равных интервалах шириной 2 ед. Сплошными линиями обозначены члены трехмодального

разложения N : N_1 , N_2 , N_3 и $(N_1+N_2+N_3)$, построенные в выбранных координатах $N=f(L)$ для наглядности точности аппроксимации и выбора параметров. Вертикальными линиями обозначены границы нормы, соответствующие 56 и 67 ед. Аппроксимирующие полимодальные кривые повторяют немонотонности реального распределения и выделяют «хвосты», обусловленные областями патологии.

На рис. 1.13 для иллюстрации предложенного подхода приведены также результаты математической обработки данных частотного распределения концентрации изониазида в крови через 6 часов после приема стандартной дозы препарата. В полученных экспериментальных данных (гистограмма) бимодальность отражает существование двух фенотипов – быстрых и медленных инактиваторов изониазида.

Рис. 1.13. Частотное распределение концентрации изониазида C (мкг/мл) в крови пациентов через 6 часов после приема стандартной дозы препарата

Применение статистики малых множеств при сравнении показателей здоровья населения, проживающего в исследуемом и контрольном районах

При проведении медико-экологической диагностики устанавливаются законы распределения случайных величин (показателей здоровья населения) в исследуемом и контрольном районах. Вычисляются параметры их

распределения и проверяются статистические гипотезы о совпадении/отличии двух сравниваемых статистических множеств.

Два сравниваемых статистических множества будем считать совпадающими, если подтверждаются статистические гипотезы о совпадении средних значений и дисперсий (для полимодальных распределений должен совпадать третий параметр – весовой множитель). При невыполнении хотя бы одного из этих условий статистические множества являются несовпадающими. Проверка на совпадение статистических множеств является одним из критериев оценки возможного влияния на здоровье населения экологических характеристик исследуемого района, отличных от характеристик контрольного района.

Проверка статистических гипотез выполняется, как правило, в условиях малого объема этих групп населения, различающихся возрастом, полом, социальными условиями и др., поэтому здесь рассматривается статистика малых множеств применительно к задачам диагностики в доказательной медицине.

Методы принятия решений в условиях случайного характера данных рассматриваются в теории проверки статистических гипотез. Статистическая гипотеза есть предположение о некоторых свойствах статистической совокупности, требующих проверки и подтверждения.

Типичная задача проверки гипотезы появляется, когда необходимо сделать вывод о выборе между двумя возможными (взаимоисключающими) альтернативами. Например, когда необходимо определить, оказывает ли определенный фактор влияние на здоровье людей (нулевая гипотеза H_0) или нет (альтернативная гипотеза H_1).

Формально в качестве нулевой гипотезы H_0 можно выбрать любую из рассматриваемых гипотез. Однако последствия будут различны из-за различия характера ошибок, возникающих при проверке гипотез. Поэтому выбор гипотезы в качестве основной требует обоснования. Как правило, основное проверяемое предположение выбирают в качестве нулевой гипотезы и

формулируют как: незначительность влияния фактора, отсутствие отличий и т. п.

Другое проверяемое предположение называется альтернативной (конкурирующей) гипотезой. Например, если предпринимается попытка доказать, что некий фактор оказывает влияние на здоровье населения, то в качестве нулевой гипотезы рассматривается утверждение, что данный фактор не оказывает влияния на здоровье. Фактически нулевая гипотеза рассматривается как утверждение, несостоятельность которого более бесспорна, чем истинность.

Для проверки справедливости нулевой гипотезы используются статистические критерии. Под статистическим критерием понимают как метод оценки, так и величину, получаемую в результате применения метода.

Общая схема проверки нулевой гипотезы H_0 (отсутствие статистически значимого различия) заключается в следующем:

- 1) выбирается статистический критерий;
- 2) задается критический уровень значимости $\alpha_{кр}$, который трактуется как вероятность ошибочно отвергнуть нулевую гипотезу тогда, когда она на самом деле верна (ошибка I рода). Обычно этот уровень выбирается из значений 0,05; 0,01; 0,001;
- 3) находится пороговое значение выбранного критерия $K_{пор}$ для заданного уровня значимости;
- 4) расчетным путем определяется реальный уровень значимости $\alpha_{выч}$ нулевой гипотезы.
- 5) нулевая гипотеза не отклоняется, если вычисленное значение статистики критерия $K_{выч}$ не больше $K_{пор}$ или если $\alpha_{выч}$ превышает критический уровень значимости $\alpha_{кр}$; в противном случае нулевая гипотеза отвергается и принимается альтернативная гипотеза H_1 .

Если в действительности верна альтернативная гипотеза H_1 , но принята гипотеза H_0 , то допущена ошибка II рода. Вероятность ошибки II рода обозначается обычно как β . Одним из возможных критериев в случае сравнения двух выборок является *T*-критерий (*T*-критерий – критерий, позволяющий найти вероятность того, что оба средних значения в выборке относятся к одной и той же совокупности. Наиболее часто используется для проверки гипотезы: средние двух выборок относятся к одной и той же совокупности).

T-критерий сравнения средних в двух группах данных

Рассмотрим использование так называемых параметрических критериев оценки гипотез, т.е. критериев, основанных на предположении, что распределение признака подчиняется некоторому известному закону. Будем предполагать нормальный закон распределения величин ограниченной выборки.

Анализ данных включает вычисления описательных статистик в группах, например вычисления средних и стандартных отклонений. При наличии двух групп данных (уровни заболеваемости в двух населенных пунктах) естественно сравнить средние в этих группах. Пусть имеются среднее для первой группы и среднее для второй. Можно формально вычесть одно среднее из другого и по величине разности делать вывод о наличии эффекта; при этом определенным образом нормируется разность средних двух выборок.

T-критерий для независимых выборок

T-критерий является наиболее часто используемым методом, позволяющим выявить различие между средними двух выборок. Применение *T*-критерия имеет некоторые ограничения: предполагается, что данные в группах распределены нормально; предполагается, что величины дисперсий в группах отличаются незначительно.

Теоретически *T*-критерий можно применять и при небольших размерах выборок (10 и даже меньше). Более того, известно, что *T*-критерий устойчив к отклонению распределений от нормальности.

Предположение о нормальности выборок устанавливается с помощью соответствующих статистических критериев. Более осторожно следует подходить к различию дисперсий в двух группах данных. Равенство дисперсий оценивается на основании F -критерия Фишера (критерий Фишера применяется для проверки равенства дисперсий двух выборок).

Формальное определение Т-критерия

Гипотеза о равенстве двух средних значений исходит из предположения, что обе выборки берутся из нормально распределенной генеральной совокупности с математическим ожиданием x_0 и дисперсией σ_0 . Если это предположение справедливо, то оба средних значения соответствуют x_0 . Реально же выборочные средние будут отличаться. Задача заключается в выяснении того, находится ли их разность в пределах случайного разброса.

Для случая двух групп ($k = 2$) статистика критерия имеет вид:

$$T(n_1 + n_2 - 2) = \frac{\bar{x}_1(n_1) - \bar{x}_2(n_2)}{\tilde{s} \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}}, \quad (\text{уравн. 1.89})$$

где $\bar{x}_1(n_1)$ и $\bar{x}_2(n_2)$ – выборочные средние первой и второй выборок, $\tilde{s}^2$ – оценка дисперсии, составленная из оценок дисперсий для каждой группы данных:

$$\bar{x}_1(n_1) = \frac{\sum_{k=1}^{n_1} x_{1k}(n_1)}{n_1}, \quad (\text{уравн. 1.90})$$

$$\bar{x}_2(n_2) = \frac{\sum_{k=1}^{n_2} x_{2k}(n_2)}{n_2}, \quad (\text{уравн. 1.91})$$

$$\tilde{s}^2 = \frac{1}{n_1 + n_2 - 2} [(n_1 - 1)\bar{s}_1^2(n_1) + (n_2 - 1)\bar{s}_2^2(n_2)], \quad (\text{уравн. 1.92})$$

$$\bar{s}_j^2(n) = \frac{1}{n_j - 1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_j(n))^2, j = 1, 2. \quad (\text{уравн. 1.93})$$

Если предположить равенства средних в двух группах, то статистика $T(n_1 + n_2 - 2)$ имеет распределение Стьюдента с $(n_1 + n_2 - 2)$ степенями свободы.

Если обозначить найденное значение через $T(\alpha)$, то в случае $|T(n_1 + n_2 - 2)| > T(\alpha)$ гипотеза отвергается. В данном случае мы имеем дело с

двусторонним критерием, т.е. альтернативная гипотеза предполагает, что $\bar{x}_2$ может быть как больше, так и меньше $\bar{x}_1$.

Отметим, что большие по абсолютному значению статистики Стьюдента $\hat{T}(n_1 + n_2 - 2)$ могут возникать как из-за значимого различия средних, так и из-за значимого различия дисперсий сравниваемых групп.

Конкретная схема проверки гипотез зависит от условий задачи и специфики имеющейся информации: зависимости или независимости выборок, объемов выборок, равенстве (неравенстве) дисперсий, альтернативной изменчивости признака.

При проверке гипотезы о равенстве средних двух независимых выборок встречаются следующие случаи: выборки равной численности ($n_1 = n_2$) и дисперсии равны ($\sigma_1 = \sigma_2$); численности выборок не равны ($n_1 \neq n_2$), а дисперсии равны ($\sigma_1 = \sigma_2$); численности выборок не равны ($n_1 \neq n_2$), и дисперсии не равны ($\sigma_1 \neq \sigma_2$).

Приведенный выше случай соответствует предположению о равенстве дисперсий. Когда различия между $\bar{s}_1^2$ и $\bar{s}_2^2$ значительны, необходимо провести проверку равенства дисперсий. Если выяснится, что различия между дисперсиями существенны, то необходимо модифицировать схему проверки гипотезы о равенстве средних. Это объясняется тем, что в случае $\sigma_1 = \sigma_2$ распределение t -Стьюдента зависит только от числа степеней свободы. Если дисперсии не равны, это распределение зависит и от неизвестного отношения дисперсий σ_1 / σ_2 .

Поэтому общая ошибка вывода будет зависеть от сложного сочетания ошибки гипотезы о равенстве средних и ошибки гипотезы о равенстве дисперсий. В этом случае целесообразно применять критерий Стьюдента с измененным числом степеней свободы. В число степеней свободы вносится поправка, которая зависит от отношения дисперсий.

$$\nu = (n_1 + n_2 - 2) \left(0,5 + \frac{\bar{s}_1^2 \cdot \bar{s}_2^2}{\bar{s}_1^4 + \bar{s}_2^4} \right). \quad (\text{уравн. 1.94})$$

Когда $\overline{s}_1^2 = \overline{s}_2^2$, второй сомножитель равен единице, и число степеней свободы соответствует случаю равенства дисперсий. При значительном различии $\overline{s}_1^2$ и $\overline{s}_2^2$ дробь во второй скобке становится значительно меньше единицы, и второй сомножитель стремится к 0,5. Таким образом, общее число степеней свободы уменьшается в два раза. На практике, если $\sigma_1 \neq \sigma_2$ (при $n_1 = n_2$), то при определении критического значения $T(\alpha)$ число степеней свободы уменьшают в два раза. В остальном проверка гипотезы осуществляется так же, как при $\sigma_1 = \sigma_2$.

Если численности выборок не равны ($n_1 \neq n_2$) и дисперсии не равны ($\sigma_1 \neq \sigma_2$), то критерий также не распределен по Стьюденту. Установлено, что лучшим приближением к критическому значению критерия в этом случае является средняя взвешенная из двух обычных значений распределения Стьюдента при v_1 и v_2 степенях свободы. В качестве весов берут квадраты средних ошибок выборочных средних:

$$m_1^2 = \frac{\overline{s}_1^2}{n_1}, \quad (\text{уравн. 1.95})$$

$$m_2^2 = \frac{\overline{s}_2^2}{n_2}, \quad (\text{уравн. 1.96})$$

$$\overline{T}(\alpha) = \frac{T_1 m_1^2 + T_2 m_2^2}{m_1^2 + m_2^2}. \quad (\text{уравн. 1.97})$$

Проверка гипотез при альтернативной изменчивости признака

Рассмотрим случай проверки гипотез, когда изучаемый признак меняется таким образом, что наблюдаются лишь два взаимно исключающих значения: например, часть объектов обладают этим признаком, а другие – нет. Обсудим особенности проверки гипотез при подобной альтернативной изменчивости признака.

Пусть n' и n'' – численности объектов, обладающих и не обладающих, соответственно, каким-либо признаком; объем выборки $n = n' + n''$. Выборочная доля объектов, обладающая данным признаком, есть $p = n'/n$.

Дисперсия альтернативного признака равна $p \cdot q$, где $q = 1 - p$. Тогда средняя ошибка выборочной доли определяется как

$$m_p = \sqrt{\frac{p \cdot q}{n-1}}. \quad (\text{уравн. 1.98})$$

Если объем выборки достаточно большой, можно использовать формулу

$$m_p = \sqrt{\frac{p \cdot q}{n}}. \quad (\text{уравн. 1.99})$$

В предположении нормальности распределений при проверке гипотез о существенности разности долей p_1 и p_2 двух рассматриваемых гипотез можно использовать ту же общую схему, как и при проверке гипотез о средних. Значение критерия в этом случае определяется как

$$T = \frac{|p_1 - p_2|}{m_{1,2}}, \quad (\text{уравн. 1.100})$$

где $m_{1,2}$ – обобщенная ошибка двух выборочных долей

$$m_{1,2} = \sqrt{m_{p1}^2 + m_{p2}^2}. \quad (\text{уравн. 1.101})$$

Отметим, что нормальное приближение справедливо лишь при соблюдении следующих условий: объем выборки достаточно велик; значения p не близки к нулю либо к единице ($0,2 < p < 0,8$).

Если эти условия не выполняются, распределения выборочных долей отклоняются от нормального, и использовать T -критерий нельзя.

В этом случае возможно применение -преобразования Фишера, который показал, что значения φ , выраженные в радианах, имеют распределение, близкое к нормальному. Причем φ связано с долей объектов в генеральной совокупности, обладающих данным признаком P , следующим образом:

$$\varphi = 2 \frac{\pi}{180} \arcsin \sqrt{P}. \quad (\text{уравн. 1.102})$$

С использованием этого выражения значения p_1 и p_2 преобразуются в φ_1 и φ_2 , и к их разности применяется приведенная ниже схема проверки гипотез:

$$m_{\varphi 1,2} = \sqrt{m_{\varphi 1}^2 + m_{\varphi 2}^2} = \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}} = \sqrt{\frac{n_1+n_2}{n_1 \cdot n_2}}, \quad (\text{уравн. 1.103})$$

$$T = \frac{|\varphi_1 - \varphi_2|}{m_{\varphi 1,2}} = |\varphi_1 - \varphi_2| \cdot \sqrt{\frac{n_1 \cdot n_2}{n_1 + n_2}}. \quad (\text{уравн. 1.104})$$

Полученное значение критерия T сопоставляется с критическим значением $T(\alpha)$, на основании чего делается вывод о нулевой гипотезе.

Метод φ -преобразования наиболее эффективен при значениях p , близких к нулю или к единице, но он может быть использован и при любых, в том числе и при срединных, значениях $0,2 < p < 0,8$.

Отметим, что разность между φ_1 и φ_2 можно оценить и с использованием критерия Фишера:

$$F = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2)^2}{m_{\varphi 1,2}} = (\varphi_1 - \varphi_2)^2 \cdot \frac{n_1 \cdot n_2}{n_1 + n_2}. \quad (\text{уравн. 1.105})$$

В медицинских исследованиях зачастую необходимо сделать вывод о существенности влияния какого-либо фактора на здоровье человека по результатам оценки целого ряда медицинских показателей. Причем отклонение от нормы (наличие одного определенного вида заболевания) характеризуется единицей, норма – нулем. Поскольку у одного человека возможно наличие целого ряда отклонений (заболеваний), в качестве характеристики отклонений может выступать целое число (сумма определенного числа единиц).

В этом случае, несмотря на альтернативную изменчивость признака по каждому возможному виду отклонения, в целом результирующий показатель не может выступать как альтернативный (индикаторный). И в случае, если выполняются условия, приведенные выше, возможно использование стандартной схемы проверки гипотез.

В качестве примера проверки гипотезы о равенстве средних двух независимых выборок при различных дисперсиях и численностей выборок ($\sigma_1 \neq \sigma_2$, $n_1 \neq n_2$) рассмотрим два варианта подхода к решению реально поставленной задачи по обследованию здоровья детей в группах 1 и 2 [37].

Пусть возраст детей в обследованных двух группах составлял 10 лет. Анализируемый показатель здоровья – общее одинаковое число заболеваний X_i , установленных у каждого ребенка.

Первый вариант: в анализируемый ансамбль показателя здоровья включены все обследованные пациенты, как больные, так и здоровые (О-заболеваний) – смешанная выборка.

В группе 1 численность обследованных детей $n_1 = 15$, в том числе здоровых (О-заболеваний) – 4 ребенка. Среднее число поставленных диагнозов $\bar{X}_1 = 2,2$.

В группе 2 численность обследованных детей $n_2 = 22$, в том числе здоровых (О-заболеваний) – 5 детей. Среднее число поставленных диагнозов $\bar{X}_2 = 1,818$.

Следует оценить существенность разности средних по количеству диагнозов в группах 1 и 2. Тест на нормальность для обеих групп данных положительный. Выборочные стандартные отклонения равны, соответственно, $s_2 = 1,468$.

Обобщенная ошибка выборочных средних равна:

$$m_1^2 = \frac{\bar{s}_1^2}{n_1} = 0,193, \quad (\text{уравн. 1.106})$$

$$m_2^2 = \frac{\bar{s}_2^2}{n_2} = 0,098, \quad (\text{уравн. 1.107})$$

$$m_{1,2} = \sqrt{m_1^2 + m_2^2} = 0,54. \quad (\text{уравн. 1.108})$$

Фактическое значение критерия

$$t = \frac{|x_1 - \varphi x_2|}{m_{1,2}} = 0,70. \quad (\text{уравн. 1.109})$$

Вычислим фактическое значение критерия как среднее взвешенное из двух значений при соответствующих степенях свободы. При $\alpha=0,05$ получаем $T_1=2,145$ для числа степеней свободы $\nu_1=n_1 - 1=14$; $T_2=2,080$ для $\nu_2 = n_2 - 1=21$.

$$\bar{T}(0,05) = (t_1 m_1^2 + t_2 m_2^2) / (m_1^2 + m_2^2) = 2,124. \quad (\text{уравн. 1.110})$$

Таким образом, $T=0,70 < \overline{t(0,05)} = 2,124$, т.е. нулевая гипотеза о равенстве средних не отвергается

Второй вариант: анализируемый ансамбль показателя здоровья состоит только из больных детей, т.е. здоровые дети из статистической обработки исключены. Тогда $n_1=(15-4)=11$; $n_2=(22-5)=17$. В этом случае среднее число поставленных диагнозов:

$$\bar{X} = \frac{\sum_i X_i n_i}{\sum_i n_i}, \quad (\text{уравн. 1.111})$$

где X_i – одинаковое число диагнозов, поставленных каждому из n_i пациентов; n_i – число пациентов, каждому из которых поставлено одинаковое число диагнозов, равное X_i , $\sum_i n_i = n$ – общее число обследованных больных детей.

Дисперсия:

$$S^2 = \frac{\sum_i (X_i - \bar{X})^2 \cdot n_i}{\sum_i n_i} = \sum_i (X_i - \bar{X})^2 \cdot P_i, \quad (\text{уравн. 1.112})$$

где P_i – вероятность установления X_i диагнозов для каждого из n_i пациентов.

В этом случае, используя для расчета уравнения 1.106–1.112, получим: для больных детей из группы 1 $\bar{X}_1 = 3,0$; $S_1 = 1,34$; $m_1 = 0,163$; для больных детей из группы 2 $\bar{X}_2 = 2,35$; $S_2 = 1,09$; $m_2 = 0,07$; а также

$$m_{1,2} = \sqrt{m_1^2 + m_2^2} = \sqrt{0,163 + 0,07} = 0,48; \quad (\text{уравн. 1.113})$$

$$T = \frac{|\bar{X}_1 - \bar{X}_2|}{m_{1,2}} = \frac{3 - 2,35}{0,48} = 1,35; \quad (\text{уравн. 1.114})$$

$$\bar{T}(0,05) = \frac{t_1 m_1^2 + t_2 m_2^2}{m_1^2 + m_2^2} = 2,217 \quad (\text{уравн. 1.115})$$

при $T_1(\alpha = 0,05) = 2,23$ при числе степеней свободы $n_1 - 1 = 10$, при $T_2(\alpha = 0,05) = 2,12$ при числе степеней свободы $n_2 - 1 = 16$.

Таким образом, $(T = 1,35) < [\bar{T}(0,05) = 2,217]$, т.е. нулевая гипотеза о равенстве средних и в этом случае не отвергается, несмотря на то, что фактическое значение критерия для больных детей $T = 1,35$ возросло почти в два раза по сравнению с фактическим критерием для смешанной группы детей ($T = 0,70$).

Возможна ли ситуация, когда при исключении из ансамбля здоровых детей гипотеза о совпадении средних не подтвердится? Ответ на этот вопрос можно получить из рассмотрения и анализа наглядных графических представлений на рис. 1.14 и данных табл. 1.

Рис. 1.14. Зависимость плотности вероятности $P(x)$ от числа заболеваний x , наблюдаемых у одного пациента: а – смешанная выборка, б – выборка «только больные»; о – группа 1, + – группа 2 (данные обследований); сплошная линия — (группа 1), пунктирная – (группа 2) – аппроксимирующие кривые Гаусса (нормальное распределение)

Таблица 1

Характеристики статистических ансамблей двух групп

Тип выборки	Показатели							
	n_1	n_2	$\bar{X}_1$	$\bar{X}_2$	S_1	S_2	t	$t(0,05)$
Смешанная (больные и здоровые)	15	22	2,2	1,82	1,7	1,47	0,70	2,12
Только больные	11	17	3,0	2,35	1,34	1,09	1,35	2,17

Положительный тест на нормальность для смешанной группы не исключает реально необъяснимую область отрицательных значений числа заболеваний, имеющих положительную вероятность ($X_i < 0$) для смешанной выборки, большой разброс экспериментальных данных (до 250 %) относительно аппроксимирующей функции Гаусса, завышенную по отношению к группе больных дисперсию, среднее значение, тяготеющее к большим значениям вероятности наблюдения здоровых в смешанной группе (рис. 1.14а). С увеличением числа здоровых в смешанной группе среднее значение и дисперсия все больше могут «забывать» о больных и переставать быть их полноценными характеристиками.

Характеристики смешанных групп будут близки к характеристикам группы больных при условии, когда число здоровых не превышает 10 % от общего числа пациентов. Следует также отметить (рис. 1.10), что при исключении здоровых из статистического анализа различия двух множеств становятся более явными.

Сравнение дисперсий двух нормальных генеральных совокупностей

В качестве нулевой гипотезы обычно выдвигают гипотезу о равенстве дисперсий. В методике проверки гипотез в качестве критерия используется статистика F отношения двух исправленных выборочных дисперсий S_1^2 и S_2^2 с

$(n-1)$ и $(m-1)$ степенями свободы, где n и m – объемы выборок исследуемой (1) и контрольной (2) групп (F -критерий Фишера).

Методика проверки гипотез с помощью критерия Фишера точно такая же, как и для других критериев: вводятся нулевая и конкурирующая гипотезы, по уровню значимости строятся область принятия гипотезы и критическая область (значения критических точек получаем из таблиц), рассчитывается наблюдаемое значение критерия, проверяется принадлежность полученного значения критерия области принятия гипотезы, и в зависимости от этого нулевая гипотеза принимается либо отвергается в пользу конкурирующей.

Статистическая оценка рисков здоровью

Рассмотрим донозологическое состояние здоровья как совокупность характеристик, находящихся в «переходной зоне» признаков между состояниями «практически здоров» и «болен». На практике считается, что состояние «практически здоров» соответствует случаю, когда используемые показатели здоровья не выходят за пределы установленных медицинских нормативов и распределены по нормальному закону, а состояние «болен» соответствует случаю, когда эти показатели находятся за их пределами [38].

При таком рассмотрении состояние «предболезнь» (донозологическое состояние) следует искать в отличии характера распределения показателей состояния здоровья в пределах нормативного гигиенического интервала по сравнению с некоторым контрольным (нормативным) распределением.

В случае изучения влияния на состояние здоровья негативных воздействий среды обитания следует к группе сравнения (контрольной) отнести статистически однородную группу пациентов, которая практически одинакова по всем основным характеристикам сравнения с исследуемой группой, за исключением одного условия: можно пренебречь действием на нее негативных факторов, влияние которых на первую группу изучается. В этом случае предпочтительным является рассмотрение характера распределений

количественных характеристик адаптационных резервов организма как наиболее чувствительных к внешним воздействиям.

Из клинической практики следует, что если медицинский показатель состояния здоровья пациента находится в пределах интервала нормы, то у клинициста нет оснований отказаться от диагноза «практически здоров» (по данному показателю) для обследуемого пациента. Однако же с учетом вышесказанного это условие не является достаточным для подобного диагноза. При наличии статистически значимого несовпадения сравниваемых двух статистических множеств частотных распределений данного показателя такое заключение становится уже необоснованным, и пациента следует отнести к группе риска, находящейся в донозологическом состоянии. При этом предполагается, что сравнение проводится для «смешанных» реальных случайных выборок пациентов, в которых находятся «практически здоровые» и «больные».

Следует отметить, что характеристики группы донозологического состояния могут реально выходить за пределы гигиенического норматива, так как возможно одновременное существование пациентов с хронической патологией и хронической донозологией и неизвестно, когда со временем хроническая донозоология переходит в хроническую патологию. Для однозначности будем считать нозологическим (патологическим) признаком показатель здоровья, выходящий за пределы нормы.

Может также представлять практический интерес проведение подобного сравнительного анализа как «смешанной» случайной выборки пациентов, так и выборки «практически здоровых» пациентов (болезни не обнаружены) с контрольной группой сравнения «нормативно здоровых».

Эта группа «нормативно здоровых» соответствует «нормативному» частотному распределению показателя распределения Гаусса со средним значением L_n , расположенным в середине интервала нормы $L_n = (L_{min} + L_{max})/2$, а среднее квадратическое отклонение σ_n таково, что интервал, равный

$\pm 2\sigma_n$, соответствует размеру нормативного гигиенического интервала: $2\sigma_n = (L_n - L_{min}) = (L_{max} - L_n)$. «Нормативное» распределение показателя является нормальным распределением, симметричным относительно середины нормативного интервала, в котором находятся 95 % наблюдаемых «нормативно здоровых». Подобные сравнения могут быть полезными для выявления хронических донозологических и патологических состояний.

Изложенный здесь статистический подход к экспериментальной оценке рисков здоровью населения основан на реальных медико-экологических исследованиях. Они проводятся специалистами при углубленных клинико-лабораторных обследованиях состояния здоровья населения (представительной выборки), проживающего в районе возможного влияния экологически потенциально опасного объекта. Измеряются также параметры качества окружающей среды (вода, воздух, почва, продукты питания) для оценки приоритетных токсикантов.

Сбор данных выполняется в объеме, обеспечивающем представительность, полноту и надежность исходной информации. Методология предполагает проверку статистических гипотез о совпадении статистических множеств частотных распределений медицинских показателей состояния здоровья двух групп населения, одна из которых относится к населению, подвергаемому негативному воздействию токсикантов, а другая – к населению, проживающему в контрольном районе.

Риски для здоровья оцениваются на патологическом и/или донозологическом уровнях состояния здоровья по дополнительно наблюдаемой относительно контрольного района вероятности патологических и/или донозологических состояний в первой группе пациентов. При этом при возможности вычитается «фоновый уровень»; фоновый уровень состояния здоровья оценивается до начала эксплуатации объекта.

Для использования критериев совпадения статистических множеств, развитых для нормально распределенных случайных величин, реально

возможные частотные распределения показателей состояния здоровья, отличные от нормального (асимметричные, одномодальные и полимодальные), сводятся к нормальному специальными приемами – представлениями в виде логарифмически нормальных распределений и в виде ряда из функций Гаусса.

Выше введен статистический критерий донозологического и патологического состояний здоровья – статистически значимое смещение частотного распределения биохимических (донозологических) показателей в первой группе пациентов относительно контрольной в пределах или вне границ нормы соответственно.

Риск «донозологического» здоровья оценивается по величине площади частотного распределения показателя первой группы, отличной от области, общей для обеих статистических групп. Риск патологического состояния здоровья оценивается по величине площади, выходящей за пределы нормы и отличной от области, общей для обеих статистических групп.

Подобный подход справедлив для любых видов воздействия факторов окружающей среды, любых местностей проживания и возрастов населения. Он позволяет оценивать риск здоровью в режиме реального времени, как «фоновый», так и в процессе эксплуатации объекта, по результатам медико-экологического мониторинга. Идентификация приоритетных токсикантов и источников их действия основана на результатах прицельных экологических обследований окружающей среды и анализе их содержания и/или продуктов их биологической трансформации в биопробах.

Апробация этой методологии проведена на примере химического предприятия [37, 39]. Изучались «фоновые» риски здоровью населения по результатам медико-экологического мониторинга, проводимого в течение пяти лет до пуска объекта в эксплуатацию. Риски здоровью по отношению к контрольному району (группа 1) на патологическом уровне не наблюдались. Установлены «фоновые» риски здоровью на донозологическом уровне для населения, проживающего вблизи строящегося объекта (группа 2).

Это предположительно связано с преимущественным хроническим воздействием приоритетных для этого места токсикантов – хлоридов и полифосфатов. Величина донозологического риска по иммунологическим характеристикам оценивается на уровне $\sim 0,60\text{--}0,75$. Результаты экспериментальной оценки риска здоровью могут быть весьма полезны для проверки адекватности расчетных моделей (см. рис. 1.15).

Как отмечалось выше, такие оценки могут, во-первых, позволить выявить показатели здоровья, пригодные для последующей обработки данных в рамках кинетической теории старения, а во-вторых, использоваться самостоятельно для оценки рисков индивидуального здоровья и малых групп населения.

Рис. 1.15. Частотное распределение P (л/г) концентрации L (г/л) иммуноглобулина M в крови пациентов группы 1 старше 13 лет (53 чел., № 1) и группы 2 (55 чел., № 2). Линиями обозначены соответствующие аппроксимации распределений функциями Гаусса (нормальное распределение): $\sigma_1 = 0,35$ г/л, $\langle L_1 \rangle = 2,05$ г/л; $\sigma_2 = 0,45$ г/л, $\langle L_2 \rangle = 1,15$ г/л. Вертикальными линиями обозначены границы нормы для пациентов старше 13 лет: 0,6–2,5 г/л – мужчины; 0,7–2,8 г/л – женщины

1.2.4. Методическое обеспечение и примеры оценки экологических рисков здоровью населения на основе кинетической теории старения живых систем

1.2.4.1. Метод итерационной конгруэнтности поиска параметров кинетической математической модели старения живых систем

Ниже представлен разработанный нами [4] метод итерационной конгруэнтности поиска параметров кинетической математической модели старения живых систем по данным медицинской статистики. Проиллюстрированы его возможности для описания функций риска смертности, обусловленных воздействием факторов окружающей среды. Сформулирована концепция прогнозирования экологических рисков на основе рассмотренной выше (гл. 1.3) кинетической теории старения живых систем.

Основными факторами, определяющими старение БС, являются: генетический фактор, факторы влияния ОС и рекомбинации разрушенных в результате воздействия внешних факторов связей БС. Воздействие факторов ОС на БС учитывается параметром μ влияния ОС в кинетике деструкции БС с момента ее рождения:

$$\partial D / \partial \tau = (1 - D)^{m_d} \cdot \exp[(\mu(\tau)) / (1 - \theta D)] - \alpha \cdot D^{m_r} \cdot (1 - D)^{m_{em}} \cdot \exp(-\tau / \tau_r),$$

(уравн. 1.116)

где D – степень повреждения (риск) БС, ($0 \leq D \leq 1$); $\alpha = K_r / K_d = K_{0r} / K_{0d}$ – отношение констант скоростей реакций (K_r) рекомбинации разрушенных связей и их деструкции (K_d); μ – безразмерный параметр воздействия ОС; $K_{d,r} = K_{0d,0r} \cdot \exp(-E_g)$; t – астрономическое время; $\tau = \left(\frac{K_d}{n_0}\right) \cdot$ – биологическое (безразмерное) время; n_0 – начальная концентрация функциональных связей БС – начальное количество физических связей в единице объема БС, определяющих степень старения БС; $E_g = E_a / kT$ – энергетический безразмерный параметр, определяющий уровень генетической устойчивости,

E_a – энергия активации связи, k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура БС; $m_d, m_r > 0$ – показатели реакций деструкции и рекомбинации связей соответственно; $m_{em} > 0$ – показатель учитывающего истощение адаптационных резервов БС с увеличением степени старения D , θ – коэффициент, учитывающий замедление интенсивности смертности долгожителей.

Безотносительно к общим возможностям рассматриваемого подхода остановимся на частном случае и рассмотрим вариант, когда $\tau_r = \infty$, исходя из реальных условий, когда значение параметра воздействия ОС больше критического $\mu > \mu_{cr}$.

Общепринятым обобщенным показателем здоровья человека является продолжительность его жизни, которую фактически можно установить только после смерти. Однако, зная параметры кинетики уравнения 1.116, можно прогнозировать продолжительность жизни БС τ_{mb} , решая уравнение:

$$\int_0^{\tau_{mb}} (dD/d\tau) d\tau = 1, \quad (\text{уравн. 1.117})$$

откуда рассчитывается «астрономическая» продолжительность жизни $t_{mb} = \tau_{mb}/(K_d/n_0)$.

Величину (K_d/n_0) можно отыскать как константу для рассматриваемой популяции по известным значениям для популяции средней продолжительности жизни, найденным в астрономическом и биологическом времени.

Кинетическое уравнение 1.116 позволяет получить принятые в геронтологии [16-17] функции риска:

$D(\tau) = \int_0^{\tau} (dD/d\tau) d\tau$ – риск смертности или кумулятивная функция распределения смертности;

$S(\tau) = (1 - D(\tau))$ – вероятность прожить время τ или кумулятивная функция дожития;

$dD/d\tau$ – плотность вероятности риска смертности;

$(dD/d\tau)/(1 - D(\tau))$ – функцию интенсивности смертности или функция риска.

Для расчета этих функций необходимы исходные экспериментальные статистические данные в наибольшем диапазоне времен наблюдения для хотя бы одной из перечисленных функций.

Определение параметров μ , θ , m_d , m_r , m_{em} кинетической модели (уравнение 1.116) требует использования численных методов решения, так как аналитические решения в общем случае невозможны. Учитывая ограниченность исходных экспериментальных данных, поиск параметров модели неоднозначен.

Для выбора их наиболее вероятных значений нами был разработан метод итерационной конгруэнтности. Он состоит из трех этапов.

Первый этап – предварительная оценка параметров модели исходя из известных экспериментальных данных и вида кинетических уравнений. Экспериментальные данные наиболее часто представляются в виде статистических распределений функций интенсивности смертности, риска смертности или функции дожития. Из анализа уравнения 1.116 для интенсивности смертности (в принятых безразмерных координатах) следует:

$$\mu = \ln I_0 \text{ при } \tau = 0; \quad (\text{уравн. 1.118})$$

$$\theta = (1 - \mu/\ln I_m), \text{ при } \tau = \tau_{mb}, m_d = 1, m_{em} > 0; \quad (\text{уравн. 1.119})$$

$$\theta = \left[(1 - D)^{m_d - 1} \exp\left(\frac{\mu}{1 - \theta D}\right) - I_\tau \right] / D^{m_r} (1 - D)^{m_{em} - 1}; \quad (\text{уравн. 1.120})$$

где I_0 , I_τ , I_m – начальное ($\tau = 0$), текущее (τ) и максимальное ($\tau = \tau_{mb}$) значения интенсивности смертности соответственно.

Показатели биохимических реакций m_d , m_r , m_{em} выбираем в пределах наиболее вероятного их изменения [33] от 0 до 3. Значения параметров, рассчитанных по уравнениям 1.118–1.120, исходя из экспериментальных данных, являются их первым приближением.

Второй этап – поиск параметров для построения номограмм кинетических функций при вариации параметров модели в области их наиболее вероятных значений (рис. 1.16) по специально разработанной программе.

Третий этап – окончательный выбор параметров, идентификация экспериментальных кинетических кривых методом итерационной конгруэнтности, т.е. наилучшего совпадения экспериментальных и расчетных функций при их наложении и выбор параметров таких расчетных вариантов в качестве окончательного приближения.

При выбранных параметрах модели критические значения μ_{cr} , D_{cr} определяется по методу [32] из условий:

$$dD/d\tau = 0; \quad (\text{уравн. 1.121})$$

$$d(dD/d\tau)/dD = 0. \quad (\text{уравн. 1.122})$$

Рассматривая наиболее часто встречающийся случай, когда $m_d = 1$, $m_{em} \geq 1$, из условий уравнений 1.121 и 1.122 получим аналитические выражения, позволяющие отыскать критическое значение параметра μ_{cr} и D_{cr} :

$$\mu_{cr} = (1 - \theta D_{cr}) \ln(\varpi D_{cr} (1 - D_{cr})^{m_{em}-1}); \quad (\text{уравн. 1.123})$$

$$\frac{\theta(1-D_{cr}) \ln(\varpi D_{cr}^{m_r} (1-D_{cr})^{m_{em}-1})}{(1-\theta D_{cr})} - m_r \frac{1-D_{cr}}{D_{cr}} + m_{em} = 1 \quad (\text{уравн. 1.124})$$

В номограммах, представленных в Приложении 1.1, приведены кинетические кривые, рассчитанные для вероятных значений кинетических параметров.

1.2.4.2. Примеры оценки экологических рисков здоровью населения на основе кинетической теории старения живых систем

Метод итерационной конгруэнтности позволяет отыскивать параметры кинетической математической модели старения для животных и человека и прогнозировать риски смертности и продолжительности жизни в зависимости от негативных факторов влияния окружающей среды.

В Приложении на рисунках П1–П8, в качестве иллюстрации представлены некоторые из полученных нами результатов.

Наибольшую чувствительность функции риска имеют к изменению параметра μ (Приложение, рис. П3, П2, П3, П7). Параметр $\mu(\tau) = \sum_i \mu_i(\tau)$, где $\mu_i(\tau)$ в общем случае отражает влияние i -х факторов воздействия различной природы, интенсивности, длительности в зависимости от времени τ , к каждому из которых БС может обладать различной чувствительностью.

Так, например, зависимость параметра μ кинетики риска смертности мышей при хроническом радиационном облучении (рис. 1.17) от интенсивности облучения линейна в интервале мощностей доз облучения P от 12 до 56 сГр/сут ($\mu = 5 + 8,2 \cdot 10^{-3}P$) с точностью не ниже $\pm 0,8 \%$, при этом μ не зависит от возраста, а после острого облучения (рис. 1.18) параметр изменяется в течение всего последующего времени жизни. После снятия «нагрузки» организм восстанавливается; кинетические параметры модели старения населения различны для различных областей проживания населения (рис. 1.16.).

Это предполагает, а медицинская статистика подтверждает, что каждое место нахождения БС, характер воздействия окружающей среды создают характерные для данной БС биологические отклики, и именно идентификация факторов влияния может представлять основную задачу поиска факторов риска.

Рис. 1.16. Сравнение результатов расчетов интенсивности смертности по кинетической теории с экспериментальными данными смертности мужского населения России, Японии и Швеции. Значения функции по ординате уменьшены в 10^3 раз. Точками обозначены экспериментальные значения интенсивности смертности для России и Японии.

Кривая 1 является аппроксимацией статистических данных интенсивности смертности для мужского населения России (данные 1994 г.) кусочно-гладкой функцией. Кинетическое уравнение с подобранными методом итерационной конгруэнтности параметрами старения имеет вид:

$$\partial D / \partial \tau = (1 - D) \cdot \exp(2,6 / (1 - \theta D)) - \varepsilon \cdot D \cdot (1 - D)^3, \quad \text{значения}$$

параметров ε и θ изменяли во времени в следующих пределах: $90,9 \leq \varepsilon \leq 121,4$; $0,06 \leq \theta \leq 0,4$.

Кривая 2 соответствует интенсивности смертности мужского населения Японии в 1991 г. Кинетическое уравнение старения имеет вид:

$$\partial D / \partial \tau = (1 - D) \cdot \exp(1,4 / (1 - 0,6D)) - 31,4 \cdot D \cdot (1 - D)^3.$$

Кривая 3 является кривой интенсивности смертности, рассчитанной по методу конгруэнтности на основании статистических медицинских данных смертности мужского населения Швеции в 1900 г. Кинетическое уравнение старения имеет вид:

$$\partial D / \partial \tau = (1 - D) \cdot \exp(1,61 / (1 - 0,49D)) - 41,1 \cdot D \cdot (1 - D)^3.$$

Рис. 1.17. Зависимость интенсивности смертности лабораторных мышей от времени при хроническом радиационном облучении. Значения функции по ординате уменьшены в 10^6 раз

Таблица 2

Подобранные методом итерационной конгруэнтности параметры уравнения $\partial D / \partial \tau = (1 - D) \exp[\mu / (1 - \theta D)] - \alpha D (1 - D)^2$ при хроническом радиационном облучении мышей

№ кривой	Мощность дозы, сГр/сут	μ	θ	α	t_{mb} , сут	τ_{mb}
1	0,03	4,82	0,52	420	1200	$6 \cdot 10^{-3}$
2	12	5,12	0,54	420	800	$4 \cdot 10^{-3}$
3	24	5,24	0,56	420	800	$4 \cdot 10^{-3}$
4	32	5,26	0,57	420	600	$3 \cdot 10^{-3}$
5	56	5,45	0,8	420	400	$2 \cdot 10^{-3}$

Рис. 1.18а. Зависимость интенсивности смертности лабораторных мышей от времени после острого радиационного облучения. Значения функции по ординате уменьшены в 10^7 раз.

Для контрольной группы мышей (рис. 1.18а, кривая 1) кинетическое уравнение с подобранными методом итерационной конгруэнтности параметрами старения имеет вид: $\partial D / \partial \tau = (1 - D) \cdot \exp(5,2 / (1 - 0,52D)) - 100 \cdot D \cdot (1 - D)^2$.

Для случаев острого облучения проводилась аппроксимация μ кусочно-гладкой функцией; для дозы 3Гр (кривая 2) снижение параметра внешнего воздействия μ от 5,285 до 5,276 проводилось каждые 100 суток (рис. 1.18б), для дозы 5 Гр (кривая 3) – с 5,90 до 5,57 каждые 50 суток (рис. 1.18в).

Таблица 3

Параметры модели для случая острого облучения мышей

№ кривой	Доза, Гр	μ	Θ	α
1	0	5,2	0,52	100
2	3	5,285 $\rightarrow$ 5,276	0,52	100

Продолжение Таблицы 3

3	5	5,90 → 5,57	0,52	100
Примечание. Шаг изменения по времени параметра внешнего воздействия μ представлен на рис. 1.18б (для дозы 3Гр) и 1.18в (для дозы 5Гр).

Рис. 1.18. Зависимость $\mu(t)$ для дозы 3Гр (б) и 5 Гр (в)

Функция смертности для данного набора параметров представлена на рис. 1.18г.

Рис. 1.18г. Функции смертности при указанных в табл. 3 параметрах

Ниже разобраны примеры решения задач по определению параметров кинетической модели исходя из экспериментальных данных при помощи номограмм.

Задача 1. Дано: в эксперименте получены значения интенсивности смертности $\frac{\partial D}{\partial \tau} / (1 - D)$ для различных значений τ :

Интенсивность смертности	$5 \cdot 10^{-1}$	$5,5 \cdot 10^{-1}$	$8,5 \cdot 10^{-1}$	1,3	4	$15 \cdot 10$	20
τ	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9

Выбрано кинетическое уравнение:

$$\partial D / \partial \tau = (1 - D) \cdot \exp[(\mu(\tau)) / (1 - 0,5D)] - \varkappa \cdot D \cdot (1 - D)^2.$$

По результатам предварительных оценок обработки данных ориентировочные значения μ и $\varkappa$ следует искать в районах значений 1,5-1,6 и 30-40 соответственно.

Найти уточненные значения этих параметров, используя номограммы метода итерационной конгруэнтности.

Решение: Находим номограммы зависимости интенсивности смертности от значений τ для соответствующего кинетического уравнения (рис. П5). Наносим экспериментальные результаты на эти графики и выбираем конгруэнтную кривую № 1. Эта кривая соответствует значениям $\mu=1,58$, $\varkappa=40$.

Задача 2. Дано: в эксперименте получены значения функции смертности $D(\tau)$ для различных значений τ :

$D(\tau)$	02	0,24	0,3	0,35	0,4	0,6	0,85	0,95
τ	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8

Выбрано кинетическое уравнение:

$$\partial D / \partial \tau = (1 - D) \cdot \exp[(1,6 / (1 - \theta D))] - \kappa \cdot D \cdot (1 - D)^2.$$

Найти значения θ и $\varkappa$, если их ориентировочные значения следует искать в области значений от 0,4 до 0,7 и от 35 до 45 соответственно.

Решение: Находим номограммы зависимости функции смертности от значений τ для соответствующего кинетического уравнения (рис. П4). Наносим экспериментальные результаты на эти графики и выбираем конгруэнтную кривую № 3. Эта кривая соответствует значениям $\theta=0,5$, $\alpha=40$.

Задача 3. *Дано:* в эксперименте получены значения функции дожития $1 - D(\tau)$ для различных значений τ :

$1 - D$	1	0,82	0,75	0,65	0,58	0,39	0,12	0,01	0,01	0
τ	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9

Выбрано кинетическое уравнение: $\partial D / \partial \tau = (1 - D) \cdot \exp[(1,6/(1 - 0,5D))] - \alpha \cdot D \cdot (1 - D)^2$. Найти значение α , если ориентировочно оно находится в интервале $[30, 50]$.

Решение: находим номограммы зависимости функции дожития от значений τ для соответствующего кинетического уравнения (рис. П3). Наносим экспериментальные результаты на эти графики и выбираем конгруэнтную кривую № 1. Эта кривая соответствует значению $\alpha=38$.

Задача 4. *Дано:* в эксперименте получены значения интенсивности смертности $\frac{\partial D}{\partial \tau} / (1 - D)$ для различных значений τ :

Интенсивность смертности	$5,5 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-1}$	$4 \cdot 10^{-1}$	$7 \cdot 10^{-1}$	$9 \cdot 10^{-1}$	3	6
τ	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8

Выбрано кинетическое уравнение:

$$\partial D / \partial \tau = (1 - D) \cdot \exp[(1,6/(1 - \theta D))] - 24 \cdot D \cdot (1 - D)^2.$$

Найти значение θ , если ориентировочно θ лежит в интервале $(0,4; 0,6)$.

Решение: находим номограммы зависимости интенсивности смертности от значений τ для соответствующего кинетического уравнения (рис. П2). Наносим экспериментальные результаты на эти графики и выбираем конгруэнтную кривую № 2. Эта кривая соответствует значению $\theta=0,5$.

Кинетическая теория старения живых систем вводит количественную функциональную связь между факторами влияния окружающей среды и показателями здоровья населения в виде кинетического уравнения «брутто-кинетики» процесса старения. Зависимость функций риска биологической системы от параметра μ позволяет установить уровень экологического воздействия μ_3 , соблюдение которого обеспечит приемлемый экологический риск здоровью населения.

Значение уровня экологического воздействия целесообразно задавать по отношению к значению μ_{cr} коэффициентом критичности $k_s = \mu_3/\mu_{cr}$: при $k_s = 1$ риск экологического воздействия будет минимальным, с увеличением коэффициента критичности риски здоровью возрастают.

Значения риска здоровью при постоянной интенсивности негативного воздействия окружающей среды в течение жизни биологической системы не постоянны – риск возрастает с увеличением возраста биологической системы.

Возможность численной оценки единым комплексным параметром μ_3 экологического риска здоровью населения, живущего на определенной территории, подверженному комплексному влиянию факторов окружающей среды различной природы, основана на том, что факторы влияния вызывают, по-видимому, однотипные биохимические реакции в БС и ее системах и, как следствие, однотипную интегральную «брутто-кинетику» старения.

Этим, в частности, можно объяснить тот факт, что различные виды химических веществ и их огромное многообразие вызывают при длительном воздействии, как правило, однотипные, не специфические, гораздо более ограниченные по числу (на много порядков) симптомы и синдромы заболеваний [40].

При расчете комплексного μ_3 его составляющие различной природы μ_i необходимо учитывать с весовыми коэффициентами g_i , отражающими различную биологическую эффективность таких факторов влияния, подобно расчетам суммарного биологического эффекта от радиационного излучения различной природы и энергии [41]: $\mu_3 = \sum_i g_i \mu_i$.

Составляющие обобщенного параметра экологического воздействия μ_i можно в первом приближении условно разделить на компоненты, соответствующие природе факторов влияния, – параметры физического, химического, биологического и социального происхождения. Интенсивность внешнего воздействия, определяющая первые три фактора, может быть физически измерена, т.е. выражена в количественном виде. Каждый из них отражает биологический отклик БС при ее адаптации к ОС, обладающей перечисленными выше характеристиками влияния.

ПРИЛОЖЕНИЕ

**НОМОГРАММЫ КИНЕТИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ, РАССЧИТАННЫХ
ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ КИНЕТИЧЕСКОЙ
МОДЕЛИ СТАРЕНИЯ**

П.1.Изменение параметра μ

№ кривой	1	2	3	4	5
Значение μ_i	1,56	1,58	1,6	1,62	1,64

Рис. П.1. Номограммы для $\mu \in [1, 56, 1, 64]$ $(\partial D / \partial \tau)_i = (1 - D) \cdot$

$$\exp\left(\frac{\mu_i}{1-0,5D}\right) - 40 \cdot D \cdot (1 - D)^3$$

П.2.Изменение параметра θ

№ кривой	1	2		3	4	5
Значение θ_i	0,4	0,45		0,5	0,55	0,6

Рис. П.2. Номограммы для $\theta \in [0,4,0,6] \left(\frac{\partial D}{\partial \tau} \right)_i = (1 - D) \cdot \exp \left(\frac{1,6}{1 - \theta_i D} \right) - 24 \cdot D \cdot (1 - D)^2$

П.3.Изменение параметра $\mathfrak{ae}$

№ кривой	1	2	3	4	5
Значение $\mathfrak{ae}_i$	38	39	40	41	42

Рис. П. 3. Номограммы для $\mathfrak{ae} \in [38, 42]$ $\left(\frac{\partial D}{\partial \tau}\right)_i = (1 - D) \cdot \exp\left(\frac{1,6}{1-0,5D}\right) - \mathfrak{ae}_i \cdot D \cdot (1 - D)^2$

П.4. Изменение параметров θ и $\varkappa$

№ кривой	1	2	3	4	5	6
Значение θ_i	0,5	0,52	0,5	0,52	0,5	0,52
Значение $\varkappa_i$	38	38	40	40	42	42

Рис. П.4. Номограммы для $\theta \in [0,4,0,6]$, $\varkappa \in [38,42]$

$$\left(\frac{\partial D}{\partial \tau}\right)_i = (1 - D) \cdot \exp\left(\frac{1,6}{1 - \theta_i D}\right) - \varkappa_i \cdot D \cdot (1 - D)^2$$

П.5. Изменение параметров μ и $\varkappa$

№ кривой	1	2	3	4	5	6
Значение μ_i	1,58	1,6	1,62	1,58	1,6	1,62
Значение $\varkappa_i$	40	35	40	35	40	35

Рис. П.5. Номограммы для $\mu \in [1, 58, 1, 62]$, $\varkappa \in [35, 40]$

$$\left(\frac{\partial D}{\partial \tau}\right)_i = (1 - D) \cdot \exp\left(\frac{\mu_i}{1 - 0,5D}\right) - \varkappa_i \cdot D \cdot (1 - D)^2$$

П.6. Изменение параметров μ и θ

№ кривой	1	2	3	4	5	6
Значение μ_i	1,6	1,58	1,6	1,58	1,6	1,58
Значение θ_i	0,45	0,5	0,55	0,45	0,5	0,55

Рис. П.6. Номограммы для $\theta \in [0,45, 0,55]$, $\mu \in [1,58, 1,6]$

$$\left(\frac{\partial D}{\partial \tau}\right)_i = (1 - D) \cdot \exp\left(\frac{\mu_i}{1 - \theta_i D}\right) - 40 \cdot D \cdot (1 - D)^2$$

П.7.Изменение параметров μ , θ и α

№ кривой	1	2	3
Значение μ_i	$1,57 \pm 0,008$	1,61	1,63
Значение θ_i	0,46	0,46	$0,55 \pm 0,5$
Значение α_i	39,4	$40 \pm 0,6$	39,4
Изменение параметра	$\Delta\mu = 0,51 \%$	$\Delta\alpha = 1,5 \%$	$\Delta\theta = 12 \%$

Рис. П.7. Сравнение влияния изменения параметров на функции смертности, дожития и интенсивности смертности $(\partial D / \partial \tau)_i = (1 - D) \cdot \exp\left(\frac{\mu_i}{1 - \theta_i D}\right) - \alpha_i \cdot D \cdot (1 - D)^2$

П.8.Изменение параметра t_r

№ кривой	1	2	3	4	5
Значение t_{ri}	0,1	1	5	10	15

Рис. П.8. Номограммы для $\mu \in [1, 56, 1, 64]$ $\left(\frac{\partial D}{\partial \tau}\right)_i = (1 - D) \cdot \exp\left(\frac{1,55}{1-0,5D}\right) - 40 \cdot D \cdot (1 - D)^3 \exp\left(\frac{-\tau}{t_{ri}}\right)$

Список литературы

1. Викторов А.А., Голоденков В.И., Гладких В.Д. и др. Групповой статистический критерий оценки донозологического состояния индивидуального здоровья в условиях хронического негативного воздействия факторов среды обитания // Донозология и здоровый образ жизни. – 2010. – № 1 (6). – С. 21-26.
2. Викторов А.А., Холоднов В.А. Кинетическая теория старения живых систем // Успехи геронтологии – 2013. – № 1 (26). – С. 58-65.
3. Викторов А.А., Холоднов В.А., Гладких В.Д. и др. Математическая модель влияния окружающей среды на старение живых систем // Успехи геронтологии. 2013. – № 1 (26). – С. 52-57.
4. Викторов А.А., Ксенофонтов А.И., Морозова Е.Е. Прогнозирование экологических рисков здоровью населения на основе кинетической теории старения живых систем // Успехи геронтологии. – 2014. – № 1 (27) – С. 37-43.
5. Викторов А.А., Гладких В.Д., Морозова Е.Е. Описание старения собак и дрозофил на основе кинетической теории // Успехи геронтологии. – 2017. – № 2 (30). – С. 169-176
6. Викторов А.А., Жаринов Г.М., Некласова Н.Ю. и др. Аналитический метод прогноза кинетики выживаемости онкологических больных при комбинированной лучевой терапии// Лучевая диагностика и терапия. – 2018. – №2. – С. 5-12.
7. Viktorov A.A., Kholodnov V.A. Kinetic Theory for Aging of Living Systems // Advances in Gerontology. PleiadesPublishing, Ltd. – 2013. – Vol.3, № 4. – P. 261-267.
8. Viktorov A.A. Kholodnov V.A., Gladkikh V.D., Alekhnovich A.V. Influence of Environment on Aging of Living Systems: A Mathematical Model Advances in Gerontology // Advances in Gerontology Pleiades Publishing, Ltd. – 2013. – V.3, № 4.-PP. 255-260.

9. Viktorov A.A., Gladkikh V.D., Ksenofontov A.I. Forecasting Environmental Health Risks Based on the Kinetic Theory of Aging of Living Systems // *Advances in Gerontology*. – 2015. – Vol. 5, № 3. – PP. 141-146.
10. Фролов И.Т. Методологические принципы теоретической биологии. – М.: Знание, 1973. – 60 с.
11. Фролов И.Т. Очерки методологии биологического исследования: система методов биологии. Москва.: URSS, 2007. – 285 с.
12. Николи Г., Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах: от диссипативных структур к упорядоченности через флуктуации. М.: Мир, 1979. – 512 с.
13. Эйген М., Шустер П. Гиперцикл. Принципы самоорганизации макромолекул. М.: «Мир», 1982. – 272 с.
14. Лисицын Ю.П., Петленко В.П. Детерминационная теория медицины: доктрина адаптивного реагирования. СПб.: Гиппократ, 1992. – 416 с.
15. Гаркави Л.Х., Квакина Е.Б., Кузьменко Т.С. Антистрессорные реакции и активационная терапия. М.: Имедиас, 1998. – С. 131-136, 292-300.
16. Анисимов В.Н. Молекулярные и физиологические механизмы старения. СПб.: Наука, 2008. – 460 с.
17. Крутько В.Н., Славин М.Б., Смирнова Т.М. Математические основания геронтологии / под ред. В.Н. Крутько. М.: Едиториал УРСС, 2002. – 382 с.
18. Крутько В.Н., Донцов В.И. Старение: математические модели главных механизмов. Труды ИСА РАН. – Том 66 2/2016. – С. 21-33.
19. Голубев А.Г. Проблемы обсуждения вопроса о возможности подходов к построению общей теории старения. Обобщенный закон Гомпертца–Мейкхема // *Успехи геронтологии*. – 2009. – № 1 (22). – С. 60-73.
20. Новосельцев В.Н., Новосельцева Ж.А., Яшин А.И. Математическое моделирование в геронтологии – стратегические перспективы // *Успехи геронтологии* -2003. – № 12. – 149-165.

21. Vern L.B., Merril S., Norella M.P., Daphna G. (ed). Handbook of Theories of Aging. NY: Springer Publishing Company, LLC. – 2009. – 567 p.
22. Бутов А.А., Коваленко А.А. Математические модели физиологии в самостоятельных работах студентов и работах аспирантов: учеб. пособие. Ч. 3 Старение как явление износа и разрушения. Модель Гомпертца. Ульяновск: УлГУ, 2016. – 19 с.
23. Гаврилов Л.А., Гаврилова Н.С. Биология продолжительности жизни. М.: Наука, 1991 – 280 с.
24. Мякотных В.С. Основные теории старения: краткая аннотация для практических врачей // Госпитальный вестник. – 2005. – № 2. С. 25-28.
25. Губин А.Т., Ковалев Е.Е., Сакович А.В. Модель для описания вероятности летального исхода при воздействии радиации и других вредных факторов // Атомная энергия. – 1992. – №. 6 (72). – С. 604-612.
26. Kirkwood T.B.L. Integrative Models of Cellular Ageing. Abstr. 2nd Europ. Congress of Biogerontology // Advances in Gerontology. – 2000. – Vol. 5. – P. 61.
27. Шафиркин А.В. Разработка и экспериментальное обоснование модели формирования поражения организма при протяженных воздействиях радиации. Автореф. дисс. ...канд. биол. наук. Пущино, ИБФ АН СССР, 1983.
28. Шафиркин А.В., Григорьев Ю.Г. Методика установления опасности радиационного воздействия на космонавтов в условиях длительного космического полета на основе обобщенного дозиметрического функционала // Авиакосмическая и экологическая медицина. – 1999. – № 2 (33). – С.55-59.
29. Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду Р 2.1.10.1920-04. М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2004. – 143 с.
30. Шафиркин А.В., Штемберг А.С., Есауленко И.Э. и др. Экология, социальный стресс, здоровье населения и демографические проблемы России. Воронеж: Научная книга. – 2009. – 435с.

31. Шафиркин А.В. Развитие концепции приемлемого риска // Инженерная физика. – 2001. – № 4. С. 32-37.
32. Семенов Н.Н. Развитие теории цепных реакций и теплового воспламенения // Проблемы химической кинетики. М., 1969. – 95 с.
33. Эмануэль Н.М. Химическая и биологическая кинетика. Т. 1. Серия: Избранные труды. М.: Наука. – 2005. – 667 с.
34. Журков С.Н., Нарзуллаев Б.Н. Временная зависимость прочности твердых тел // Журн. техн. физики. – 1953. – № 10 (23). – С. 1677-1689.
35. Иваницкий Г.Р. XXI век: что такое жизнь с точки зрения физики // УФН. 2010. – № 4 (180). – С. 337-369.
36. Грибанова Т.Н., Новосельцев В.Н., Хальфин Р.А. Математическая модель жизненного цикла организма (условия обитания и продолжительность жизни) // Ежегодник Национального геронтологического центра. – 1998. – № 1. – С. 57-63.
37. Викторов А.А., Гладких В.Д., Ксенофонтов А.И., Смирнов В.В. Основы медико-экологической безопасности. Учебное пособие. М.: НИЯУ МИФИ, 2011. – С. 146-176.
38. Александров О.А., Случевский И.И. К вопросу об определении и оценке здоровья // Здравоохранение (Международный журнал). – 1983. – № 3. С. 205-212.
39. Вкторов А.А., Голоденко В.И., Широкова В.И., Гладких В.Д. и др. Методология медико-экологических исследований, диагностика и оценка рисков экологически обусловленных изменений здоровья детского населения, проживающего в районах расположения потенциально экологических опасных объектов // В кн. Экологическая педиатрия. М.: Триада-Х, 2011. – С. 272-307.
40. Онищенко Г.Г., Новиков С.М., Рахманин Ю.А. и др. Основы оценки риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду. М.: НИИ ЭЧ и ГОС. – 2002. – 408 с.
41. Машкович В.П., Кудрявцева А.В. Защита от ионизирующих излучений. Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1995. – 494 с.

УДК 614.2(075.8)

Глава 2.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ МЕДИЦИНСКИХ ВМЕШАТЕЛЬСТВ: МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ НАУЧНОГО ОБОСНОВАНИЯ

Ушаков Евгений Владимирович

кандидат философских наук, доцент

ФГБОУ ВО «Российская Академия Народного Хозяйства
и Государственной Службы при Президенте Российской Федерации»
(Северо-Западный институт управления)

Аннотация. Вопросы оценки эффективности медицинских вмешательств остаются напряженной проблемой. В статье рассматриваются современные методы оценивания медицинских технологий и проблема «золотого стандарта» оценок. Обсуждаются пути и перспективы дальнейшего развития методологии исследований эффективности медицинских технологий.

Ключевые слова: медицинские технологии, медицинские вмешательства, эффективность медицины, оценка медицинских технологий, методы оценки эффективности, медицинские исследования

EFFECTIVENESS OF MEDICAL INTERVENTIONS: METHODOLOGICAL PROBLEMS OF SCIENTIFIC JUSTIFICATION

Ushakov Evgeniy Vladimirovich

Abstract: The problems of assessing the effectiveness of medical interventions remain an urgent issue. The article discusses current methods for assessing medical technologies and the problem of the «gold standard» of assessments. The ways and prospects of further development of the methodology of research on the effectiveness of medical technologies are discussed.

Key words: medical technology, medical interventions, effectiveness of medicine, medical technology assessment, effectiveness assessment methods, medical research

К медицинским вмешательствам сегодня предъявляется широкий ряд требований, на первое место среди которых следует поставить эффективность (или результативность, действенность, то есть достижение поставленной цели) и безопасность.

Медицинские вмешательства осуществляются посредством медицинских технологий. Согласно одной из популярных классификаций, медицинские технологии можно разделить на препараты, устройства (devices) и процедуры (или техники; например, техники хирургических операций) [1, p.2].

Оценка эффективности медицинских технологий производится в настоящее время с помощью научно обоснованных методов. Вкратце, сложившиеся методологические представления (или некая магистральная тенденция) в отношении проверки и обоснования эффективности медицинских технологий выглядят следующим образом.

Широко признано, что эмпирические исследования по оценке медицинских технологий должны обеспечивать максимально высокий уровень надежности получаемых данных (свидетельств). Надежность результатов зависит прежде всего от таких составляющих, как методологическая схема, использованная в исследовании (дизайн), точность и аккуратность проведения самого исследования, правильное использование статистических методов, корректная формулировка выводов.

Различные дизайны, используемые в медицинских исследованиях, можно ранжировать по степени контроля над используемыми переменными. При этом фундаментальная методологическая задача (для повышения надежности получаемых данных) состоит в том, чтобы обеспечить максимально высокую степень контроля. Для этого стремятся достичь максимального приближения

используемой в исследовании методологической схемы (дизайна) к базисной логической схеме *эксперимента*.

В итоге даже неэкспериментальные исследования, в которых нет возможностей прямо контролировать независимую переменную, сегодня предпочитают проводить так, чтобы они стали в известной степени «похожи» на контролируемые исследования. Подобные приемы получили в литературе название квазиэкспериментирования.

Данный термин был широко использован в работах известного американского ученого и философа Дональда Кэмпбелла, внесшего значительный вклад в развитие современной научно-исследовательской методологии [2].

Напомним, что базисной логической схемой эксперимента можно считать структуру, состоящую из *независимой* и *зависимой* переменной, выявляемой *связи* между ними, а также воздействующим на эту связь, вмешивающимся в ее проявление, комплексом *побочных факторов*. Предельно общо, задача экспериментатора состоит в том, чтобы заблокировать эти побочные факторы и выделить в чистом виде связь между независимой и зависимой переменной.

В экспериментальных исследованиях имеется возможность активно влиять на изучаемый фактор. Исследователь проводит целенаправленные воздействия в отношении независимой переменной и изучает ответную реакцию зависимой переменной (к примеру, можно исследовать зависимость частоты сердечных сокращений от физической нагрузки, систематически изменяя нагрузку у испытуемых и фиксируя реакции пульса). В обсервационных же исследованиях исследователь не может прямо воздействовать на изучаемую зависимость и способен лишь наблюдать естественный ход событий.

Экспериментальные исследования, согласно сложившейся практике проверки и введения новых лечебных методов в медицинскую практику, могут быть разделены на исследования лабораторного характера (когда новый метод

разрабатывается в лаборатории и испытывается на подопытных животных) и клинические испытания, в ходе которых происходит изучение лечебного метода на людях в условиях, приближающихся к будущей практике. Для клинических испытаний (разумеется, при соблюдении всех этических условий) используются группы добровольцев, которым предлагается принять участие в апробации нового лекарства.

В основе проверки эффективности медицинской технологии лежит продуктивная методологическая идея, которую можно назвать эпидемиологической моделью. Вкратце, ее смысл сводится к тому, чтобы статистически выявить разницу (difference) в значении некоторой переменной (выбранной как индикатор) по результатам замера характеристик некоторой специальной популяции. Разнообразные экспериментальные дизайны предназначены для работы в различных исследовательских ситуациях, с разными изучаемыми объектами, и призваны создать наилучшие условия для проведения замера, обнаружения и подтверждения (доказательства) существующих различий.

Проведение клинических испытаний является сегодня обязательным требованием для проверки (лечебной) медицинской технологии и доказательства ее эффективности перед непосредственным предложением внедрения ее в практику. Стандартом современных клинических испытаний выступает так называемое рандомизированное контролируемое исследование (randomized controlled trial, RCT). Категоричность этого норматива подчеркивают также термином «золотой стандарт» - этот термин появился в литературе в 80-е годы XX в. [3], [4].

Следует заметить, что стандарт RCT учреждается сегодня, в свете растущей строгости научно-медицинской методологии, довольно решительно: в идеале каждая клиническая технология должна выдержать тестирование в рандомизированном контролируемом испытании. Этот принцип стал одним из

основополагающих в широком современном движении доказательной медицины.

Рандомизированные контролируемые испытания стали использоваться в медицинской сфере относительно недавно. Первый отчет об исследовании эффективности лечения с помощью данного метода появился в 1952 году; в этом исследовании была изучена эффективность стрептомицина для лечения туберкулеза [5]. Одним из авторов статьи был Остин Брэдфорд Хилл (1897-1991), крупнейший английский эпидемиолог и статистик, который внес значительный вклад в развитие медицинской статистики и методологии эпидемиологических исследований.

Дизайн рандомизированного клинического испытания состоит в том, чтобы сопоставить две как можно более одинаковые (с точки зрения исходного риска, прогностических факторов и даже прочих неучтенных переменных) группы пациентов: одной группе дается экспериментальное лечение, другая выступает в качестве контрольной, после чего в обеих группах измеряются клинические исходы.

Непременным компонентом рандомизированного клинического исследования является рандомизация. Этот метод был предложен в работах британского статистика Рональда Фишера (1890-1962), посвященных агробиологическим экспериментам (1925) [6], [7].

Рандомизация используется как специальный прием, с помощью которого возможно добиться максимального сходства сравниваемых групп. Пациенты из разных групп могут отличаться по разным признакам: по возрасту, полу, тяжести исходного состояния, сопутствующим заболеваниям, аллергическому статусу и т.п.

Кроме того, теоретически всегда сохраняется возможность вмешательства и каких-то неизвестных факторов. Все это может вносить существенный вклад в наблюдаемый результат и искажать действительное положение дел в отношении изучаемого фактора.

Рандомизация призвана нивелировать вероятности воздействия на пациентов побочных факторов. При этом принципиальным достоинством рандомизации является то, что она устраняет не только учтенные исследователем различия, но и даже и факторы, неизвестные на момент испытания. Вкратце, рандомизация состоит в том, чтобы распределить пациентов по группам таким способом, чтобы они имели равную вероятность попадания в обе группы, без каких-либо предпочтений. Для этого используются такие технические приемы, как использование случайного выбора (на основе таблиц случайных чисел), стратификация и другие методы.

Далее, следует отметить такое важнейшее методологическое требование к любому эмпирическому исследованию, как *валидность* (лат. *validus* - сильный, действенный). Широко распространено различие внутренней и внешней валидности исследования (Д. Кэмпбелл, Р. Готтсданкер и др.).

Понятие внутренней валидности отражает совершенство логического плана исследования. Так, внутренне валидное испытание спроектировано так, чтобы надежно заблокировать действие побочных факторов и выделить изучаемую взаимосвязь переменных, убедительно продемонстрировать, что обнаруженные в исследовании эффекты обусловлены некоторой «жесткой» связью между переменными, а не какими-то другими причинами. Именно этот результат и может быть достигнут благодаря дизайну рандомизированного клинического испытания: когда сравниваемые группы находятся в максимально одинаковых условиях, наблюдаемая разница в клинических исходах наиболее убедительно может быть объяснена только различием в лечебных воздействиях, которым были подвергнуты группы испытуемых.

Исследователям, однако, давно известен ряд феноменов, которые могут составить угрозу валидности: таковы, например, эффект плацебо и эффект Хоторна. Эффект плацебо связан с неспецифической компонентой, по-видимому, психологического характера, благодаря которой уже сам факт того, что пациент знает, что он принимает предположительно высокоэффективное

лекарство, благоприятно влияет на ход лечения. Эффект Хоторна, выявленный в психологических экспериментах, означает влияние на испытуемого того факта, что он подвергается испытанию (это воздействует на его психологические установки, поведение и т.п.).

Для борьбы с этими эффектами в современной научно-медицинской методологии принято использовать технику маскировки, состоящую в том, что участники испытаний остаются в неведении, знают, какая группа получает экспериментальное, а какая - контрольное лечение; часто контрольным воздействием выступает имитация лечения - плацебо. Сегодня используются сложные схемы маскировки, например, такие, при которых об условиях испытания не осведомлены ни пациенты, ни участвующий медицинский персонал (двойное слепое испытание), а часто также и лица, непосредственно обрабатывающие полученные опытные данные (тройное слепое испытание).

Основная цель применения рандомизации и различных видов маскировки - борьба с так называемыми систематическими ошибками, или смещениями (bias). Понятие систематической ошибки означает действие неучтенного исследователями фактора, который смещает результаты исследований некоторым направленным образом (например, систематически завышая данные об эффективности тестируемой технологии). Дизайн замаскированного рандомизированного клинического испытания, по современным представлениям, наилучшим образом позволяет избежать систематических ошибок и продемонстрировать истинный вклад тестируемого вмешательства в улучшение клинических исходов в экспериментальной группе.

К методологическим требованиям в отношении исследований относится также внешняя валидность, состоящая в том, что данные эксперимента должны быть применимы к более широкому классу сходных ситуаций.

Для научно-медицинской методологии это может быть интерпретировано, в частности, как требование применимости результатов, полученных в клиническом испытании (часто проводимом в университетской

клинике), к реальным пациентам в любых медицинских учреждениях. Это является отдельной трудной проблемой медицины, так как пациенты, включенные в клиническое испытание, в общем случае будут отличаться от тех пациентов, с которыми столкнется практикующий врач в конкретных ситуациях своей практики.

Повышение валидности исследований осложнено тем, что внутренняя и внешняя валидность плохо совмещаются друг с другом. Если исследователь добивается лучшей внутренней валидности, то это означает, что он проводит исследование в более четко определенных и контролируемых условиях, при которых возможно изолировать изучаемый феномен и изучить его в чистом виде. Однако такие искусственные условия дальше отстоят от реальных условий практики, что снижает внешнюю валидность.

Таким образом, проведение столь сложных испытаний, какими являются исследования на людях, чревато множеством методологических трудностей. В литературе описано множество «подводных камней», с которыми нередко сталкиваются клинические испытания. Ряд систематических ошибок уже хорошо известен, другие только обнаруживаются исследователями.

Среди прочих исследовательских дизайнов, широко применяемых для тестирования медицинских технологий, следует в первую очередь назвать такие, как когортные исследования, исследования «случай – контроль», одномоментные исследования и исследования случаев.

По современным методологическим представлениям, уровни надежности доказательств, предоставляемые различными видами научных исследований, могут быть упорядочены в виде некоторой последовательности. В литературе предлагаются различные виды иерархий надежности, различающиеся степенью детализации предоставляемых научных свидетельств. Но, как правило, эти иерархии сходятся в главном.

В общем виде иерархия надежности эмпирических свидетельств, по Т. Гринхальх, выглядит следующим образом (в порядке убывания от наиболее

надежного свидетельства): рандомизированные контролируемые клинические испытания – когортные исследования – исследования «случай – контроль» – одномоментные исследования – описания случаев [8].

В настоящее время в методологической литературе по проблемам исследований эффективности медицинских технологий идут многочисленные дискуссии. В частности, активно обсуждаются такие темы, как достоинства и недостатки тех или иных дизайнов, приемы борьбы с ошибками в исследованиях (и сама принципиальная возможность справиться с этими ошибками), направления совершенствования того или иного дизайна (для повышения валидности получаемых результатов), применимость иерархий надежности свидетельств для научной практики, роль качественных исследований (qualitative research) для проверки эффективности медицинских технологий и др.

Прежде всего следует отметить, что множество критических замечаний высказывается в адрес рандомизированных клинических испытаний. Применение этого дизайна сопровождается множеством проблем: моральных, организационных, методологических. В частности, одно из главных возражений состоит в известной формальности этого метода, изучающего лишь связь между «входами» и «выходами» вмешательства («черный ящик»), но не позволяющего понять сам процесс, механизмы, важные детали применения медицинской технологии.

В литературе широко цитируются статьи известного специалиста в области философии и методологии науки Нэнси Кэртрайт, в которых она представила развернутую и обоснованную критику данного метода (а также его высокого и даже привилегированного положения в сложившейся парадигме) [9], [10], [11]. Н. Кэртрайт утверждает, что RCT не может считаться непогрешимым методом и выступать в качестве «золотого стандарта». Более того, такого стандарта вообще не может существовать. Работы Н. Кэртрайт оказали сильное влияние на многих исследователей.

Имеются и другие требования вообще отказаться от понятия «золотого стандарта» в исследовательской методологии [12].

На фоне критики метода RCT появляются все новые разработки, направленные на то, чтобы преодолеть те или иные его ограничения, сделать его более адекватным и полезным для применения в клинических реалиях. Среди многих новых предложений назовем только два примера.

В литературе неоднократно отмечалось, что прием рандомизации не является абсолютной гарантией преодоления значимых различий между изучаемыми группами (на это указывал и сам родоначальник данного метода Р. Фишер). В настоящее время предлагаются так называемые процедуры *рерандомизации* (повторного применения рандомизации), если первый вариант оказался неудачным [13].

Для того чтобы преодолеть известную ригидность и формальность дизайна RCT, сделать его более гибким и релевантным в отношении клинических реалий, в настоящее время разрабатывается семейство так называемых адаптивных дизайнов (появление этой идеи восходит еще к 70-м гг. XX века). Адаптивные дизайны позволяют вносить своевременные изменения в ход клинических исследований, применять последовательности испытаний и т.п. [15].

Другие исследовательские дизайны тоже имеют собственные недостатки.

Например, когортные исследования также подвержены систематическим ошибкам, причем здесь их предотвратить сложнее, чем в контролируемом клиническом испытании. Так, когорта может оказаться изначально сформированной некорректно, больные могут выбывать из исследования, информация о них может искажаться в ходе сбора данных и т.п.

Исследования «случай – контроль» часто применяются для выяснения причинно-следственных связей. Их популярность обусловлена простотой и малой затратностью: они позволяют в короткие сроки проверить гипотезу о наличии той или иной каузальной связи. Систематические ошибки таких

исследований могут быть связаны с ошибками воспоминаний, неправильным формированием групп, недоступностью медицинской документации для изучения анамнеза испытуемых и т.п.

В одномоментных исследованиях систематические ошибки могут быть связаны со многими причинами (смещения из-за влияния личности интервьюера, нерепрезентативная выборка, неадекватная система выбранных индикаторов и т.п.).

Исследования, называемые описаниями случаев (case reports), представляют собой наименее надежный источник свидетельств. Для дальнейшей постановки и исследования проблем, поднятых в этих отчетах, требуются методические научные исследования.

В литературе часто подчеркивают, что не существует некоего совершенного, или наилучшего дизайна. Одни дизайны больше подходят для решения одних исследовательских задач, другие – для прочих. Например, когортные исследования являются оптимальными для исследования прогноза и риска, изучения долгосрочных эффектов лечения и программ медицинской помощи. Одномоментные исследования исключительно важны для определения эффективности диагностических технологий.

Как подчеркивает Н. Блэк, не следует безусловно полагаться на клинические испытания и принижать обсервационные исследования. Во многих ситуациях наблюдательные исследования либо единственно возможны, либо поставляют ценную информацию для дальнейших экспериментальных исследований. Экспериментальные и наблюдательные исследования нужно, скорее, рассматривать как дополняющие друг друга [16].

Несмотря на то, что количественные оценки остаются главной линией в анализе эффективности медицинских технологий и их значимость постоянно подчеркивается, а внимание к ним усиливается, в последние два десятилетия растет также количество исследований, использующих *качественные* методы оценок. Применимость качественных методов долгое время вызывала споры;

они и сейчас сохраняют известную проблематичность. Однако с развитием социальных наук эти методы существенно повысили свою строгость и в итоге завоевали более широкую популярность.

Качественные методы оценки медицинских технологий активно обсуждаются в современной литературе. В данном ряду находятся работы Р. Илсли, У. Кинстона, М. Лейса, Г. Смита и К. Кэнтли и других авторов. Так, в Великобритании современное направление качественных оценок медицинских программ сформировалось под влиянием известного социолога медицины Раймунда Илсли (R. Illsley). Он выдвинул в 1980 году так называемый «проясняющий» подход к оценке медицинской помощи, который можно рассматривать как некую альтернативу формальным аналитическим методам [17].

С точки зрения Р. Илсли, точные количественные оценки эффективности, которые должны быть получены по модели рандомизированного контролируемого испытания, достижимы далеко не всегда, но в этом и не всегда есть потребность. Для того, чтобы выяснить уровень эффективности служб здравоохранения, необходим более широкий (пусть даже не такой совершенный по точности статистического анализа) оценивающий подход [18, pp. 220-221].

Качественные исследования разнообразны по целям. Они ориентированы прежде всего на процессы и значения. Исследователи, применяющие качественные методы, изучают объекты и социальные отношения в их естественной среде, стремясь осмыслить или интерпретировать феномены в терминах тех значений, которые люди им придают. Здесь ставится акцент на *процессах и значениях*, которые не могут быть строго проверены или измерены в количественных терминах [19]. В группу качественных оценок входит комплекс развитых в социальных науках методов: непосредственное наблюдение, опросы, интервью, сбор данных из различных источников, анализ документов (текстов, магнитофонных записей) и другие техники.

Важной чертой качественного оценивания является *участие* наблюдателя в изучаемых процессах: скажем, исследователь анализирует, как именно протекает лечение, какие события происходят в данной системе, каковы отзывы персонала и самих пациентов о медицинской программе и т.п. Это позволяет ему понять суть происходящего, изучить существенные детали, в том числе прояснить важные, но не формализуемые субъективные аспекты ситуации: мнения, убеждения, ценности и т.п.

В итоге, качественные методы оказываются полезны (а в ряде ситуаций просто необходимы) тем, что они позволяют охватить широкий контекст, связанный с применением технологий в медицинской сфере. Например, они способны прояснить такие темы, как удовлетворенность пациента, желание больных сотрудничать с медиками (комплаинс), заинтересованность медицинского персонала в применении данной технологии, социальные условия, в которых реализуется данный способ действий, непосредственный ход применения медицинской технологии и возможность его корректировки и многие другие.

На основе понимания важной роли не только количественных, но и качественных методов исследований для оценки медицинских технологий, все менее убедительной становится стандартная шкала надежности свидетельств, а также понятие «золотого стандарта». Среди критических работ, посвященных пересмотру сложившейся парадигмы, следует отметить статью С. Хаграма и К. Томаса. Несмотря на то, что эта работа относится к сфере политических исследований, она имеет значение и для методологии оценки медицинских технологий.

Авторы статьи утверждают, что в настоящее время назрела необходимость перейти к методологическому плюрализму, что можно выразить, в частности, как переход от «золотого» стандарта к «платиновому».

По мнению этих авторов, в настоящее время можно различить конкуренцию двух стандартов: первый основан на экспериментальном подходе

(прежде всего на RCT). Второй, который пока менее распространен (но все шире используется в качественных исследованиях), применяет методы исследований случаев (кейс-стади), сравнительные методы, триангуляцию и выявление каузальных механизмов. Для оценивания политики необходимо использовать оба подхода, опираясь на их достоинства [20].

В этой связи, возвращаясь к медицинской сфере, следует отметить, что здесь в настоящее время также выдвигаются предложения комбинировать в медицинских исследованиях качественные и количественные методы. Разрабатываются даже специальные схемы для проведения качественных исследований, которые дополняют RCT или тесно связаны с ними [21]. Представляется, что у подобного рода комбинаторного подхода (или микс-методологии) имеются определенные перспективы.

Научная деятельность представляет собой непрерывно изменяющийся и развивающийся комплекс практик, создаваемый, применяемый и корректируемый научным сообществом (Ф. Китчер) [22]. Медицинская методология исследований эффективности технологий, как особая сложная исследовательская практика, тоже находится в постоянном развитии и, несомненно, будет совершенствоваться и дальше.

Мы полагаем, что будущее методологии исследований эффективности медицинских технологий будет связано с продвижением в нескольких направлениях, в том числе – с разработкой более специализированных вариантов дизайнов, развитием новых приемов борьбы с систематическими ошибками, более широким использованием качественных методов (которые сами по себе тоже нуждаются в постоянном совершенствовании), а также созданием и применением комбинированных методологических схем.

Список литературы

1. Gelijns A.C. Technology Innovation: Comparing Development of Drugs, Devices, and Procedures in Medicine. Washington, DC: Natl. Acad. Press, 1989.
2. Кэмпбелл Д. Модели экспериментов в социальной психологии и прикладных исследованиях. - СПб.: Социально-психологический центр, 1996.
3. Feinstein A.R., Horwitz R.I. Double standards, scientific methods, and epidemiologic research. New England Journal of Medicine 1982; 307: p. 1611–17.
4. Jones D. S., Podolsky S. H. The history and fate of the gold standard. The Lancet, 2015, Vol. 385, No 9977 (April 2015), p. 1502-1503.
5. Daniels M., Hill A. B. Chemotherapy of Pulmonary Tuberculosis in Young Adults. An Analysis of the Combined Results of Three Medical Research Council Trials. British Medical Journal 1952; N 1, p. 1162-8.
6. Fisher R.A. The design of experiments. Edinburgh: Oliver & Boyd, 1935.
7. Фишер Р. Статистические методы для исследователей, М.: Госстатиздат, 1958.
8. Greenhalgh T. How to read a paper: getting your bearings (deciding what the paper is about). BMJ 1997; 315, p. 243-246.
9. Cartwright N. Are RCTs the Gold Standard? Biosocieties, 2007, 2(1), p. 11–20.
10. Cartwright N. Hunting Causes and Using Them: Approaches in Philosophy and Economics. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2007.
11. Cartwright N. What Are Randomised Controlled Trials Good For? Philosophical Studies, 2010, 147(1), p. 59–70.
12. Duggan P.F. Time to abolish «gold standard». BMJ 1992; 304, p. 1568–69.
13. Morgan K., D. Rubin Rerandomization to balance tiers of covariates. Journal of the American Statistical Association, 2016, 110 (512), p. 1412–21.
14. Chow S.C., Chang M. Adaptive Design Methods in Clinical Trials. Chapman and Hall/CRC Press, Taylor and Francis, New York, NY; 2006.

15. Black N. Why we need observational studies to evaluate effectiveness of health care. BMJ, 1996, 312, p. 1215-1218.
16. Illsley R. Professional or Public Health? Nuffield Provincial Hospitals Trust, London, 1980.
17. Qualitative research methods in health technology assessment: a review of the literature / E. Murphy, R. Dingwall, D. Greatbatch, S. Parker, P. Watson. Health Technology Assessment 1998; Vol. 2: N. 16, p. 1-276
18. Leys M. Health technology assessment: the contribution of qualitative research. International Journal of Technology Assessment in Health Care, 2003, 19:2, p. 317–329.
19. Khagram S., Thomas C.W. Toward a Platinum Standard for Evidence-Based Assessment by 2020. Public Administration Review, Special Issue December 2010, 70 (S1), pp. S100-S106
20. O’Cathain A.A Practical Guide to Using Qualitative Research with Randomized Controlled Trials. Oxford University Press, 2018.
21. Kitcher Ph. The Advancement of Science. - Oxford, 1993.

Глава 3.

ПАЦИЕНТ КАК ИНДИКАТОР КАЧЕСТВА МЕДИЦИНСКИХ УСЛУГ

Шопов Димитър Георгиев

доцент кафедры «Менеджмента здравоохранения
и экономики здравоохранения»

Михайлова Ванина Кръстева

доцент кафедры «Управление здравоохранением»

Стоева Теодора Радева

ассистент кафедры «Управление здравоохранением»

Факультет общественного здоровья

Медицинский Университет

Болгария

Аннотация: Медицинские услуги находятся в тесной связи со все возрастающей потребностью и желанием каждого человека постоянно улучшать качество своей жизни, быть полезным себе, близким и обществу. Целью этой работы является изучение и анализ удовлетворенности пациентов качеством медицинского обслуживания в динамике (за исследуемый период времени). Пациентам предоставлена возможность дать оценку обслуживания в клиниках УМБАЛ «Св. Георги» г. Пловдива путем участия в индивидуальной анонимной анкете. В качестве обобщения можем отметить высокий процент положительных оценок качества медицинского обслуживания, санитарно-бытовых условий и гигиены, удовлетворенность проведенным лечением. Особое внимание обращаем и на рекомендации по улучшению проводимого лечения.

Ключевые слова: качество, медицинские услуги, пациент, удовлетворенность

THE PATIENT – AN INDICATOR OF QUALITY OF THE MEDICAL SERVICES

Shopov Dimitar Georgiev
Mihaylova Vanina Krasteva
Stoeva Teodora Radeva

Abstract: Medical services are directly related to the increasing demands and the desire of the people to continuously improve the quality of their lives in order to be useful for themselves, their relatives and the society. The purpose of the article is to study and analyze the patients' satisfaction with the quality of medical services in dynamics (for a monitored period of time). They have been provided with the opportunity to make an assessment of the services provided in the clinics of University Hospital «St. George» in Plovdiv, by filling out a direct individual anonymous questionnaire. In summary we can outline the high per cent of positive answers of the patients regarding the medical services, the hygienic and living conditions, their satisfaction with the conducted treatment. Recommendations for subsequent improvement of the conditions of their treatment have been made.

Key words: quality, medical services, patient, satisfaction

Введение. В современной системе здравоохранения качество является безусловным приоритетом. Постоянный переход от эффективного и качественного создания продукта к повышению его рыночной реализации в сфере здравоохранения – основа дуалистического характера качества, что, в свою очередь, с одной стороны зависит от производителя, а с другой – от потребителя. Производитель создает качественный продукт в соответствии со своими критериями, который, в случае несоответствия требованиям потребителя – не может быть востребованным. С другой стороны потребитель

со своими требованиями, а так же и покупательной способностью является фактором создания качественного продукта [1; 5; 12; 13].

Создание и предоставление более качественного клинического продукта стимулируют отдельные больницы постоянно вести поиск все более новых и новых методов лечения, стремиться использовать самую современную медицинскую технику и услуги высококвалифицированных медицинских специалистов. Качество здравоохранения является главной целью, здесь не менее важным являются высокое качество медицинских специалистов, параклинические и вспомогательные звенья [4; 6; 8; 9].

Постоянное улучшение качества здравоохранения включает в себя оценку, действия и новые подходы непрерывного стремления к отличным результатам. Развитие самого процесса характеризуется небольшими этапами, в которых принимает участие группа людей, работающих вместе. В сфере здравоохранения постоянное улучшение качества используется для системного исследования методов повышения качества заботы о пациентах. В результате этого могут быть достигнуты следующие результаты:

- ◆ Улучшение результатов лечения пациентов
- ◆ Повышенная удовлетворенность потребителя
- ◆ Более высокая эффективность организации
- ◆ Снижение расходов

Осуществляемые реформы в сфере здравоохранения и изменение законодательства привели к регистрации лечебных заведений как торговых структур. Появление таких структур на рынке медицинских услуг изменили и способы финансирования их деятельности. Создается конкурентный рынок, где пациент имеет право выбора лечебного заведения. Недофинансированная система работы по клиническим протоколам значительно затрудняет диагностику и лечебный процесс. Различные формы собственности лечебных учреждений также отражаются на качестве лечения и движении потока пациентов. Удовлетворенность пациента проведенным лечением – комплексное

понятие. Развитие мировой медицинской мысли и практики выявило существенную проблему, касающуюся качества медицинских услуг. Эта проблема в сфере здравоохранения должна быть решена. Возрастающая потребность людей вести здоровый образ жизни и их высокая осведомленность приводят к повышению требований к качеству медицинской помощи. В этой связи качество медицинских услуг становится все более существенным критерием степени управленческого профессионализма в системе современного здравоохранения [10; 11; 13].

Существенное место в сфере медицинского обслуживания населения занимает больничная помощь. Качество больничной помощи как один из основных базовых показателей авторитета каждой клиники определяется зависимостью сложных комплексов и факторов: экономических, социальных, политических и культурных. Эти факторы в той или иной степени определяют и различия в уровне предлагаемых больничных услуг. Доля больничной помощи в сравнении с добольничной незначительна, однако независимо от этого во всех современных системах здравоохранения создаются стандарты, мультиплицируются методы с целью улучшения качества медицинской помощи в целом и, в частности, больничной медицинской помощи. Последняя имеет важное значение для целостного восприятия пациентами больничного заведения, где они проходят лечение и где ожидают улучшения своего здоровья. Качественные медицинские услуги имеют важное значение для развития оптимальной маркетинговой политики лечебного учреждения [14; 16].

Управление лечебной деятельностью в медицинском заведении объединяет знания, персонал, ресурсы, структуры и процессы в согласованную структуру. Для ее эффективности необходимо постоянное наблюдение и адекватный ответ на нежелательные изменения [17].

Радикальные реформы, осуществляемые в системе здравоохранения, способствуют постоянному внедрению новых методов в практике медицинских

специалистов, повышению качества медицинского обслуживания, эффективному разделению труда, делегированию прав и ответственности. Это ставит перед руководством задачу необходимости развития умений в сфере управления изменениями, управление занятостью персонала, целями и потребностями лечебного заведения, что, в свою очередь, способствует стабильной организационной деятельности [18].

Результаты деятельности лечебного заведения зависят от поведения и взаимоотношений медицинских специалистов в рабочей среде, от их умений и опыта, от способности принятия решений, от их ценностной системы и требований к рабочему процессу. Как часть целостного качественного медицинского обслуживания пациентов обеспечение качества предлагаемой больничной помощи является важным фактором. Обеспечение качества – планируемый и систематизированный подход мониторинга и оценки предоставленной помощи и услуг, с помощью которого принимаются соответствующие меры. [19].

Лечебный процесс, предлагаемый в лечебном учреждении, отличается от всех сфер деловой жизни. В отличие от произведенных и предлагаемых на рынке продуктов здесь создание, обслуживание и спрос объединены. Качественный продукт одновременно создается, предлагается, воспринимается и оценивается всеми участниками лечебного процесса – пациентами, врачами и финансирующими этот процесс учреждениями. Эти сложные взаимоотношения чреваты дисбалансом в случае, когда значение одного из трех участников переоценивается, что свидетельствует о двойственном (дуалистическом) характере качества медицинской помощи [20].

Отношения пациент / врач = финансирующее учреждение должны находиться в постоянном равновесии. То, что является правильным с точки зрения врача, не всегда может быть правильным для пациента, несмотря на то, что конечный результат лечения (защита жизни пациента) всегда оправдан с медицинской точки зрения. Не всегда состояние пациента в

результате действий врача, стремящегося сохранить его здоровье, улучшается в результате его вмешательства. С другой стороны, финансирующее деятельность учреждение играет и роль оценивающего звена, где комбинация оценки пациента и врача может привести к непредвиденным результатам. Эти сложные взаимоотношения на практике всегда будут спорными. Особенность ситуаций, где предлагается медицинская помощь – важный фактор, который оказывает влияние на восприятие результата лечения [21].

Рассмотрим удовлетворенность пациентов медицинским обслуживанием в самой крупной больнице Р. България – УМБАЛ «Свети Георги» г. Пловдив.

УМБАЛ «Свети Георги» – Пловдив – клиника с вековыми традициями. Она является правопреемником открытой сразу после Освобождения в 1879 г. больницы Организации Красного креста «Св. Пантелеймон». Позже клиника преобразована в государственную больницу. С 1945 г. больничная база объявлена факультетской больницей, базой для проведения клинического обучения медицинских кадров при новооткрытом медицинском факультете Пловдивского университета. В течение последних лет база значительно расширяется – ведется строительство, достраиваются и надстраиваются новые корпуса. В результате этого в 1980 году заканчивается строительство корпуса хирургических клиник, аптечного блока, пищевого блока, прачечного блока и т.д. На сегодняшний день УМБАЛ «Св. Георги» является правопреемником бывшей больничной структуры Высшего медицинского института Пловдив. В августе 2000 г. приказом Министра здравоохранения преобразована в торговое общество – Единоличное акционерное общество. Разрешение на осуществление лечебной деятельности выдано в Январе 2001 г. После положительной аккредитации ей присвоен статус Университетской больницы.

Миссия УМБАЛ «Свети Георги» ЕАО – Пловдив – предоставление доступной, высококачественной и высококвалифицированной медицинской помощи, охватывающей качество и объем, которые должны удовлетворять потребности в медицинской помощи, высокоспециализированной деятельности

и исследований населения Южного Центрального Еврорегиона, медицинская помощь, которая направлена на сохранение жизни пациентов и повышение качества жизни населения Области Пловдив и региона Южной Болгарии.

Миссия больницы – это ее вклад в развитие медицинской науки, ее участие в образовании и повышении квалификации медицинских кадров. В связи с выполнением национальных задач скорой медицинской помощи больница утвердила себя как основной центр обслуживания случаев неотложной помощи 24 часа в сутки, обслуживая все население Области Пловдив и региона Южной Болгарии. Она является одним из утвердивших себя центров, включенных в программу донорства органов и тканей для трансплантации.

Целью настоящего исследования является анализ степени удовлетворенности пациентов качеством медицинского обслуживания в динамике (за исследуемый период времени). В этой связи пациентам предоставлена возможность дать свою оценку обслуживания в клинике УМБАЛ «Св. Георги» Пловдив путем заполнения индивидуальной анонимной анкеты.

Материал и методы:

Объект наблюдения – клиники УМБАЛ «Св. Георги» Пловдив. Логические единицы – анкетированные пациенты. Анкетное исследование проведено в период третьего квартала 2021 года. При разработке анкетных карт соблюдены основные требования метода, а именно:

- Ясная формулировка цели исследования
- Неоспоримая обусловленность его общественной и социальной значимости
- Максимальная экономия времени анкетлируемых лиц
- Полная анонимность и дискретность.

Использована индивидуальная анкета. В день выписки пациента из стационара ему предоставляется комплект: анкетная карта и конверт. После

заполнения анкеты они передаются секретарю соответствующей клиники. Участие в анкете добровольное при гарантии полной анонимности и дискретности респондентов. При статистической обработке собранной первичной информации использованы вариационный, альтернативный и непараметрический анализ. Для анализа исследуемых процессов, явлений, показателей, закономерностей и зависимостей использованы возможности графического анализа. При компьютерной обработке собранной базы данных использованы статистический пакет SPSS версия 19 и Microsoft Excel.

Результаты и обсуждения:

Статистические данные принявших участие в анкете пациентов представлены в таблице 1. Количество участников за исследуемый квартал 2021 года варьирует в восходящем порядке. По половому составу преобладают женщины. В возрастной структуре наблюдается известная динамика: в контингенте 18-64 г. увеличение числа анкетироваемых пациентов, а старше 64 г. – спад числа анкетироваемых пациентов.

Таблица 1

	І квартал	ІІ квартал	ІІІ квартал
количество анкетироваемых пациентов	279	366	395
ПОЛ			
мужчины %	48,39	44,81	44,81
женщины %	50,9	53,55	54,43
без ответа %	0,71	1,64	0,76
ВОЗРАСТ			
18-64 г.	36,20%	37,98%	51,39%
старше 64 г.	55,20%	52,19%	42,03%
без ответа	8,60%	9,83%	6,58%

Интересный факт: увеличивающийся плановый прием и соответственно сокращение случаев оказания неотложной помощи за анализируемый период времени (Таблица 2)

Таблица 2

Прием пациентов

	I квартал	II квартал	III квартал
плановый прием	12,54%	36,89%	52,15%
случаи неотложной помощи	87,46%	63,11%	47,85%

На вопрос «Как вы приняли решение обратиться в больницу?», ответ анкетированных пациентов – по рекомендации лечащего врача – является преобладающей (56,20% – I квартал, 69,13% – II квартал, 61,29% – III квартал) за ним следует – личный выбор – максимум – 34,43% в I квартале (Диаграмма 1). Перевод пациентов из другой больницы: здесь процент снижается, варьируясь в интервале 4,63% – 11,20%.

На вопрос «Представился ли перед вами Ваш лечащий врач, проинформировал ли вас о вашем заболевании, объяснил ли вам, какие исследования необходимо провести, и существует ли риск в процессе проведения исследований?» (Диаграмма 2), положительные ответы варьируют в границах 95,34% – 96,90%, отрицательные ответы – незначительный процент (0,36% – 1,52%) , а от 2,51% до 2,53% отвечают «после того, как задал вопрос».

Хорошие бытовые и санитарные условия предполагают более высокий процент удовлетворенности пациентов качеством лечения. (Таблица 3). Положительные ответы варьируются в интервале 75,95% – 85,81%, а от 11,65:% до 20,22% анкетированные пациенты частично довольны санитарным уровнем клиник (Таблица 3) . Недовольных пациентов нет. Этот высокий показатель – результат усилий, направленных на повышение уровня санитарных условий, заключающийся в постоянных санитарных осмотрах, проведении серьезного

микробиологического контроля и ответственность старших медицинских специалистов за выполнение дезинфекционного плана.

Таблица 3

**Удовлетворены ли вы санитарно-бытовыми условиями и гигиеной
в больничной палате и клинике/отделении**

	I квартал	II квартал	III квартал
да	83,55%	75,95%	85,81%
нет	0,36%	1,64%	1,27%
частично	14,66%	20,22%	11,65%
без ответа	1,43%	2,19%	1,27%

Высокий процент положительных ответов за исследуемый период времени (95,70% – 97,49%) поддерживают дневной режим в клиниках (подъем, санитарные процедуры, завтрак, обход и т.д.).

Рост информированности пациентов – фактор, который ведет к повышению требований к качеству медицинской помощи. На вопрос «Как вы оцениваете уровень обслуживания со стороны персонала?» Ведущий ответ с динамикой за исследуемые кварталы 2021 год – «хорошее обслуживание» (31,97%-61,65%). За ним следует ответ «очень хорошее обслуживание» (24,04% – 34,41%). (Диаграмма 3)

Удовлетворенность проведенным лечением отмечают 96% пациентов. (Диаграмма 4). Число довольных пациентов варьируется от 1,64% до 3,80%.

Рекомендации прошедших лечение пациентов в адрес управляющего коллектива являются исключительно важными для дальнейшего повышения их удовлетворенности и качества обслуживания. (Диаграмма 5) Ведущим фактором, по их мнению, является улучшение санитарно-бытовых условий и гигиены в клиниках (35,48% – 48,61%) и предоставление информация о состоянии их здоровья (43,04% – 59,84%). Исключительно низкий процент анкетированных пациентов рекомендует улучшить отношение персонала, отвечающего за их лечение (1,09% – 2,87%).

Заключение

Обеспечение качества медицинских услуг при оказании помощи в стационаре является важным фактором и преимуществом медицинской организации при обслуживании пациентов. Постоянное усовершенствование создания, контроля, управления, оценки и предоставления качественной медицинской услуги стоят в основе деятельности всех пользующихся хорошей репутацией лечебных учреждений. Производство и предоставление более качественной медицинской услуги стимулирует отдельные больницы вести поиск все более новых методов лечения, оснащение клиники лучшей медицинской техникой, привлекая высококвалифицированных медицинских специалистов.

Проведенное анонимное анкетирование среди пациентов, находящихся на лечении в крупной больнице, подтверждает ряд закономерностей, связанных с качеством предлагаемых медицинских услуг. Удовлетворенность пациента проведенным лечением является комплексной. В основном пациент поступает в лечебное учреждение по рекомендации его лечащего (участкового) врача. Наряду с проведением диагностики и лечебного процесса важное место занимают и условия в соответствующем медицинском учреждении.

Хорошие санитарно-бытовые условия и гигиена, качество предлагаемого питания в зависимости от рекомендуемой диеты, чистота постельного белья имеют важное значение для пациентов. Высокий процент положительных ответов анкетировуемых пациентов – реальное выражение созданных условий в УМБАЛ «Св. Георги» Пловдив, несмотря на то, что процесс улучшения качества медицинской помощи в этом лечебном заведении продолжается. Роль управленческого персонала здесь играет немалую роль.

Список литературы

1. Баташки, Ил. Качество медицинского обслуживания в хирургических звеньях МБАЛ «Пловдив» АД. Докт. дисерт., Пловдив, 2004.
2. Борисов, В. Менеджмент качества обслуживания в сфере здравоохранения. Введение в организацию здравоохранения. София, 1995.
3. Борисов, В. Стратегическая организация здравоохранения – философия и практика. София, 2006, 320 с.
4. Веков Т. Удовлетворенность пациентов и врачей реформой в сфере здравоохранения и рекомендации ее управления. Медицинский менеджмент и политика в сфере здравоохранения 39, 2008, N 2, с. 19-26
5. Ганова-Йоловска М., Данова Н., Иванова Т., Големанова Ж. Удовлетворенность пациентов больничным лечением – сравнительный и методологический анализ. Социальная медицина 18, 2010, N 4, с. 17-21
6. Димитров И, Баташки И, Шопов Д, Танева Д, Стефанов Р. Модель управления качеством больничного обслуживания. Политика в сфере здравоохранения и менеджмент. 2009, бр. 4, 54-57
7. Димитров Ц, Петкова Д, Василева В, Шопов Д, Александрова М. Многофакторное влияние на качество медицинской помощи в одном больничном заведении. ASKLEPIOS, VII(XXVI), 2013, № 1, 77-80

8. Николова Р. Удовлетворенность пациента. Медицинский менеджмент и политика в сфере здравоохранения 33, 2002, N 3, с. 3-10
9. Петрова, Зл. Удовлетворенность пациента медицинскими услугами – компонент качества обслуживания в сфере здравоохранения. Менеджмент в сфере здравоохранения, 3, 2003, No 3, с. 11-14
10. Стоева Т., Баташки Д., Шопов Д., Барганова-Захаријева Я. Удовлетворенность пациента – залог качества лечебных заведений. Уход за больными, 2014, бр. 2, 15-18
11. Чанева Г. Удовлетворенность пациентов качеством ухода в больнице. Болгарский медицинский журнал, 2, 2008, N 1, с. 61-64.
12. Шопов Д, Торнева Б, Райкова Е. Психоклимат в больничных отделениях като фактор повышения качества медицинского обслуживания. Общая медицина 11, 2009, № 1, 30-34
13. Шопов Д, Торнџова Б, Черкезов Т. Исследование удовлетворенности пациентов качеством медицинского обслуживания. Уход за больными 41, 2009, № 1, 3-8
14. Шопов Д, Торнџова Б, Черкезов Т. Исследование удовлетворенности пациентов качеством медицинского обслуживания. Уход за больными 41, 2009 № 1, 3-8
15. Шопов Д. Больницы в их различных формах собственности на рынке медицинских услуг. Медицинский менеджмент и политика в сфере здравоохранения, 2015, 3-9
16. Шопов Д. Качество обслуживания – удовлетворенность пациентов. ASKLEPIOS, IX (XXIX), 2015, № 1, 87-92
17. Шопов Д. Универсальные элементы системы управления качеством в лечебных заведениях. Политика в сфере здравоохранения и менеджмент, 2008, бр. 6, 12-17
18. Шопов Д. Управление качества лечебных заведений. Общая медицина, 11, 2009 № 2, 25-27

19. Шопов Д., Стоева Т. Мнение пациента – индикатор качества обслуживания. Болгарский медицинский журнал, 2019, XIII, 1, 24-28
20. Shopov D., Mihaylova V., Stoeva T. HYGIENIC AND LIVING CONDITIONS IN HOSPITALS A FACTOR OF QUALITY OF TREATMENT. INTERNATIONAL RESEARCH JOURNAL. 2016, 7(49)3, 117-121
21. Shopov D., Mihaylova V., Stoeva T. PATIENTS' SATISFACTION – AN INDICATOR OF THE QUALITY OF MEDICAL SERVICES. INTERNATIONAL RESEARCH JOURNAL. 2016, 7(49)3, 121-125

УДК 579

Глава 4.

**ВЛИЯНИЕ ТЕХНОГЕНЕЗА НА АНТАГОНИСТИЧЕСКУЮ
АКТИВНОСТЬ МИКРОБНОГО СООБЩЕСТВА ПОЧВЫ**

Гусева Татьяна Михайловна

к.с/х.н., доцент

Головина Наталья Александровна

к.б.н.

Канина Ирина Владимировна

ФГБОУ ВО Рязанский государственный
медицинский университет имени И.П. Павлова

Аннотация: в ландшафтах с измененной антропогенезом биогеохимической структурой природные циклы техногенных элементов претерпели существенные изменения. Почва как компонент биогеоценоза испытывает мощнейший техногенный прессинг. Особенно подвержено негативному влиянию тяжелых металлов почвенное микробное сообщество, что существенно отражается на межпопуляционных взаимодействиях и антагонистической активности в отношении возбудителей инфекционных заболеваний человека.

Ключевые слова: техногенез, тяжелые металлы, почвенные микроорганизмы, антагонизм микробиоты, токсокары

INFLUENCE OF TECHNOGENESIS ON THE ANTAGONISTIC ACTIVITY OF THE SOIL MICROBIAL COMMUNITY

Guseva Tatyana Mikhailovna
Golovina Natalia Aleksandrovna
Kanina Irina Vladimirovna

Abstract: the natural cycles of technogenic elements have undergone significant changes in the landscapes with the biogeochemical structure changed by anthropogenesis. The soil as a component of the biogeocenosis experiences the most powerful technogenic pressure. The soil microbial community is particularly susceptible to the negative influence of heavy metals, which significantly affects the inter-population interactions and antagonistic activity against pathogens of infectious diseases.

Key words: technogenesis, heavy metals, soil microorganisms, microbiota antagonism, toxocars

1.1 Тяжелые металлы в биогеохимических циклах

В России сформировались экологически неблагополучные регионы, где сопротивляемость природных комплексов антропогенному прессингу исчерпана. Сложились ландшафты с измененной техногенезом биогеохимической структурой, в которых природные циклы техногенных элементов претерпели существенные изменения. В связи с этим, особое внимание следует уделять тяжелым металлам (ТМ) – токсикантам по отношению к живым организмам в целом и почвенной микрофлоре в частности. Главными антропогенными источниками поступления ТМ в атмосферу являются промышленные предприятия, нефтепереработка, автомобильный транспорт, химическая промышленность и др. Значительное количество поллютантов поступает в пределы ландшафтов из атмосферы.

Территория России, благодаря своему географическому положению, все время находится в условиях постоянно действующего атмосферного переноса загрязнителей из стран Западной, Центральной и Восточной Европы. Значительное количество атмосферных загрязнителей составляют ТМ, которые поступают в составе аэрозолей. Над крупными городами и индустриальными центрами располагаются участки тропосферы высотой до 3-4 км, загрязненные аэрозолями, которые оседают на поверхности почвы и представляют угрозу загрязнения растительности, поверхностных и почвенно-грунтовых вод, с которыми тесно связаны потоки веществ в почве [1, с. 335].

Одним из постоянно действующих биогеохимических факторов являются атмосферные осадки. ТМ присутствуют в атмосфере в составе мельчайших техногенных частиц. От всей массы выбросов, по мнению многих исследователей, только 20-30% фиксируется выпадениями, другая часть рассеивается и попадает в региональные и глобальные миграционные циклы. При сжигании бурого угля с летучей золой от ГРЭС, поступает ежегодно: Zn – 8,68 т, Pb – 2,6 т, Cu – 1,16 т, Ni – 1,56 т. Исследования влияния выбросов Рязанской ГРЭС на окружающую среду показали превышение ПДК в почве валовых форм ТМ на 56 (свинец) – 100 (марганец)%. В процессе работы промышленных предприятий и животноводческих комплексов образуются сточные воды, которые сбрасываются непосредственно в водоемы, и в большинстве случаев, без достаточной очистки. От различных производств в поверхностные водотоки поступает в мг/л: Cr – 0,01, Cu – 0,01-0,2, Zn – 0,05-0,2, As – 0,003, Sr – 0,05-1,0, Cd – 0,005-0,025, Hg – 0,001-0,005, Pb- 0,005 [2, с. 10].

От автомобильного транспорта в окружающую среду поступает значительное количество ТМ. При поступлении свинца от автотранспорта загрязняется полоса почвы шириной 50-100 и иногда до 300 м. Основное его количество концентрируется в слое 0-10 см [3, с. 302].

Таким образом, антропогенная нагрузка на биосферу становится постоянно действующим экологическим фактором. Техногенные загрязнители, поступающие из различных источников на культурные ландшафты, оказывают негативное влияние на все его компоненты, но особенно уязвима микробиота. Поступающие в почву ТМ претерпевают ряд химических превращений, в ходе которых их токсичность изменяется в очень широких пределах. Основными почвенно-экологическими факторами, определяющими подвижность и миграционную способность ТМ, являются: содержание гумуса, кислотность почв, гранулометрический и минералогический состав, плотность почвы, окислительно-восстановительные условия, макро- и микроэлементный состав. Значительной миграционной способностью и подвижностью обладают в кислой среде Co, Cu, Cd, Ni, Zn, Pb. При уменьшении pH на 2 единицы увеличивается подвижность меди в 2-3 раза, цинка – в 3,8-5,4 раза, кадмия – в 4-8 раз, свинца – в 3-6 раз [4, с. 2683, 5, с. 25].

ТМ отрицательно воздействуют на почвенные микроорганизмы, нарушая ферментно-белковую систему клетки, вызывают нарушение концентраций веществ, необходимых для энергетического метаболизма – АТФ, АДФ, изменяют активность ферментов, уровень содержания в клетках биогенных элементов, необходимых для нормального функционирования микроорганизма. Такие ТМ как: Hg, Pb, Cd, As, Cu, V, Zn, Mo, Co, Ni, Sn, Sb – признаны приоритетными загрязнителями по степени токсичности, распространенности и способности накапливаться в пищевых цепях. По чувствительности микробиоты металлы можно расположить в следующий ряд: Hg>Cu>Zn>Ni>Pb>Cd>Cr>Sn>Fe>Mn>Al. Для каждого ТМ существует свой механизм токсического действия, но в основном, в повышенных концентрациях, ТМ являются тиоловыми ядами, воздействующими на отдельные этапы углеводно-фосфатного и аминокислотного обмена. Они способны связывать сульфгидрильные группы, являющиеся активными

центрами многих ферментов, при этом происходит ингибирование или полное прекращение окислительно-восстановительных реакций в клетках [6, с. 125].

Катионы тяжелых металлов взаимодействуют с различными электрондонорными группами в составе многих органических соединений, образуя комплексы с гидроксильными, карбоксильными, фосфатными и аминогруппами, а также ковалентные связи с сульфгидрильными группами белков. Токсическое действие тяжелых металлов носит неспецифический характер, они негативно воздействуют на все вещества, участвующие в клеточном метаболизме почвенной микробиоты. ТМ способны взаимодействовать с активными центрами ферментов микроорганизмов или замещать в них отдельные ионы, что неизбежно приводит к ингибированию их активности. Загрязнение почвы тяжелыми металлами приводит к изменению не только бактериальных, но и грибных сообществ, что проявляется снижением видового разнообразия. Доминируют виды грибов, толерантных к металлам, по сравнению с сообществами сходных почв из географических районов, не загрязненных металлами, но частично утративших свою антагонистическую активность в отношении патогенной микрофлоры, опасной в эпидемическом отношении [7, с. 8].

Установлено, что под влиянием техногенного стресса представители рода *Penicillium* синтезируют не свойственные им наборы вторичных метаболитов, отличающиеся от ранее известных. Это микотоксины: а-циклопиазоновая кислота, клавиновые эргоалкалоиды, являющиеся крайне опасными для человека и животных. В сложных экологических условиях с увеличением влияния техногенного прессинга на агробиоценозы могут произойти изменения в их структуре. Установлено, что при воздействиях ТМ у сапрофитных грибов рода *Fusarium* возрастает приспособление к паразитическому образу жизни. Влияние тяжелых металлов, ингибирующее рост и жизнеспособность микроорганизмов наблюдается в следующих диапазонах концентраций: Hg,

органортутные соединения и Ag – 10^{-6} - 10^{-8} М; Cd, Co, Cu, Pb, Ni, Zn для бактерий – 10^{-6} - 10^{-4} М (исключение составляют цианобактерии – 10^{-7} - 10^{-6} М и тионовые бактерии – 10^{-3} - 10^{-2} М); для грибов этот диапазон в основном равен 10^{-3} - 10^{-2} М. Наиболее устойчивыми представителями микробиоты к действию ТМ являются грибы и тионовые бактерии. Грамположительные виды бактерий более чувствительны к действию Hg и Cd, чем грамотрицательные [7, с. 11].

Негативные изменения, происходящие у микроорганизмов, в основном связаны с морфологией клеток. При жизнедеятельности микроорганизмов в почвах, характеризующихся высокой концентрацией тяжелых металлов, отмечается увеличение размера клеток, аналогично эффекту при действии других неблагоприятных химических и физических факторов. Некоторые бактерии принимают нехарактерные для них формы, так клетки энтеробактерий становятся нитевидными. В основном эти нарушения, обусловленные ТМ, связаны с разобщением процессов роста и деления клеток. Тяжелые металлы могут вызывать разнообразные нарушения в ультраструктуре клеток: появление включений, дополнительных глобул липидов, уменьшение числа рибосом и другие. Значительные изменения вызывает действие тяжелых металлов на цитоплазматическую мембрану. Они связаны, прежде всего, с нарушением их функций, что ведет к потере клетками аминокислот, нуклеотидов, ингибированию транспортных процессов и т.д. [7, с. 12].

Нарушение нормального функционирования почвенной микробиоты существенно снижает ее антагонистическую функцию в отношении некоторых возбудителей инфекционных заболеваний, способных к жизнедеятельности в объектах окружающей среды, в частности в почве.

ТМ представляют серьезную опасность для окружающей среды и здоровья человека. Исследования, проводимые в этой области, имеют несомненное эколого-эпидемиологическое значение.

1.2. Влияние неблагоприятных воздействий (тяжелых металлов) на почвенную микробиоту

Загрязнение почвы отражается в первую очередь на состоянии живого вещества, в частности на микробиоценозе, как наиболее чувствительном компоненте почвенной экосистемы [8, с. 75]. Продолжительность нарушения при антропогенных воздействиях значительно больше, чем при природных, что увеличивает их опасность для почвенного микробного сообщества и почвы в целом [9, с. 581].

Говоря об антропогенном воздействии на биоту, следует упомянуть, что многие металлы в микроконцентрациях необходимы для жизнедеятельности почвенной биоты (Zn, Cu, Mn, Co, Cr и др.), однако в больших концентрациях они становятся токсичными, а ряд металлов высокотоксичны в малых концентрациях (Ag, Pb, Hg, Cd и др.) и могут, так или иначе, влиять на биоценозы. [10, с. 8].

Токсическое действие тяжелых металлов на микроорганизмы проявляется, главным образом, в нарушении их метаболизма: ингибируется активность ферментов, изменяется проницаемость клеточных мембран и т.д. В большей степени чувствительны к загрязнению аммонифицирующие, олигонитрофные, коринеподобные и некоторые споровые бактерии; в меньшей степени – целлюлозолитические бактерии и бактерии, использующие минеральный азот; наиболее чувствительны микроскопические грибы [11, с. 1510].

Одной из главных причин устойчивости почвы к неблагоприятным воздействиям является наличие в ней «избыточной» микробной биомассы [12, с. 208] в сочетании с избыточным видовым разнообразием микроорганизмов [13, с. 16]. В более плодородной почве как раз создаются условия для своего рода «резервирования» микробиологической деятельности, на что косвенно могут указывать количественные методы анализа. Рассмотрим

это в условиях загрязнения почвы тяжелыми металлами – кадмием, цинком и медью.

Объектом исследования служила агросерая почва Рязанской области разной степени плодородности. Плодородная почва содержала 5,4% гумуса, неплодородная – 2,2-2,5%. В опыте имитировали загрязнение почвы тяжелыми металлами.

Загрязнение почвы кадмием производили из расчета 10,30 и 100 ПДК. Экспозиция составляла 1, 10, 35 и 57 суток. Микробная биомасса при всех предложенных концентрациях кадмия в почве была наибольшей в плодородной почве: при фоновой концентрации она составила для 1 сут. – 1187 мкг С/г почвы, 10 сут. – 1590, 35 – 1005 и 57 – 891 мкг С/г почвы, что соответственно на 540; 761; 541 и 554 мкг С/г почвы больше неплодородного варианта. При этом разница между вариантами по мере нарастания загрязнения увеличивалась: в 1 сут. для 10 ПДК она составила 658; 30 ПДК – 667 и 100 ПДК – 710 мкг С/г почвы [14, с. 5]. В первые сутки в плодородном варианте угнетения жизнедеятельности микроорганизмов вообще не произошло, в отличие от неплодородного варианта, так как величина микробной биомассы при указанных концентрациях кадмия была выше фоновой концентрации. За весь фиксированный временной интервал и дозы загрязнения кадмием в плодородной почве величина микробной биомассы была больше, чем в неплодородной почве.

Для изучения влияния цинка на активность азотобактера в агросерую почву вносили 50 и 100 мкг/кг металла.

Снижение численности азотобактера предлагается считать главным критерием оценки токсичности почвы и антропогенных воздействий [15, с. 207].

Загрязнение почвы приводит к ослаблению использования почвенной микрофлорой атмосферного азота. Косвенно об этом можно судить по проценту обрастания почвенных комочков азотобактером, который существенно

снижался в неплодородной почве. Так, если на фоне он составил 100%, то при концентрации подвижного цинка 30 мг/кг – 24%, 70 мг/кг – 12%. В плодородной почве угнетение жизнедеятельности произошло в меньшей степени.

Агросерую почву загрязняли медью из расчета 300 кг/га. Для оценки микробиологической устойчивости рассчитывали коэффициент микробиологического сопротивления (КМС). Увеличение концентрации меди в неплодородной почве привело к снижению численности бактерий, использующих азот органических веществ соответственно на $5,87 \cdot 10^6$ КОЕ/г, нитрифицирующих бактерий на 3,32, целлюлозоразрушающих бактерий на $2,94 \cdot 10^6$ КОЕ/г. Значения КМС составили для фактора загрязнения соответственно по группам микроорганизмов 0,6; 0,2; 0,6. В плодородной почве уменьшение указанных групп микроорганизмов проявилось в меньшей степени, а активность некоторых групп вообще не изменилась.

Значения КМС позволяют заключить, что в неплодородной почве все микроорганизмы, за исключением грибов и актиномицетов, весьма чувствительны к неблагоприятным проявлениям загрязнения почвы. В плодородной агросерой почве заметного угнетения микроорганизмов не наблюдалось.

Также было изучено влияние нескольких уровней загрязнения агросерой почвы медью на численность микроорганизмов. Установлено, что за счет закрепления плодородной почвой большего количества меди, активность большинства микроорганизмов во всем диапазоне загрязнения была выше, чем в неплодородной почве. При отсутствии имитационного загрязнения почвы медью общее количество микроорганизмов (без денитрификаторов) на пашне составило $75,4 \cdot 10^6$ КОЕ/г, под лугом – 69,3 и лесом $81,6 \cdot 10^6$ КОЕ/г.

Внесенная медь вызвала угнетение жизнедеятельности большинства групп микроорганизмов. В пахотной почве при дозе меди, соответствующей 30-50 ПДК резко сократилась численность микроорганизмов, использующих

минеральные формы азота – на 78-82 %, целлюлозоразрушающих и нитрифицирующих бактерий – соответственно на 58-93 % и 55-89 %. В результате общая численность уменьшилась на $41,7-46,3 \cdot 10^6$ КОЕ/г. В почве под лугом численность микроорганизмов по сравнению с фоновой незагрязненной почвой сократилась незначительно – на $7,5-17,8 \cdot 10^6$ КОЕ/г.

Микробиологические исследования агросерой почвы разных экосистем могут свидетельствовать о следующем: наибольшей микробиологической устойчивостью к загрязнению тяжелыми металлами (кадмием, цинком и медью) отличается почва, находящаяся под лесом.

1.3 Влияние ризосферного эффекта техногенно-изменённых почв на диссеминацию яиц геогельминтов

По данным Всемирной организации здравоохранения геогельминтозы занимают одно из лидирующих мест по степени ущерба, наносимого здоровью населения. Паразитарные инвазии широко распространены в окружающей среде. Известно более 250 видов гельминтов, паразитирующих у человека. При некоторых инвазиях человек становится случайным хозяином паразиту, к их числу относятся круглые черви семейства *Anisakidae* – токсокары, возбудители токсокароза [16, с.12].

Передача инвазии осуществляется геооральным путём. Жизненный цикл паразита довольно сложный и возбудитель претерпевает несколько стадий развития в организме разных хозяев. Человек является паратеническим хозяином, половозрелой стадии гельминт в организме не достигает. Из яиц токсокар, попавших с частицами почвы, образуются личинки. Они инвазируют слизистую оболочку тонкого кишечника и попадают в кровоток – мигрирующая личинка. Личинки могут локализоваться в различных органах и тканях, при этом инкапсулируются и формируют паразитарные гранулёмы. У животных семейства псовых определяется основной цикл развития. При этом личинки токсокар претерпевают полную миграцию с выделением неинвазионных яиц в почву с фекалиями. Дальнейшее развитие яиц происходит

в почве. В течение месяца при благоприятных условиях яйца в почве достигают инвазионной стадии [17, с. 26].

Таким образом, особенности жизненного цикла гельминтов (наличие одной стадии развития в почве и воде) определяет воздействие на них ряда сочетанных антропогенных и экологических факторов. Одним из основополагающих факторов является прямое или косвенное биологическое воздействие живых организмов в процессе их жизнедеятельности. Среди них: как растительные, так и животные организмы: грибы, бактерии, корневая система цветковых растений.

Из объектов внешней среды наибольшая интенсивность загрязнения характерна для почвы – места временного хранения инвазионного начала геогельминтов, их естественного резервуара.

Корни растений в процессе жизнедеятельности последних потребляют из почвы питательные вещества и, в свою очередь, выделяют в нее продукты метаболизма, которые способны оказывать как стимулирующее, так и ингибирующее влияние на яйца геогельминтов.

Совокупность корневой системы с почвой представляет сложную экологическую нишу, заселенную полезными, нейтральными для растений микроорганизмами. Корневые экссудаты представляют собой низкомолекулярные органические вещества, продукты фотосинтеза и метаболизма (сахара, органические и аминокислоты, спирты, гормоны, витамины и др.). Эти вещества «вытекают» из зоны растяжения корня в процессе его роста и развития. Данный обмен оказывает большое влияние на почвенную среду, прилегающую к корням. Считают, например, что корни увеличивают кислотность примыкающих к ним микрослоев почвы за счет выделения углекислоты и H^+ ионов. Активное выделение корнями растений в окружающую среду различных органических соединений обеспечивает питательными веществами почвенные микроорганизмы, что создает благоприятные условия для их существования в зонах ризосферы и ризопланы.

Ризосферный эффект более ярко выражен в песчаных почвах и менее — в гумусных. В любой почве изменения окружающей среды, включая агротехнические мероприятия, оказывают меньшее воздействие на микроорганизмы в ризосфере по сравнению с обитателями почвы. Ризосферная зона представляет собой своеобразную «буферную» систему, препятствующую воздействию среды на микрофлору [17, с. 24].

Населяющие ризосферу и ризоплану бактерии образуют с корневой системой растений прочные ассоциации и формируют специфические ризосферные бактериальные сообщества. Изменения в взаимоотношениях ассоциатов происходят под воздействием ряда техногенных факторов, что неизбежно сказывается на диссеминации яиц гельминтов в прикорневых зонах растений.

Почвенные микроскопические грибы являются наиболее значимым функциональным компонентом почвенной биоты. Комплексы этих грибов в ненарушенных экосистемах осуществляют полную минерализацию растительных остатков и других органических компонентов. Организация этих комплексов в значительной степени изменяется при антропогенном воздействии [18, с. 22]. При этом стабильность структуры комплекса почвенных грибов также нарушается в геометрической прогрессии.

Нематофаговые грибы являются естественными антагонистами нематод. Эти грибы локализуются в органическом веществе почвы, где развивают паразитические или хищнические отношения с нематодами и классифицируются как оппортунистические (овицидные), эндопаразиты и хищники. Они обладают активностью, направленной на паразитировании в яйцах и личинках геогельминтов, живущих вне хозяев, и становятся все более популярными, снижая уровень загрязнения окружающей среды. Их овицидная активность характеризуется проникновением гаусториальных гифов в яичную скорлупу через поры вителлинового слоя, что изменяет проницаемость скорлупы и расширение ее объема. Таким образом, динамическая система

внутри скорлупы нарушается, что приводит к гибели клетки и её отмиранию [19, с. 128].

Хищные грибы имеют в почве свою экологическую нишу, трофически связанную с нематодами. Механизм хищничества, возникший в результате длительной сопряженной эволюции, независимо от типа ловушки (клейкие петли или головки, сжимающиеся кольца и т.д.) включает выделение аттрактантов и токсических веществ, проникновение гифы гриба внутрь тела парализованной нематоды, выделение ферментов и антибиотиков для эффективной утилизации жертвы и предотвращения развития конкурирующих микроорганизмов.

Проведенные исследования носят поисковый характер, результаты их еще далеки от выхода в практику, однако представляют определенную научно-теоретическую ценность. Предположения, что яйца гельминтов могут подвергаться губительному действию со стороны почвенной флоры и фауны, находят все больше конкретных подтверждений в условиях эксперимента [19, с. 130]. Выявлен ряд организмов, вызывающих гибель яиц гельминтов; не подлежит сомнению перспективность работ по выявлению естественных врагов яиц гельминтов [18, с. 25].

Таким образом, вышеперечисленные биотические факторы влияют на жизнеспособность яиц, находящихся в окружающей среде, которая сохраняется в течение многих лет, что объясняет высокую вероятность заражения хозяев. Загрязненная окружающая среда представляет основной риск для здоровья человека и животных при данных заболеваниях. Предотвращение первоначального загрязнения и изучение факторов, вызывающих гибель яиц и личинок паразитов в окружающей среде является важным способом избежать заражения людей и животных.

Список литературы

1. Нейтрализация загрязненных почв: монография / Под общ. ред. Ю.А. Мажайского. – Рязань: Мещерский филиал ГНУ ВНИИГиМ Россельхозакадемии, – 2008. – 528 с.
2. Мажайский Ю.А. Агроэкология техногенно загрязненных ландшафтов: монография / Мажайский Ю.А., Тобратов С.А., Дубенок Н.Н., Пожогин Ю.П. – Смоленск: Маджента, 2003. – 384 с.
1. 3. Экологические аспекты мелиорации земель юга Нечерноземья / Под общ. ред. Ю.А. Мажайского, В.И. Желязко. – М: Издательство МГУ, – 2003. – 319 с.
3. Zubarev V.A., Mazhaysky Yu.A., Guseva T.M. The impact of drainage eclamation on the components of agricultural landscapes of small rivers // Agronomy Research. – 2020. – 18(4). – P. 2677 2686.
4. Гусева Т.М. Экологические аспекты производства качественной сельскохозяйственной продукции на техногенно загрязненных почвах // Актуальные вопросы в науке и практике. – Сборник статей по материалам XIV международной научно-практической конференции. – 2019. – Часть 1(3). – с. 23-26.
5. Гусева Т.М., Евдокимова О.В., Канина И.В. Микроорганизмы – биологические индикаторы безопасности объектов внешней среды // Научная жизнь. – 2017. – № 11. – с.120-127.
6. Багаева Т.В., Ионова Н.Э., Надеева Г.В. Микробиологическая ремедиация природных систем от тяжелых металлов: учеб-метод. пособие. – Казань: Казанский университет, – 2013. – 56 с.
7. Благодатская Е.В., Пампура Т.В., Богомолова И.Н.. Влияние загрязнения соединениями свинца на микробиологическую активность серой лесной почвы под сеяным лугом // Агрохимия. 2003. – № 4. – с. 74-78.

8. Ананьева Н.Д., Благодатская Е.В., Демкина Т.С. Оценка устойчивости микробных комплексов почв к природным и антропогенным воздействиям // Почвоведение. 2002. – № 5. – с. 580-587.
9. Багаева Т.В. Микробиологическая ремедиация природных систем от тяжелых металлов: учеб.-метод. пособие / Т.В. Багаева, Н.Э. Ионова, Г.В. Надеева. – Казань: Казанский университет, 2013. – 56 с.
10. Колесников С.И., Казеев К.Ш., Вальков В.Ф. Экологические функции почв и влияние на них загрязнения тяжелыми металлами // Почвоведение. 2002. – № 12. – с. 1509-1514.
11. Полянская Л.М., Лукин С.М., Звягинцев Д.Г. Изменение состава микробной биомассы в почве при окультуривании // Почвоведение. 1997. – № 2. – с. 206-212.
12. Звягинцев Д.Г. Перспективы развития биологии / Д.Г. Звягинцев // Труды Всероссийской конференции «Перспективы развития почвенной биологии». М., 2001. – с. 10-21.
13. Ушаков Р.Н., Головина Н.А., Старцева А.А. Биодиагностика плодородия серой лесной почвы // Аграрная наука. – № 5. – 2016. – с. 4-6.
14. Свирскене А. Микробиологические и биохимические показатели при оценке антропогенного воздействия на почвы // Почвоведение. 2003. – № 2. – с. 202-210.
15. Пискун, Т.А. Токоскароз у детей: учебное пособие / Т.А. Пискун, Н.И. Якимович, Д.Д. Мирутко. – Минск: БГМУ, 2009. – 27 с.
16. Канина И.В., Новак А.И., Новак М.Д. Получение антигенных препаратов из личинок *Toxocara canis*, их применение в диагностике токсокароза человека // Клинические лабораторные исследования. Современные стандарты, перспективы развития. – Материалы межрегиональной научно-практической конференции. – 2020. – с. 24-27.
17. Теплякова Т.В. Биоэкологические аспекты изучения и использования хищных грибов гифомицетов // Биологическая защита растений, перспективы и

роль в фитосанитарном оздоровлении агроценозов и получении экологически безопасной сельскохозяйственной продукции. – Материалы научно-практической конференции. – Новосибирск. – 1999. – с. 252.

18. Марфенина, О.Е. Основные направления оценки антропогенных изменений структуры комплексов почвенных микроскопических грибов. Анализ итогов исследований // Проблемы лесной фитопатологии и микологии: Сб. материалов VII Междунар. конф. – Пермь: Издво ПГПУ. – 2009. – с. 128-131.

© Т.М. Гусева, Н.А. Головина, И.В. Канина, 2021

РАЗДЕЛ II.

ДИССЕМИНАЦИЯ ИННОВАЦИОННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОПЫТА

УДК 622.276:658.562

Глава 5.

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ ПРИ МЕЖДУНАРОДНОМ АУДИТЕ ЗАПАСОВ УГЛЕВОДОРОДОВ

Галкин Сергей Владиславович

доктор геолого-минералогических наук, профессор

декан горно-нефтяного факультета

Пермский национальный исследовательский

политехнический университет

Аннотация: Рассмотрено современное состояние проблемы аудита запасов углеводородов в России и за рубежом. Проведен сравнительный анализ используемых классификаций запасов нефти и газа, методов оценки коэффициентов извлечения нефти. Рассмотрены методические подходы оценки остаточных извлекаемых запасов нефти на различных стадиях эксплуатации месторождений.

Ключевые слова: запасы нефти и газа, категории запасов углеводородов, коэффициент извлечения нефти, аудит запасов, экономического предела рентабельности добычи

ANALYSIS OF MODERN METHODOLOGICAL APPROACHES DURING INTERNATIONAL AUDIT OF HYDROCARBON RESERVES

Galkin Sergey Vladislavovich

Abstract: The current state of the problem of audit of hydrocarbon reserves in Russia and abroad is considered. A comparative analysis of the used classifications of oil and gas reserves, methods for assessing oil recovery factors has been carried out. Methodological approaches to assessing residual recoverable oil reserves at various stages of field exploitation are considered.

Key words: oil and gas reserves, categories of hydrocarbon reserves, oil recovery factor, audit of reserves, economic margin of production profitability

На настоящий момент в России действует категоризация ресурсов и запасов углеводородного сырья (Приказ МПР РФ от 01.11.2013 г.). Согласно данному руководящему документу главным принципом категоризации запасов является изученность эксплуатационных объектов [1, с. 90]. На подсчитанные величины ресурсов и запасов влияют объем и качество информации, полученной при поисковых и разведочных работах и разработке, а также применяемые методы подсчета.

Границей разделяющей ресурсы от запасов является факт выявления залежей на основе получения промышленного притока углеводородов. Ресурсы нефти, газа и конденсата по степени геологической изученности подразделяются на категории: D2 (прогнозируемые), D1 (перспективные), D_л (локализованные), D0 (подготовленные).

К категории D2 относятся ресурсы нефти, газа и конденсата литолого-стратиграфических комплексов, оцениваемые в пределах крупных

региональных структур, промышленная нефтегазоносность которых еще не доказана.

Категория D1 – ресурсы нефти, газа и конденсата литолого-стратиграфических комплексов и горизонтов с промышленной нефтегазоносностью, доказанной в пределах крупных региональных структур.

Категория D_л – ресурсы нефти, газа и конденсата возможно продуктивных пластов в ловушках, выявленных по результатам поисковых геологических и геофизических исследований в пределах районов с доказанной промышленной нефтегазоносностью.

Категория D0 (подготовленные) – ресурсы нефти, газа и конденсата возможно продуктивных пластов в подготовленных к бурению ловушках в районах с доказанной промышленной нефтегазоносностью или в невоскрешенных бурением продуктивных пластах открытых месторождений. Форма, размеры и условия залегания предполагаемых залежей определены по результатам геолого-геофизических исследований (сейсморазведка 2D и 3D). Подготовленные ресурсы категории D0 отражают возможность открытия новых залежей нефти. Перспективные ресурсы нефти и газа используются при планировании поисковых и разведочных работ и прироста запасов категорий C₁ и C₂.

По степени изученности запасы углеводородов, имеющих промышленное значение, подразделяются на оцененные по категории C2 и промышленные (разведанные) категории A, B1, B2, C1.

К категориям C2 и C1 относят запасы месторождений углеводородов, для которых к текущему моменту нет утвержденного технологического документа на их разработку. При этом к категории C2 относят запасы, наличие которых обосновано данными геологических и геофизических исследований в неразведанных частях залежи, примыкающих к участкам с запасами более высоких категорий или в промежуточных и вышележающих неопробованных пластах разведанных месторождений.

К категории С1 относят запасы залежи, нефтегазоносность которой установлена на основании полученных в скважинах промышленных притоков нефти или газа и положительных результатов геологических и геофизических исследований в неопробованных скважинах. Запасы категории С1 подсчитываются по результатам геолого-разведочных работ и эксплуатационного бурения и должны быть изучены в степени, обеспечивающей получение исходных данных для составления технологической схемы разработки месторождения.

После составления и утверждения технологического документа запасы переходят в категорию В. При этом в случае низкой изученности какого-либо участка залежи или всей залежи (уровень изученности как для С2) запасы получают категорию В2. Для запасов оцененных на основании полученных промышленных притоков нефти или газа в скважинах на различных гипсометрических отметках присваивается категория В1.

К категории А относят запасы залежей, изученных с детальностью, обеспечивающей полное определение типа, формы и размеров залежи, эффективной нефте- и газонасыщенной толщины, типа коллектора, состава и свойств нефти, газа и конденсата. Запасы по категории А подсчитываются по залежи, разбуренной в соответствии с утвержденным проектом разработки месторождения.

На рис. 1 приведены схемы выделения категорийности запасов для разрабатываемой на основе технологического документа (см. рис. 1. а) и разведываемой (см. рис. 1. б) залежей нефти.

Рис. 1. Выделения категорий запасов А, В1, В2, С1,С2 по российской классификации для разрабатываемой (а) и разведанной (б) залежи

Вместе с тем ценность нефтегазодобывающей компании состоит не в физическом объеме средств, которые она имеет, а в денежном эквиваленте. Основными активами нефтяной компании являются запасы нефти, они должны оцениваться по единой линейке ценностей – общепринятым мировым стандартам. Нефтегазовые компании ежегодно представляет данные о своих запасах на международные фондовые биржи для оценки стоимости акций [2, с. 11]. Это выполняется в рамках проведения геолого-экономической оценкой запасов (ГЭОЗ) по международным стандартам. Результаты ГЭОЗ используется в финансовой отчетности компании, а также при оперативном контроле состояния запасов и при стратегическом планировании.

Международный аудит запасов проводится: на основании лицензии в границах горных отводов; при наличии утвержденного проектного документа; по государственным правовым актам; с учетом долевого участия компании в разработке месторождений; с учетом возможности сбыта запасов (продажи).

Наиболее распространенной в мировой нефтегазовой промышленности является система управления ресурсами и запасами углеводородов SPE-PRMS (Petroleum Resources Management System). Классификация, разработана в 1997 году Обществом инженеров-нефтяников (Society of Petroleum Engineers, SPE) совместно с Мировым нефтяным конгрессом (World Petroleum Congress, WPC) и Американской ассоциацией геологов-нефтяников (AAPG).

Стандарты SPE-PRMS не только оценивают вероятность присутствия нефти в месторождении, но и учитывают экономическую эффективность извлечения этих запасов. При определении эффективности учитываются такие факторы, как затраты на разведку и бурение, транспортировку, налоги, существующие цены на нефть и многие другие.

По данной классификации запасы делятся на категории: доказанные (P1), вероятные (P2), возможные (P3). В зависимости от оценки шансов их извлечения у доказанных запасов шанс быть добытыми равняется 90%, у вероятных – 50%, а у возможных – 10%.

Доказанные запасы включают весь достоверно обоснованный объем нефти, который может быть извлечен из данного месторождения в будущие годы. Стоимость P1 составляет 50-70 \$/бб. P1 – запасы пределах зон дренирования скважин (при стоимости нефти 100 \$/бб).

Доказанные запасы разделяют на подготовленные и неподготовленные (по отношению к их разработке). Ожидается, что подготовленные запасы будут извлечены существующим фондом скважин, включая неперфорированные. Подготовленные запасы разбиты на две подкатегории: разрабатываемые и неразрабатываемые.

Доказанные разрабатываемые добываемые запасы PDP (Proved Developed Producing) будут извлечены из освоенных интервалов, которые вскрыты и работают на момент оценки. Запасы, которые получают за счет усовершенствования методов извлечения (фактически это ГТМ) входят в эту категорию только после ввода такого проекта в действие.

Доказанные разрабатываемые недобываемые запасы PDNP (Proved Developed Non-Producing) будут извлечены из освоенных интервалов, вскрытых на момент оценки, но отбор, из которых еще не начался; скважин, закрытых из-за низкой цены на нефть или ввиду отсутствия соединения с трубой; скважин, неспособных добывать по техническим причинам.

Во всех случаях потребуются дополнительные работы для повторного освоения данных запасов перед вводом скважин в эксплуатацию. Предполагается, что это потребует лишь «незначительных» капитальных затрат. Запасы PDNP являются наименее выработанными, и поэтому для нефтегазовых компаний являются основным потенциалом для увеличения своей ресурсной базы

Добыча доказанных неразрабатываемых запасов PUD (Proved Undeveloped Reserves) предусматривается из будущих скважин, под бурение которых запланированы средства на бурение согласно плану разработки, который уже начат к реализации. Запасы категории PUD будут извлечены:

- из скважин на неразбуренных площадях, в том числе на площадях, где потребуются проводить относительно большие затраты на повторное освоение, установку оборудования по добыче или транспортировке продукции;
- за счет углубления существующих скважин до нижележащих пластов-коллекторов.

Вероятностные запасы (P2) – это запасы, в рентабельной добыче которых уверены на 50%. Эти запасы делятся на две подкатегории:

- 1) Вероятные от бурения – запасы в пределах неразбуренных площадей месторождений на значительном удалении от существующих скважин; участков с проведенной сейсморазведкой; запасы в пределах площадей с низкими дебитами добычи. Т.е. эти запасы будут доказаны последовательным разбуриванием.

2) Вероятные от дополнительной добычи – запасы, которые предполагается извлечь за счет совершенствования системы заводнения, внедрения методов повышения нефтеотдачи пласта или осуществления ГТМ.

Добыча вероятных запасов планируется за счет усовершенствования существующих методов извлечения при условии экономической целесообразности. Все это требует времени, дополнительных исследований и промысловых испытаний, чтобы поднять уровень вероятной рентабельности добычи до 90%. Теоретически эти запасы должны совпадать с показателями, заложенными в бизнес-план компании, но в их отношении может не быть инвестиционных обязательств. Стоимость P2 составляет 15-30 \$/бб (при стоимости нефти 100 \$/бб).

Возможные (P3) – это запасы, в рентабельной добыче которых уверены на 10%. Они могут включать:

- запасы в пластах, выглядящих нефтеносными по данным керна и каротажа, из которых можно не получить промышленных дебитов или рентабельность разработки которых вызывает сомнения;
- запасы, которые могут быть добыты при внедрении не опробованных к настоящему времени технологий;
- разбуривание месторождений значительно удаленных от объектов инфраструктуры (трубопроводов), где в настоящее время отсутствуют планы их строительства;
- разбуривание площадей, где в настоящее время добыча нерентабельна.

Компания никогда не станет планировать добычу запасов P3, так как имеется лишь 10%-я доля уверенности в рентабельной добыче запасов. Стоимость P3 крайне низка и составляет 0,2-1 \$/бб (при стоимости нефти 100 \$/бб).

Стандарты SEC были разработаны американской Комиссией по рынку ценных бумаг и биржам (Securities and Exchange Commission, SEC). В ней

учитываются только доказанные запасы. SEC не рассматривает категории вероятных и возможных запасов.

Стандарт SEC предъявляет более жесткие чем SPE-PRMS требования к наличию 90%-й уверенности в рентабельной добыче сырья. Категории доказанных разрабатываемых запасов (PDP и PDNP) по SPE и SEC одинаковы. Основные отличия лежат в плоскости доказанных неразрабатываемых запасов (PUD). SEC требует более строгих доказательств «гарантированной добычи» запасов PUD.

В классификации SEC разработка доказанных запасов ограничена по сроку действия лицензии на разработку месторождения. Нефтяные залежи не могут классифицироваться как запасы, если их извлечение планируется после окончания действия лицензии.

При большой удаленности запасов от существующих скважин. Доказанные неразрабатываемые запасы могут быть подсчитаны только на площади, отстоящей не более, чем на один шаг разработки от края зоны дренирования существующих скважин, причем на всех этих скважинах в ходе испытаний должен быть получен рентабельный дебит. Доказательством может служить наличие зоны интерференции, подтверждаемой в ходе длительного испытания скважины на приток. Это формулируется как соблюдение правила «одного участка разработки, смежного с дренируемым» (см. рис.2). Стандарт SPE-PRMS же допускает косвенные доказательства пределов рентабельной разработки коллектора, определенных главным образом на основе данных сейсмической разведки интерпретации и геофизических исследований скважин.

Различия классификаций SPE-PRMS и SEC также наблюдаются при установлении водонефтяного (ВНК) и газонефтяного (ГНК) контактов. В классификации SEC обоснованием ВНК и ГНК могут считаться только результаты фактических испытаний скважин на приток. Стандарт SPE-PRMS считает достаточными для доказательства выводы о границах контактов,

сделанные на основе замеров пластового давления (гидродинамического каротажа).

Различны в стандартах SPE-PRMS и SEC также методические подходы к обоснованию увеличения запасов углеводородов от внедрения методов повышения нефтеизвлечения. SEC требует наличия реального проекта опытно-промышленной эксплуатации, в ходе которого в течение длительного времени (не менее 6 месяцев) обеспечивается дополнительная добыча нефти. Исключение допускается только в случае, если имеется объект-аналог, разрабатываемый на соседнем месторождении.

Рис. 2. Сравнение методических подходов оценки запасов категории PUD по классификациям SPE-PRMS и SEC

Возможность использования принципа аналогии является общим правилом международных классификаций. Пример сравнения запасов по классификациям SEC и SPE-PRMS приведены на рис.3.

В целом классификация SEC более строга, консервативна и основана на прямых доказательствах наличия запасов углеводородов. Классификация SPE основывается на косвенных оценках и «передовом производственном опыте». В результате запасы, подсчитанные по методике SEC, всегда меньше чем по SPE-PRMS. Методику SEC предпочитают инвестиционные компании, так как

она не оставляет простора для двоякого толкования, обеспечивая более четкий подход при сравнении двух различных компаний.

Сравнение методических подходов оценки запасов углеводородов показывает, что по российской классификации в финансовой отчетности и в стратегическом планировании используется все запасы, стоящие на балансе, по международным стандартам – только рентабельные запасы.

По Российской классификации величина запасов стоящих на балансе постоянная, по международным стандартам пересматривается ежегодно.

Доказанные PRV (вероятность извлечения 90%)
	- разбуренные разрабатываемые PDP
	- разбуренные неразрабатываемые PDNP
	- неразбуренные PUD
	Вероятные PRB (вероятность извлечения 50%)
	Возможные PSB (вероятность извлечения 10%)

Рис. 3. Сравнение результатов оценки запасов по классификациям SPE-PRMS и SEC

По Российской классификации КИН единый по всей залежи [3, с. 3], по международным стандартам КИН всех категорий пересматривается ежегодно [4, с. 323]. По категории PDP разбуренных, разрабатываемых запасов рассчитывается на основе факта и прогноза добычи с учетом темпа падения и экономического предела. По остальным категориям определяются экспертно. На рис. 4 приведено сравнение КИН, оцененных по российскому и международному стандартам для месторождений Пермского региона. Из рис. 4 видно, что оценка $КИН_{пр}$ по российской методологии превышают оценку по международной.

Рис. 4. Сравнение результатов оценки коэффициентов извлечения нефти, рассчитанных по российскому и международному стандартам

Для эксплуатационных объектов поздних стадий основная часть запасов обычно уже разбурена и относится к категории PDP. Основным методом оценки КИН здесь является построение постоянно действующих цифровых геолого-гидродинамических моделей (ЦГГМ). В качестве их контроля также могут быть использованы аналого-статистические зависимости, в которых, в том числе, участвуют показатели, характеризующие технологию разработки [5, с. 87].

Четвертая заключительная стадия разработки характеризуется достоверными геологическими запасами и историей добычи за длительный временной период. Доразработка объектов выполняется в условиях высокой обводненности, убывающего фонда скважин, очагового заводнения и ряда особенностей, присущих заключительной стадии. Использование результатов геолого-экономической оценки запасов в этот период приобретает наибольшую значимость, так как оперативный контроль за запасами и их рентабельностью позволяет управлять фондом действующих скважин.

Для них КИН при ГЭОЗ обычно рассчитывается на основе факта и прогноза добычи с учетом темпа падения и экономического предела рентабельности разработки. При расчетах запасов категории PDP нефтегазодобывающими компаниями используются специализированные программные продукты (например программный продукт «MERAK REEP» компании «Schlumberger»). При этом для эксплуатационных объектов ежемесячно формируются следующие технологические показатели: добыча нефти, добыча жидкости, объем закачиваемой воды, действующий эксплуатационный фонд скважин.

При проведении ГЭОЗ пересматривается вся информация, влияющая на состояние запасов и их категории: лицензии, горные отводы, бурение, испытание, перфорация, сейсморазведка 3D, ГДИ, пуск и вывод скважин из эксплуатации. На проведение этих мероприятий влияют экономические

факторы, учет которых осуществляется путем введения показателя остаточных экономических запасов (ОЭЗ).

Под ОЭЗ понимается часть запасов, которую экономически целесообразно извлечь на дату проведения ГЭОЗ. К экономическим показателям относятся:

- макроэкономические параметры (курс доллара, цена нефти Urals);
- налоги и льготы (налог на добычу полезных ископаемых НДПИ);
- основные производственные показатели (цена на углеводороды, эксплуатационные и капитальные затраты, затраты на обустройство и ликвидацию скважин, налог на имущество).

При определении величины ОЭЗ используется понятие экономического предела рентабельности добычи нефти EL, под которым понимается объем добычи ниже которого чистый поток денежных средств от реализации проекта становится отрицательным. Значение показателя EL складывается из цены реализации углеводородов, эксплуатационных затрат и налога на добычу. Величина EL ежегодно пересматривается недропользователем исходя из текущих эксплуатационных затрат, цены на углеводороды и налога на их добычу [6, с. 17].

При расчетах величины EL кривые падения добычи экстраполируются до минимальных предельно экономически рентабельных дебитов, определенных с учетом эксплуатационных затрат и цен на нефть. На рис.5 приведен примеры различий в оценке экономического предела рентабельности при темпах падения добычи $T=10\%$ и $T=30\%$.

Рис. 5. Экстраполяция при различных темпах падения добычи нефти

На величину EL влияют цены на нефть и газ, эксплуатационные затраты, капитальные затраты, налоги, стратегические планы предприятия. В конечном итоге величина EL определяется минимально рентабельным дебитом скважин по нефти, ниже которого добыча становится нерентабельной. Соответственно при достижении этого предела (см. рис.6) скважины выводят из фонда.

Рис. 6. Оценка экономического предела рентабельности добычи нефти

В примере на рис. 7 снижение рентабельного дебита с 0,5 т/сут (2006 г.) до 0,8 т/сут (2007 г.) привело к снижению ОИЗ по эксплуатационному объекту на 30% (с 256 тыс. т до 180 тыс. т), а их стоимость запасов уменьшилась на 37% (с 5159 тыс.\$ до 1913 тыс.\$).

При расчетах планирование ГТМ для вовлечения запасов в разработку проводится согласно планам предприятия, которые в связи с текущей экономической и технологической ситуацией могут значительно отличаться от положений проектного документа.

**Рис. 7. Расчеты экономических характеристик
инвестиционного проекта**

Входной дебит для ГТМ, проводимых в зоне PDP определяется исходя из анализа данных по фактически проведенным мероприятиям. При этом учитываются удельные показатели ОИЗ на скважину в районе проведения ГТМ, а также темп падения добычи нефти и экономический предел рентабельности.

Ежегодный расчет экономических пределов добычи и обводнения продукции позволяют обоснованно проводить мероприятия по остановке и ликвидации фонда скважин. Это оптимизирует эксплуатационные затраты и делает добычу нефти рентабельной длительный период времени. Своевременный вывод нерентабельных по EL скважин в бездействующий фонд позволяет продлить рентабельный период разработки и получить дополнительно около 10% ОИЗ.

В мировой практике в последние годы все шире применяются современные технологии интеллектуального управления пластом, основанные на постоянном мониторинге работы добывающих и нагнетательных скважин

путем установки в них датчиков замера технологических показателей. Такой подход увеличивает полноту фактической информации об эксплуатационном объекте, значительно повышает прогноз эффективности ГТМ и в конечном итоге достоверность оценки ОИЗ.

Список литературы

1. Варламов А.И., Петерсилье В.И., Пороскун В.И. О новой классификации запасов и ресурсов углеводородов // Геология нефти и газа. – 2016. – № 1. – С. 89-94.
2. Халимов К.Э. Переход на международную классификацию запасов нефти – требование времени // Нефть, газ и бизнес. – 2002. – № 5. – С. 10-13.
3. Батурин Ю.А. К вопросу обоснования КИН при подсчете запасов и проектировании разработки нефтегазовых месторождений // Вестник ЦКР Роснедра. – 2011. – № 1. – С. 2-5.
4. Галкин С.В., Поплаухина Т.Б., Лузина Н.Г., Лобанов Д.С., Емашов Р.И. Возможности оперативного контроля остаточных извлекаемых запасов на различных стадиях разработки нефтяных эксплуатационных объектов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2019. – Т.19, № 4. – С. 322-334.
5. Галкин В.И., Галкин С.В., Воеводкин В.Л. Построение статистических моделей оценки коэффициента извлечения нефти для эксплуатационных объектов Пермского Прикамья // Нефтяное хозяйство. – 2011. – № 2. – С. 86-88.
6. Поплаухина Т.Б., Якимова И.В., Матвейкина Т.Н., Савич А.И. Коэффициент извлечения нефти: расчет и реальность // Геология, геофизика и разработка нефтяных месторождений. – 2005. – № 5-6. – С. 16-20.

УДК 666.94.536.6

Глава 6.
КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЦЕМЕНТЫХ СИСТЕМАХ

Горленко Николай Петрович

д.т.н., профессор

Саркисов Юрий Сергеевич

д.т.н., профессор

Лотов Василий Агафонович

д.т.н., профессор

Зубкова Ольга Александровна

к.т.н., доцент

Шепеленко Татьяна Станиславовна

к.х.н., доцент

Дебелова Наталья Николаевна

к.т.н., доцент

Аннотация: рассмотрены отдельные экспериментальные методы фиксации колебательных свойств в процессе структурообразования в системе «цемент-вода», а именно, метод амплитудно-частотных характеристик, метод цифровой технологии, метод дифференциальной микрокалориметрии. Выявлено, что волновые свойства могут проявляться как на ранней стадии формирования тонкокристаллической структуры вяжущего, так и в более поздние сроки структурообразования. Показано, что в основе механизма наблюдаемых эффектов лежит генерация электромагнитных колебаний различной частоты и интенсивности, возникающих в результате процессов диспергирования, гидратации цементных частиц и формирования кристаллической фазы новообразований. Приведены расчеты собственных частот колебаний в твердеющей системе.

Ключевые слова: колебательные процессы, цемент, диспергирование, гидратация, кристаллизация, структурообразование

OSCILLATORY PROCESSES IN CEMENT SYSTEMS

Gorlenko Nikolay Petrovich

Sarkisov Yuri Sergeevich

Lotov Vasily Agafonovich

Zubkova Olga Aleksandrovna

Shepelenko Tatyana Stanislavovna

Debelova Natalia Nikolaevna

Abstract: some experimental methods for fixing vibrational properties in the process of structure formation in the "cement-water" system are considered, namely, the method of amplitude-frequency characteristics, the method of digital technology, the method of differential microcalorimetry. It is revealed that the wave properties can be manifested both at the early stage of the formation of the fine-crystalline structure of the binder, and at a later stage of structure formation. It is shown, that the mechanism of the observed effects is based on the generation of electromagnetic vibrations of various frequencies and intensities resulting from the processes of dispersion, hydration of cement particles and the formation of the crystalline phase of neoplasms. Calculations of the natural frequencies of vibrations in a hardening system are given.

Key words: vibrational processes, cement, dispersion, hydration, crystallization, structure formation

Введение

Твердение системы «цемент-вода» представляет собой сложный нелинейный физико-химический процесс, сопровождающийся эндо- и экзо-эффектами, фазовыми превращениями, конкуренцией химических реакций различной природы, чередованием структур, характеризующихся различными

реологическими и деформативными свойствами [1-3]. Все эти преобразования могут служить источниками колебательных процессов при самоорганизации цементной композиции.

Согласно современным представлениям, низкочастотные колебания в вяжущей дисперсии генерируются на стадии формирования тонкокристаллической структуры [4]. При этом предполагаются возникновение и гибель динамически развивающихся кинетических образований, количественное накопление которых приводит к новым качественным изменениям в цементной системе. Кроме того, одним из компонентов в системе «цемент-вода», ответственного за такие явления как колебания различных физических, физико-химических свойств, генерация различных по частоте электромагнитных излучений, является вода. Например, известны экспериментальные данные колебания температуры, плотности, диэлектрической проницаемости и т.д. [5-7] в водосодержащих системах. При наличии возбуждающих факторов регистрируется генерация, например, электромагнитных колебаний в области низких частот. Так, акустическая эмиссия имеет импульсный характер, и энергия отдельного импульса составляет 10^{-5} – 10^{-9} Дж [8].

Так как механизм процессов структурообразования может быть связан, в том числе, с генерацией колебательных процессов в системе «цемент-вода», то имеет интерес рассмотреть известные методы, позволяющие регистрировать их в твердеющих системах, и провести анализ известных в литературе экспериментальных данных. На наш взгляд, выявление источника колебательных процессов и их влияние на развитие позволит целенаправленно управлять процессами гидратации и структурообразования цементных композиций особенно на ранних стадиях взаимодействия цемента с водой, интенсифицировать процессы твердения не только вещественными, но и полевыми методами.

К настоящему времени в научной и патентной литературе известно небольшое количество способов фиксации колебательных процессов. Одними из таких методов являются реологические испытания твердеющих цементных композиций [9-11]. Реологические модели позволяют получить информацию об изменениях внутренней структуры реального тела под нагрузкой, представляющие собой характеристики внутреннего трения, вязкости и когезии. Внутреннее трение характеризует твердую фазу материала с участием как упругих, так и неупругих элементов. Под влиянием нагрузки в реологической модели будут происходить как обратимые, так и необратимые процессы, вызывающие соответствующие деформации. Под влиянием нагрузки какая-то часть механической энергии будет превращаться в тепло, что в совокупности с изменением во времени вязкости и адгезионно-когезионных процессов будет приводить к нелинейному поведению материала и к фиксации колебательных процессов [12].

Основной причиной, приводящей к случайным изменениям в развитии микроструктуры, а, следовательно, и к развитию колебательных или периодических процессов является реакция гидратации в цементной системе [13-19]. Анализ отечественного и зарубежного опыта показывает, что, во-первых, эффективно управлять процессами гидратации и структурообразования цементных композиций целесообразно на самых ранних стадиях взаимодействия цемента с водой или другой жидкостью затворения; во-вторых, из всех возможных методов воздействия на систему предпочтение следует отдавать комбинированным вещественно-полевым способам активации; в-третьих, на практике может быть осуществлена как отдельная технология подготовки компонентов строительных смесей, так и обработка композиции в целом. При этом активирование системы «цемент-вода» наиболее эффективно проводить путем воздействия на воду как на наиболее структурно-чувствительный компонент системы в физико-химическом плане и наиболее доступным в технологическом отношении [20].

Таким образом, исследование процессов электромагнитных колебаний в цементных системах позволит не только более полно выявить механизм структурообразования в цементных системах, но и целенаправленно регулировать эксплуатационные свойства композиций на основе цемента.

Методы фиксации электромагнитных колебаний в системе «цемент-вода»

1. Метод амплитудно-частотных характеристик

Исследования амплитудно-частотных характеристик в системе «цемент-вода» проводили с использованием композиции портландцемента марки 400 и дистиллированной воды при водоцементном отношении 0,4. Исследуемый образец помещался в кварцевую кювету, экранированную металлом из латуни, в которой находились два одинаковых по площади точечных платиновых электрода. Наведенная разность потенциалов с электродов подавалась на усилитель и сигнал обрабатывался с помощью ЭВМ. Длина массива данных равнялась 1024 точкам. Длина выборки составляла 512 точки, шаг по частоте 10^{-4} Гц, частота дискретизации 1 с. Частотно – амплитудные характеристики исследованы при твердении образцов в периоды времени (мин): (1-12); (20-60); (60-420); (420-10080), что соответствует наиболее заметным качественным изменениям в системе [21,22].

Результаты проведенных экспериментов приведены на рисунках 1-4.

В течение 5 минут после начала затворения обнаруживается максимальный пик при частоте 13 Гц (рис. 1).

Рис. 1. Амплитудно-частотные характеристики цементной композиции после 5-ти минут твердения образца

Этот период времени отвечает процессу быстрой гидратации цементных частиц и характеризуется адсорбцией молекул воды на поверхности с образованием слабых хемосорбционных связей, развитием ионного обмена, формированием первичных зародышей гидратных соединений [3].

При этом скорость гидратации определяется изменением количества свободной воды, через которую осуществляется взаимодействие контактов срастания. Основной причиной образования новой системной организации в жидких полярных средах служит проявление сил Ван-дер-Ваальса ориентационного характера. Можно предположить, что, в данный период времени, колебания на частоте 13 Гц обусловлены слабыми диполь – дипольными взаимодействиями [23].

В период времени от 0,15 до 1 часа отмечается существенное снижение амплитуды колебаний в диапазоне измеряемых частот, а соотношение высоты пиков изменяется в закономерной последовательности в сторону увеличения частоты (рис. 2).

Отмечается дискретный характер протекающего процесса – количество пиков, соответствующих собственному колебанию той или иной структуры, увеличивается. Эта стадия по времени отвечает уменьшению скорости гидратации в результате образования защитной пленки продуктов реакции на зерне цемента и появлению зародышей новообразований.

Рис. 2. Амплитудно-частотные характеристики цементной композиции после 20-ти минут твердения образца

Пограничный слой постепенно становится менее проницаемым для молекул воды, так как доля ее связанности с твердой фазой увеличивается. Вода в свободном состоянии образует водные прослойки между частицами твердой фазы, формируя таким образом контакты срастания коагуляционного типа. В это же время наблюдается разрушение цементных зерен водой, их диспергирование до коллоидных размеров. Одна часть «блоков» отслоения с меньшей массой гидратируется в объеме свободной воды, другая, с большей массой, в силу меньшей диффузионной подвижности концентрируется вблизи кристаллического образования основной фазы. В целом масса новообразований уменьшается. Так как силы Ван-дер-Ваальса являются недостаточными при

конкуренции с тепловым движением молекул, то можно предположить, что комплекс из молекул воды и твердой фазы на данной стадии стабилизируется, в основном, силами ион – дипольной связи и, в дальнейшем, представляет собой единое кинетическое целое. В дальнейшем наблюдаются лавинообразный рост частиц новообразований и увеличение ее массы.

После одного часа твердения амплитуда колебаний продолжает понижаться, спектральные максимумы смещаются в область более высоких частот, но спектр по – прежнему имеет дискретный характер (рис. 3).

Рис. 3. Амплитудно-частотные характеристики цементной композиции после 70-ти минут твердения образца

В этот период времени цементное тесто представляет собой относительно плотную дисперсию, стабилизированную совокупным действием сил диполь-дипольного, ион-дипольного и ион-ионного взаимодействий, что соответствует концу срока схватывания цементной композиции. Число контактов срастания в единице объема, а, значит, и вязкость системы в целом, увеличиваются, что обуславливает значительное снижение в ней

интенсивности колебательных процессов. Экспериментально этот процесс обнаруживается после семи часов с момента затворения цемента водой. Известно, что если поместить металл в раствор электролита, то неизбежно возникает электродвижущая сила (ЭДС), величина которой зависит от накопления избыточного заряда на его поверхности и природы электролита [24]. Закономерное колебание величины ЭДС электрода в целом может быть обусловлено процессами в области двойного электрического слоя.

На наш взгляд, колебательные процессы возникают вследствие деформации ДЭС типа растяжение-сжатие. Возбуждающими факторами служат внутренние процессы самоорганизации системы «цемент-вода», а именно: периодическое попеременное усиление-ослабление силы взаимодействия гидратированных комплексов дисперсной системы, флуктуации температуры, концентрации, плотности и т.д. Колебания зарождаются в индивидуальном межчастичном зазоре, а по мере передачи энергии постепенно вовлекается весь объем водно-дисперсной системы. В результате этих процессов происходит нарушение структуры двойного электрического слоя как компромиссного состояния между твердой фазой электрода и водно-дисперсной средой. При этом максимальное деформирование приэлектродного слоя, на наш взгляд, вызывают те колебания, которые генерируются в перпендикулярном направлении относительно плоскости электрода, а минимальные – в параллельной. Поэтому, несмотря на усредненный флуктуационный характер движения частиц в объеме водно-дисперсной системы, их результирующая составляющая отлична от нуля.

Наличие частоты собственных колебаний какой-либо материальной частицы в связанной системе проявляется в том случае, когда при быстро изменяющейся силе за период колебаний частице сообщается ускорение, и она приходит в колебательное движение. Для взаимосвязанных осциллирующих систем частота определяется по формуле:

$$\Delta \omega_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{k/m}, \quad (1.1)$$

где k – коэффициент, имеющий размерность силы, приходящейся на единицу длины связи, m – масса колеблющегося тела.

Согласно уравнению 1.1, ассоциативный комплекс массой m можно представить как простой гармонический осциллятор, колеблющийся вокруг положения равновесия. С учетом межмолекулярных связей, можно записать:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{k/m}, \quad (1.2)$$

где f – частота собственных колебаний тела, $k = F/l$ – коэффициент пропорциональности, представляющий собой упругую силу, приходящуюся на единицу длины связи, $l = 2r$; m – масса ассоциата, проявляющего кооперативные свойства.

Предположим, что в первоначальный момент времени гидратации зерна цемента (1-12 мин) на его поверхности преимущественно образуются гидратированные ионы кальция, обладающие собственным дипольным моментом и представляющие собой самостоятельные кинетические образования (агрегаты). Между ними через прослойку свободной воды осуществляется диполь – дипольное взаимодействие. Определим значение k , учитывая, что мельчайшие фракции цемента (до 80 %) образуют агрегаты, размер которых с учетом сольватного слоя достигает 30 мкм [4].

Сила взаимодействия зарядов определяется зависимостью:

$$F = \frac{n\mu\mu}{4\pi\epsilon_0\epsilon_l r^4} = \frac{n^2\mu^2}{4\pi\epsilon_0\epsilon_l r^4}, \quad (1.3)$$

где μ – дипольный момент молекулы воды ($6,1 \cdot 10^{-30}$ Кл*м), ϵ_0 – электрическая постоянная ($8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м), ϵ_l – относительная диэлектрическая проницаемость воды, r – радиус взаимодействующих тел, n – число контактов на единицу поверхности.

Число контактов диполей воды гидратированных зерен вяжущего друг с другом с известным приближением можно определить как отношение площади, занимаемой одной молекулой воды, к площади зерна вяжущего: $n = \frac{r_{\text{в}}^2}{r_{\text{з}}^2} = 1,1 \times 10^{10}$, где $r_{\text{в}}$ – радиус молекулы воды ($1,4 \times 10^{-10}$ м), $r_{\text{з}}$ – радиус зерна вяжущего ($1,5 \times 10^{-5}$ м). Так как в контакт, приводящий к деформации двойного электрического слоя по направлению оси абсцисс, вступает 1/6 поверхности цементного агрегата, то $n = 1,8 \times 10^9$. Величина ε_l вблизи поверхности заряженной фазы находится в пределах (4–8) [25]. Тогда, согласно уравнениям (1.2 и 1.3):

$$F_{\text{д-д}} = \frac{(6 \times 10^{-30})^2 \times (1,8 \times 10^9)^2}{4 \times 3,14 \times 8,85 \times 10^{-12} \times (4 - 8) \times (1,5 \times 10^{-5})^4} = (2,6 - 5,3) \times 10^{-12} \text{ (H)},$$

$$k = \frac{F_{\text{д-д}}}{l} = \frac{(2,6 - 5,3) \times 10^{-12}}{3 \times 10^{-5}} = (0,9 - 1,8) \times 10^{-7} \text{ (кГ / м)}.$$

Оценим массу взаимодействующих тел:

$$m = V\rho = \frac{4}{3}\pi r^3 = \frac{4}{3} \times 3,14 \times (1,5 \times 10^{-5})^3 \times (1000 - 1400) = (1,4 - 2,0) \times 10^{-11} \text{ (кг)},$$

где ρ – плотность новообразований принимаем в пределах 1000 – 1400 кг/м³.

Отсюда собственная частота колебания отдельного кинетического образования, рассчитанная по уравнению 1.2:

$$f = 0,16 \sqrt{\frac{(0,9 - 1,8) \times 10^{-7}}{(1,4 - 2,0) \times 10^{-11}}} = 10,7 - 18,1 \text{ (Гц)},$$

что удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными.

При сроках твердения цементной композиции 15 – 60 мин., падение амплитуды колебаний и смещение частоты в область более высоких значений, по-видимому, можно объяснить развитием следующих процессов:

1 – уменьшением массы гидратированного комплекса, обусловленным отслоением группы ионов – «блоков» – от исходной кристаллической фазы. Так как в системе преимущественно проявляются силы диполь – дипольного

взаимодействия, а амплитуда колебаний имеет максимальное значение при частоте 13 Гц, то по уравнению 1.2 можно рассчитать изменение массы взаимодействующих новообразований, соответствующих экспериментально определенным частотам в диапазоне (10 – 130) Гц (рис. 3).

$$m = \frac{k}{4\pi^2 f^2} = \frac{(0,9-1,8)10^{-7}}{4 \times 9,86 \times (10-130)^2} = (4,6 \times 10^{-11} - 1,4 \times 10^{-13}) \text{ (кг)}.$$

2 – развитием ион – дипольных взаимодействий и усилением связи с участием большего числа упорядоченных структур новообразований и, как следствие, увеличением их массы. По соотношению величин амплитуд колебаний можно предположить, что доля сил ион – дипольного взаимодействия в этот период времени меньше доли сил диполь – дипольного взаимодействия. Предполагая, что между частицами в месте контакта находятся молекулы воды и связь осуществляется через них, можно оценить силу ион – дипольного взаимодействия по формуле:

$$F_{и-д} = \frac{qnq\mu}{4\pi\epsilon_0\epsilon r^3} = \frac{1,6 \times 10^{-19} \times 6,0 \times 10^{-30} \times (1,8 \times 10^9)^2}{4 \times 3,14 \times 8,85 \times 10^{-12} \times 1 \times (1,5 \times 10^{-5})^3} = 8,2 \times 10^{-6} \text{ (Н)},$$

где q – заряд электрона $1,6 \times 10^{-19}$ Кл, $r = 1,5 \times 10^{-5}$ м, $\epsilon = 1$ (при контактном взаимодействии диполя воды с ионом [30]). Тогда,

$$k = \frac{F_{и-д}}{l} = \frac{8,2 \times 10^{-6}}{3,0 \times 10^{-5}} = 2,7 \times 10^{-1} \text{ (кг / м)}.$$

Значения масс новообразований, отвечающие проявлению ион – дипольного взаимодействия в диапазоне частот 10 – 130 Гц, должны иметь следующий порядок:

$$m = \frac{k}{4\pi^2 f^2} = \frac{2,7 \times 10^{-1}}{4 \times 9,86 \times (10-130)^2} = (6,8 \times 10^{-5} - 4,1 \times 10^{-7}) \text{ (кг)}.$$

В скрытый период гидратации (1 – 6 часов) наблюдается дальнейшее усиление межчастичных связей за счет постепенной замены ион – дипольного на ион – ионное взаимодействие, т.е. замены дальнедействующих сил на короткодействующие. При этом увеличивается масса образований коллоидных

и кристаллических размеров, нарушается вязко-текучее состояние системы, замедляются диффузионные процессы, наблюдается смена энергетических барьеров и областей протекания реакций и т.д. Это приводит к постоянному колебанию величины k/t , что и отражается на характере спектров (рис. 1-3).

2. Метод цифровой технологии

В настоящее время цифровые технологии в исследовании физико-химических и эксплуатационных свойств строительных материалов позволяют оценить степень их неоднородности, выявить дефекты структуры, определить размеры пор и распределение их по объему образца, что позволяет расширить представления о механизме твердения вяжущих веществ.

В качестве объекта исследования использовались образцы цементного камня размером $(2 \times 2 \times 2) \times 10^{-3}$ м, полученные на цементе марки ПЦ-500 при водоцементном отношении равном 0,34. В работе использовался интеллектуальный рентгеновский 3D микротомограф (ИРМТ) со следующими основными характеристиками: различимость деталей (1-13) мкм; источник рентгеновского излучения – плавно-настраиваемый от 20 до 160 кВ; ток анода (0 – 250) мкА; размер фокального пятна < 5 мкм; охлаждение – воздушное; детектор рентгеновского излучения: 4872×3248 ячеек при размере одного элемента не более $7,4 \times 7,4$ мкм; время восстановления трехмерных изображений (1 см^3) – 10 мин. ИРМТ позволяет изучать участки образцов под любым удобным ракурсом и с высокоточным обеспечением (± 1 мкм) позиционирования исследуемого объекта без их разрушения и повреждения [26].

На рис. 4 приведены типичные изображения слоев цементного камня по мере увеличения глубины сканирования цементного камня.

Рис. 4. Изображения поверхности цементного камня (a,b,c,d,e,f, g,h) с шагом по увеличению глубины сканирования – 2 мкм. (Увеличение ×5)

На рисунках отчетливо проявляются образования темного цвета, представляющие собой поры, и concentрические кольца из чередующихся полос темного и светлого тонов.

Из анализа изображений поверхности цементного камня по глубине сканирования следует:

1. Распределение пор по площади и объему образцов носит случайный характер, а суммарная площадь пор на разных глубинах сканирования не является величиной постоянной.

2. Размеры пор формируются в диапазоне от 10^{-2} до 10^{-3} мкм в диаметре и на глубину от нескольких единиц до нескольких сотен микрометров.

3. Воздушные включения имеют как симметричные, так и не симметричные формы, что может быть связано с градиентами плотностей или их отсутствием на границах раздела фаз «цементный камень-воздух», в момент потери вязкотекучего состояния цементной смеси (конец срока схватывания).

4. Визуально наблюдаются чередующиеся концентрические кольца на поверхности образцов, конфигурация которых меняется с изменением глубины сканирования. Однако расстояние между двумя минимумами впадин (темные кольца) или максимумами выступов (светлые кольца), остается практически постоянным, и ее среднее значение составляет около 0,006 м.

Одной из причин, вызывающих формирование концентрических колец на поверхности образцов, на наш взгляд, может являться развитие процесса генерирования электромагнитных волн в объеме твердеющей системы. Известно, что протекание процессов гидратации и твердения цемента сопровождаются возникновением акустических колебаний частотой от 100 Гц до 20 кГц с интенсивностью 3–10 дВ, сопровождающих процессы диспергирования частиц цемента [27]. Можно предположить, что в системе «цемент-вода», особенно в момент затворения цемента водой возникают и более высокочастотные, в том числе, ультразвуковые колебания.

Этот вывод следует из следующих рассуждений. Допустим, что ультразвуковые колебания являются одной из возможных движущих сил диспергирования частиц цемента, а формирование колец является результатом образования стоячих волн в системе «цемент-вода» (рис.5).

Рис. 5. Схема образования стоячей волны. В – узлы стоячей волны, А – амплитуды колебаний, λ – длина волны

Известно, что стоячие волны образуются, если две волны с одинаковыми амплитудой и длиной перемещаются в противоположные стороны. Это возможно, если электромагнитные колебания генерируются частицами или их образованиями, составляющими основную массу близких, в частности, по типоразмерам и свойствам. Другими словами, система представляет совокупность частиц с более или менее равномерно распределенными параметрами в образце, в котором, например, масса, упругость, размеры и другие показатели, являются близкими по значению в каждом элементарном объеме системы. Также известно, что под действием давления ультразвуковых волн наименьшие по размеру частицы и жидкая фаза будут отклоняться к узлу стоячей волны, а более крупные образования – в сторону наибольшего значения амплитуды колебаний [28]. В результате будут образовываться очаги уплотнения у поверхности соприкосновения источника электромагнитного излучения (темные кольца), за пределами которого будет располагаться участок с меньшей плотностью образований (светлые кольца) [29]. При этом, значение длины стоячей волны определяется как двойное расстояние между темными и светлыми кольцами на поверхности цементного камня и в среднем составляет 0,012 м (рис. 5).

Частота колебаний ультразвуковых волн в исследуемой среде определяется уравнением:

$$f = c/\lambda,$$

где c – скорость распространения ультразвука в твердеющей системе, λ – длина волны, f – частота колебаний.

Учитывая, что в начальный момент твердения система представляет собой жидкую среду и скорость распространения ультразвука здесь условно можно принять равной скорости распространения волны в воде (1490 м/с). По мере формирования цементного камня она увеличивается и варьируется в интервале (1930 – 3000 м/с).

Рассчитаем частоту колебаний стоячих волн согласно вышеприведенной формуле:

$$f = (1490 - 3000)/0,012 = (124,2 - 250,0) \text{ кГц.}$$

На самом деле, как следует из рисунка 5, волны характеризуются целым спектром частот, включающих кратные между собой гармониками, вследствие чего следует ожидать более широкий интервал частот. А именно, от звукового до мегагерцового диапазона, наблюдаемых экспериментально.

На наш взгляд, источником генерации электромагнитных волн является частота собственных колебаний частиц в цементной системе, которую можно оценить по формуле:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{k/m},$$

где f – частота собственных колебаний тела, $k = F/l$ – коэффициент пропорциональности, представляющий собой упругую силу, приходящуюся на единицу длины связи $l = 2r$; m – масса частицы.

В начальный момент твердения цементный раствор представляет собой коллоидную систему с размерами частиц ($10^{-6} - 10^{-8}$) м. Принимая плотность цементного теста равной 1400 кг/м³, определим массы отдельных частиц:

$$m = V\rho = (10^{-6} - 10^{-8})^3 \times 1400 \approx (10^{-15} - 10^{-21}) \text{ кг.}$$

Для частиц, проявляющих диполь-дипольное взаимодействие, $k = (0,9 - 1,8) \times 10^{-7}$ кг/м [25].

Тогда:

$$f = 0,16 \sqrt{\frac{(0,9 - 1,8) \times 10^{-7}}{(10^{-15} - 10^{-21})}} = (2 \times 10^3 - 1,5 \times 10^6) \text{Гц}.$$

Таким образом, если в системе находятся совокупность близких по размерам и массе частиц, то при генерации собственных электромагнитных колебаний возможно формирование стоячих волн с частотами акустического и ультразвукового диапазонов. Так как преобразование энергии из кинетической формы в потенциальную и обратно происходит в пределах участка системы (рис.5), а именно, от амплитуды до соседнего узла, то отсутствуют энергетические потери, так как каждый такой участок не обменивается энергией с соседними участками, что характерно для стоячих волн. Отсутствие энергетических потерь может являться одной из причин интенсификации процессов диспергирования, гидратации частиц цемента и структурообразования цементного камня. Отсюда следует, что создание условий поддержания в системе состояния стоячих волн, может служить дополнительным источником улучшения эксплуатационных характеристик цементных композиций.

Доказательством эффективного влияния ультразвука на процессы интенсификации процессов гидратации, диспергирования, структурообразования в цементных системах являются многочисленные литературные данные. Можно предположить, что генерирование внутренних электромагнитных волн в объеме системы «цемент-вода» в начальные сроки твердения является, наряду, например, с тепловым воздействием дополнительным активирующим фактором на развитие процессов твердения.

Следует отметить, что формирование сферических «колец» может наблюдаться и при условии состояния сферической бегущей волны. Это обусловлено различными скоростями распространения поперечных C_1 и

продольных C_2 волн. Их отношение зависит от коэффициента Пуассона, характеризующего величину отношения относительного поперечного сжатия к относительному продольному растяжению:

$$\frac{V_1}{V_2} = \sqrt{\frac{1-2\nu}{2-2\nu}},$$

где V_1 , V_2 – скорости распространения продольных и поперечных волн соответственно, ν – коэффициент Пуассона.

Принимая во внимание, что для бетона $\nu = 0,2$:

$$\frac{V_1}{V_2} = \sqrt{\frac{1-2 \times 0,2}{2-2 \times 0,2}} = 0,375.$$

С учетом приведенных расчетов твердеющую систему можно рассматривать как среду с электромагнитным импедансом, где $V_1 < V_2$, что и приводит к образованию визуально наблюдаемым сферическим кольцам.

3. Метод дифференциальной микрокалориметрии

Процесс взаимодействия цемента с водой сопровождается выделением и поглощением теплоты и носит колебательный характер. Контроль за изменением температуры в твердеющей композиции удобно осуществлять с помощью дифференциально-термического метода анализа, позволяющим контролировать разность температур между пробой и эталоном при непрерывном подъёме температуры. Принцип ДТА использован нами в конструкции дифференциального микрокалориметра (ДМК) [30, 31], позволяющего контролировать разность температур между калориметрическими ячейками во времени. Схема ДМК представлена на рис. 6 и содержит две калориметрические ячейки (КЯ), в первую из которых засыпается сухой цемент в количестве 1,35 г, а во вторую вводится расчётное количество воды, обеспечивающем равенство масс обеих ячеек, а именно, 1 г цемента и 0,35 г воды.

Преимуществом предложенной ДМК является возможность фиксации разности температур между КЯ с момента контакта воды с цементом в испытательной ячейке.

Рис. 6. Схема дифференциального микрокалориметра:

**1,2 – калориметрические ячейки; R_{t1} , R_{t2} – термометры сопротивления;
3 – усилитель сигнала; 4 – измерительный прибор; 5,6 – термостаты**

На рис. 7 представлена кинетика изменения разности температур в системе цемент-вода при гидратации и твердении в течение трёх суток.

Рис. 7. Кинетика изменения разности температур между калориметрическими ячейками при гидратации и твердении цемента в течение 3-х суток

На рис. 8 представлена кинетика изменения разности температур между калориметрическими ячейками при гидратации и твердении полуводного гипса.

Рис. 8. Кинетика изменения разности температур между калориметрическими ячейками при гидратации и твердении полуводного гипса

Зависимости, представленные на рисунках 7 и 8, показывают изменения разности температур между эталонной и испытательной ячейками ДМК и фиксирует периодичность происходящих процессов. Из этого следует, что контроль за изменением температур при гидратации и твердении цемента необходимо проводить по разности температур между сухим (эталон) и влажным (проба) материалом. Контроль за интегральным тепловыделением даёт менее точные результаты.

Следует отметить, что периодичность процессов выделения и поглощения теплоты в системе «цемент-вода» не позволяет зафиксировать тепловыделение через 1-1,5 суток на микрокалориметрах известных конструкций, так как в этих конструкциях заложен принцип суммирования выделившегося и поглощённого тепла. Математически это можно представить, как:

$$Q = ((+\Delta Q) + (-\Delta Q)) \approx 0.$$

Единство и противоположность процессов гидратации и диспергирования проявляется в характере первого пика кривой тепловыделения (рис. 7, 8), в котором после интенсивного выделения тепла в первые 4–5 мин (масса навески цемента – 1 г, водоцементное отношение = 0,35), начинают преобладать процессы, связанные с затратой тепла на диспергирование, и это тепло практически полностью поглощается системой «цемент-вода» в течение 50 мин, в результате чего общая продолжительность этого периода тепловыделения составляет около 1 часа. Однако процессы диспергирования на этом не заканчиваются и продолжаются в индукционном периоде гидратации за счет дополнительного забора тепла у системы.

На рисунке 9 представлены экспериментальные результаты тепловыделения как в индукционном, так и гидратационном периодах твердения цемента в течение 96 часов. После контакта цемента с водой интенсивное тепловыделение наблюдается в течение первых 3-х минут, а затем выделившееся тепло начинает расходоваться на диспергирование.

Длительность первого индукционного периода составляет около 2-х часов, в течение которого температура системы понижается на $0,18^{\circ}\text{C}$, а затем в течение 1 ч остаётся постоянной и равной $0,41\text{--}0,42^{\circ}\text{C}$.

Рис. 9. Цикличность процессов гидратации и твердения цемента после индукционного периода. Общая продолжительность гидратации – 96 час

Взаимосвязанное протекание процессов гидратации и диспергирования цемента приводит к увеличению полной свободной поверхностной энергии системы (U_F), которая складывается из энергии Гиббса (единицы поверхности) и скрытой теплоты образования единицы новой поверхности [32]:

$$U_F = \sigma + q_F = G_F + T \cdot S_F,$$

где σ – удельная свободная поверхностная энергия ($\sigma = dG/dF$); G_F – энергия Гиббса единицы поверхности; q_F – скрытая теплота образования единицы новой поверхности; S_F – избыточная энтропия единицы поверхности; T – температура.

Возникновение собственных акустических колебаний в системе цемент-вода подтверждается и в исследовании с использованием магнитодинамической системы контроля за возникающими колебаниями. На рисунке 10 приведена схема экспериментальной установки, которая состоит из постоянного

неодимового магнита, магнитопровода и подпружиненной катушки с медным проводом. На катушку устанавливалась пластиковая кювета, в которую помещался 1 г цемента и добавлялось 12 мл дистиллированной воды.

Рис. 10. Схема магнитодинамического устройства: 1– постоянный магнит; 2 – магнитопровод; 3 – катушка; 4 – пружина; 5 – пластиковая кювета; 6 – звукозаписывающее устройство; 7 – компьютер

Возникновение акустических колебаний фиксировалось звукозаписывающим устройством, далее сигнал подавался на компьютер, в котором обрабатывался с помощью программного обеспечения REAPTOR и выводился на монитор в виде дорожки звукового изображения. Общий вид звуковых колебаний в различное время гидратации цемента представлен на рисунке 11.

Перед съёмкой акустики системы «цемент-вода» предварительно проверена контрольная чувствительность магнитодинамического устройства на чистой воде. Запись звуковых колебаний системы «цемент-вода» проводили в последние 90 с для указанного срока гидратации. Для звуковой дорожки (рис.11м) представлен фрагмент длительностью 2 с для более наглядного изображения вида звуковых колебаний.

Вода (контроль) (а)

Гидратация цемента – 5 мин (б)

Гидратация цемента – 15 мин (в)

Гидратация цемента – 30 мин (г)

Гидратация цемента – 60 мин (д)

Гидратация цемента – 90 мин (е)

Гидратация цемента – 150 мин (з)

Гидратация цемента – 180 мин (и)

Гидратация цемента – 22 ч 15 мин (к)

Гидратация цемента – 22 ч 45 мин (л)

Гидратация цемента – 22 ч 45 мин. Длительность колебаний 2 секунды (м)

Гидратация цемента – 23 ч (н)

Гидратация цемента – 24 ч (о)

Гидратация цемента – 25 ч (п)

**Рис.11. Общий вид звуковых колебаний при гидратации цемента
в различное время твердения**

Из рисунка 11 следует, что начальный и последующие периоды гидратации цемента сопровождаются звуковыми колебаниями различной частоты и интенсивности, что подтверждает протекание процессов диспергирования при гидратации частиц цемента, а также при твердении продуктов гидратации цемента. Расклинивающее разрушение поверхностного слоя частиц цемента с образованием нанодисперсных гидратированных частиц сопровождается микровзрывами и звуковыми колебаниями, передающимися через несжимаемую среду (воду) сначала пластиковой кювете, а затем катушке с медным проводом, при взаимодействии которой с магнитным полем возникает электрический сигнал.

Оценку процесса диспергирования частиц вяжущего при гидратации частиц цемента проводили путем построения гистограмм распределения частиц по их размерам с помощью оптико-телевизионного измерительного комплекса «Оптис-2». Результаты исследований приведены на рис. 12-16.

Рис. 12. Гистограмма распределения диаметров частиц в системе «цемент-вода». Время от начала затворения – 5 мин., среднее значение диаметров частиц – $9,1 \times 10^{-6}$ м

Рис. 13. Гистограмма распределения диаметров частиц в системе «цемент-вода». Время от начала затворения – 10 мин., среднее значение диаметров частиц – $6,1 \times 10^{-6}$ м

Рис. 14. Гистограмма распределения диаметров частиц в системе «цемент-вода». Время от начала затворения – 20 мин., среднее значение диаметров частиц – $10,2 \times 10^{-6}$ м

Рис. 15. Гистограмма распределения диаметров частиц в системе «цемент-вода». Время от начала затворения – 40 мин., среднее значение диаметров частиц – $9,7 \times 10^{-6}$ м

Рис. 16. Гистограмма распределения диаметров частиц в системе «цемент-вода». Время от начала затворения – 40 мин., среднее значение диаметров частиц – $7,8 \times 10^{-6}$ м

Как следует из расчетов среднего значения диаметров частиц цемента (рис. 12-16), диспергирование в начальные сроки затворения водой носит

колебательный характер, что видно из зависимости среднего размера частиц цемента от времени твердения (рис. 17).

**Рис. 17. Зависимость среднего размера частиц цемента от времени
твердения в системе «цемент-вода»**

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Твердение системы «цемент–вода» представляет собой сложный нелинейный физико-химический процесс, сопровождающийся эндо- и экзоэффектами, фазовыми превращениями, конкуренцией химических реакций различной природы (гидратообразование и кислотно-основное взаимодействие), чередованием структур, характеризующихся различными реологическими и деформативными свойствами. Все эти преобразования могут служить источниками возбуждающих факторов в процессе самоорганизации цементной композиции.

Самовоспроизведение структур – одно из наиболее фундаментальных информационных систем. По этой причине моделирование данного явления представляет особый интерес. Первый шаг в этом направлении был сделан

Дж. фон Нейманом. В дальнейшем было установлено, что независимо от того, каковы начальные связи в ансамбле частиц новообразований после некоторого обмена информацией (в известной степени здесь можно говорить об индукционном периоде, связанном с усвоением новой информации) начинается лавинообразное самовоспроизведение структур с прошедшими отбор новыми связями между составляющими частицами ансамбля. При этом более «сильные» связи стремятся расширить объём своего фазового пространства, используя в качестве «материала» для построения.

Причины воспроизводства себе подобных структур до конца не ясны, но одной из них может быть ритмичность электромагнитного кодирующего внешнего воздействия или способность системы генерировать на определенной стадии развития собственные поля и излучения. В процессе диспергирования новой фазы до коллоидных и наноразмеров система способна генерировать низкочастотный ток, который, возможно, и служит источником кодовой информации к воспроизведению себе подобных структур. Размножение таких структур, вероятно, протекает по фрактальному механизму. Это означает, что генерирование внутреннего или наложение внешнего электромагнитного поля может изменить условия «отбора» структур и привести к образованию цементного камня со свойствами, отличными от тех, которые создаются при отсутствии электромагнитного излучения. В ряде случаев такое размножение структур может протекать в режиме бифуркаций Фейгенбаума, носящих в устойчивых системах ритмичный колебательный характер, в отличие от систем, стремящихся к хаосу и разрушению, спектр колебаний которых является сплошным.

Список литературы

1. Lotov V.A. Gorlenko N.P., Sarkisov Ya.S., Shepelenko T.S. Hydratation and Curing Cycles International Conference Industrial and Civil Construction // Lecture Notes in Civil Engineering book series, LNCE, 2021. – V. 147. – P. 28-35.
2. Conte T., Bennacer R., Chaouche M. Thixotropic behavior of cement paste under large amplitude oscillatory shear // Appl. Rheol, 2017. – V.27. – P. 53914.
3. Кузнецова Т.В., Кудряшов И.В., Тимашев В.В. Физическая химия вяжущих материалов. – М.: Высшая школа, 1989. – 384 с.
4. Ахвердов И.Н. Основы физики бетона. – М.: Стройиздат, 1981. – 464 с.
5. Глывштейн А.Я. Колебания проводимости в воде // Биофизика, 1996. – Т. 51. – Вып. 2. – С. 565-558.
6. Глывштейн А.Я. Низкочастотные колебания проводимости в воде и водных растворов хлорида натрия и калия // Биофизика, 1996. – Т. 51. – Вып. 2. – С. 559-562.
7. Пасько О.А., Семенов А.В. Колебательные процессы в системе платиновый электрод-электрохимически активированная вода-воздух // ЖФХ, 1995 – Т. 68. – № 2. – С. 575-576.
8. Смирнов А.Н. Генерация акустических колебаний в химических реакциях и физико-химических процессах // Журнал РХО, 2000. – № 2. – С.29–25.
9. Romano R.C , Maciel M.H., Pileggi R.G., Cincotto M.A. Monitoring of hardening of Portland cement suspensions by Vicat test, oscillatory rheometry and isothermal calorimetry // Appl. Rheol., 2017. – V.27. – P. 36006.
10. Moncef Nehdi and Samer Al Martini. Effect of Temperature on Oscillatory Shear Behavior of Portland Cement Paste Incorporating Chemical Admixtures // Journal of Materials in Civil Engineering, 2007. – V.19(12).

11. Kumari D., Dhawan S.K., Agrawal N. and Swati Varshney S. Cement paint composite as pollution tracker for electromagnetic radiations // IOP Publishing Ltd Materials Research Express, 2018. – V. 5(12). – P. 125602.
12. Sarkisov Yu.S., Rahmanova I.A., Gorlenko N.P., Afanasyev D.A., Solonicina N.O., Debelova N.N., Ikonnikova K.V. About the role of adhesive and cohesive interactions in cement systems // IOP Conf. Series: Journal of Physics conf. Series, 2018. – P. 012034.
13. Stark J. Recent advances in the field of cement hydration and microstructure analysis // Cement and Concrete Research, 2011. – V. 41. – P. 666-678.
14. Juilland P., Galussi E., Flatt R., Scrivener K. Dissolution theory applied to the induction period in alite hydration // Cement and Concrete Research, 2010. – V. 40. – P. 831-844.
15. Pelleng R.J.M., Kushima A., Shahsavari R. A realistic molecular model of cement hydrates // PNAS (Proceedings of the National Academy of Sciences), 2009. – V.106(38). – P. 16102-16107.
16. Coumes C.C.D., Dhoury M., Champenois J-B., Mercier C., Damidot D. Physico-chemical mechanisms involved in the acceleration of the hydration of calcium sulfoaluminate cement by lithium ions // Cement and Concrete Research, 2017. – V. 96. – P. 42-51.
17. Marchon D., Flatt R.J. Mechanisms of cement hydration // Science and Technology of Concrete Admixtures, 2016. – P.129-145.
18. Zhang P., Leming Ou L., Liu K. Hydration Mechanism of Portland Cement Prepared from Stonecoal Vanadium Slag // Procedia Environmental Sciences, 2016. – V. 31. – P. 598-604.
19. Awoyera P.O., Akinmusuru J.O., Moncea A. Hydration mechanism and strength properties of recycled aggregate concrete made using ceramic blended cement // Cogent Engineering, 2017. – V.4(1). – P. 1282667.

20. Горленко Н.П., Саркисов Ю.С. Низкоэнергетическая активация дисперсных систем: монография. Томск: Изд-во ТГАСУ, 2011. – 264 с.
21. Горленко Н.П., Саркисов Ю.С., Кузнецова Т.В. Генерация собственных низкочастотных колебаний в системе «цемент-вода» // Техника и технология силикатов, 2005. – № 1. – С. 15-20.
22. Горленко Н.П., А.Н. Еремина, Ю.С. Саркисов. Электромагнитная обработка жидкости затворения цементных композиций // Физика и химия обработки материалов, 2005. – № 5. – С. 98-102.
23. Баженов Ю.М. Технология бетона. М.: Высшая школа, 1987.–515с.
24. Антропов Л.И. Теоретическая электрохимия. М.: Высшая школа, 1985. – 519 с.
25. Капранов В.В. Взаимодействие жидкой и твердой фаз в процессе гидратации цемента / В кн.: Шестой международный конгресс по химии цемента. М.: Стройиздат, 1976. – Т. 2. – С. 19-25.
26. Gorlenko N.P., Sarkisov Yu.S., Syryamkin V.I., Naumova L.B., Pavlova A.N., Laptev B.I. Wave mechanism of structure formation in cement compositions // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019. – V. 597. – P. 012030.
27. Lotov V.A. Cement particles interaction with water or cement hydration and curing mechanisms // Bulletin TPU. Geo Assets Eng. V. – 329(1). – P. 99-110.
28. Prša M.A., Kasaš-Lažetić K.K.2018 Electromagnetic fields and their impacts // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018. – V. 294(1). – P. 012001.
29. Zhong B., Zhang Y., Zhou J., Chen L., Li D. and Tan J. UV irradiation improves the bond strength of resin cement to fiber posts // Dental Materials Journal, 2018. – V. 30(4). – P. 455-460.
30. Патент РФ № 2475714. Дифференциальный микрокалориметр и способ измерения тепловыделения / В.А. Лотов, Ю.А. Иванов. МПК G01K017/08; заявл. 22.09.2010; опубл. 20.02. 2013. Бюлл. № 5.

31. Лотов В.А. Использование дифференциального микрокалориметра новой конструкции при исследовании тепловыделения в дисперсных системах // International Conference on Thermal Analysis and Calorimetry in Russia (RTAC-2016).—St. Petersburg: SPbPU, 2016.—V. 2. P. – 428-431.

32. Lotov V.A. Cement particles interaction with water or cement hydration and curing mechanisms // Bulletin TPU. Geo Assets Eng., 2018. – 329(1). – P. 99-110.

УДК 62-185.7

Глава 7.
**ВОЛНОВОЙ РЕЗОНАНС РОТОРА С ЖИДКОСТЬЮ
И ПЕРЕГОРОДКАМИ**

Никифоров Андрей Николаевич

К.Т.Н., С.Н.С.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН

Аннотация: Глава посвящена экспериментальному и теоретическому исследованию движения системы «гибкий ротор – маловязкая жидкость» при частичном заполнении роторной секторизированной полости. Показаны реальные (наблюдавшиеся на практике) и аналитически определенные частоты вынужденных колебаний ротора и жидкости. Частоты для последней связаны с угловыми скоростями бегущих плоских волн на её свободной поверхности. Решения в общем виде, полученные в предположении постоянных скоростей вращения и прецессии, заслуживают внимания разработчиков роторных машин, функционирующих с жидкостью, в которых явление волнового резонанса необходимо устранить или наоборот использовать.

Ключевые слова: вал, полость, маловязкая жидкость, радиальные перегородки, динамика, прецессия, колебания

WAVE RESONANCE OF ROTOR WITH FLUID AND BAFFLES

Nikiforov Andrey Nikolaevich

Abstract: The chapter is devoted to experimental and theoretical research of motion of a system "flexible rotor – low-viscosity liquid" with partial filling of the

rotor sectored hollow. It is shown the real (observed in practice) and analytically determined frequencies of resonant oscillations of the rotor and liquid. The frequencies for fluid are related to the angular velocities of propagating waves on its free surface. The solutions in general form, obtained under the assumption of constant speeds of rotation and whirling, deserve the attention of developers of rotary machines operating with a fluid, in which the phenomenon of wave resonance must be eliminated or, on the contrary, used.

Key words: shaft, hollow, low-viscous liquid, radial baffles, dynamics, whirl, oscillations

Предисловие

Интерес к самовозбуждающимся колебаниям роторов с полостями, частично заполненными маловязкой жидкостью типа смазочных масел и воды, появился в 60-х годах прошлого века и не уменьшается до сих пор. Это связано с результатами наблюдений при некоторых скоростях вращения аномальных вибраций центрифуг, гироскопов с жидкостным наполнением, газовых турбин с внутренним жидкостным охлаждением, вращающихся жидко-топливных ракет, жидкостных автобалансирующих устройств и другой техники со случайным проникновением жидкости внутрь высокоскоростных роторов.

В соответствии с современной теорией и опытом эксплуатации роторов, частично заполненных маловязкой жидкостью, констатируется, что самовозбуждающиеся колебания есть результат так называемого волнового резонанса, при котором частота «обратных» волн на свободной поверхности жидкости близка к частоте прецессии ротора. Обратными называются волны, распространяющиеся в направлении вращения жидкости с угловой скоростью меньшей, чем скорость вращения ротора. Принято считать, что в окрестности волнового резонанса ротор теряет динамическую устойчивость, т. к. возбуждается его круговая прецессия со значительной амплитудой, даже при качественной балансировке. Полагается, что чем больше радиальных

перегородок в полости, тем выше находятся собственные частоты волн и диапазон неустойчивого вращения ротора с частичным наполнением жидкостью.

Обозревая научные работы по динамике ротора при неполном наливе, можно заметить, что все ещё остается неопределенность скоростей волнового резонанса от количества вязкой жидкости и перегородок. Как следствие не получена в общем виде явная зависимость влияния объема и вязкости жидкости на частотный диапазон динамической неустойчивости ротора при разделении его полости на секторы.

В этой главе представлено экспериментально-теоретическое исследование, проведенное с целью уточнения известных и выявления новых закономерностей относительно поведения и влияния находящейся внутри секторизованного ротора жидкости на динамику системы. На основе полученных результатов по динамике ротора, частично заполненного той или иной жидкостью, полость которого содержит различное число радиальных перегородок, возможна оптимизация многих роторных машин, вместо того чтобы слепо следовать тривиальному техническому решению по подавлению волн – чем больше радиальных перегородок, тем лучше.

Экспериментальная база

Натурный динамический анализ проведен на установке (рис.1), основой которой является тонкий вертикальный вал, опирающийся на два шариковых подшипника, с консольно-насаженной прозрачной цилиндрической камерой, содержащей одинаковые тонкие легкоъемные перегородки с прослойками герметика, наносимого на их края.

Первая критическая частота экспериментального ротора без жидкости приблизительно равна 50 Гц и практически не понижалась с увеличением числа перегородок благодаря их малому весу. Заданное значение и изменение скорости вращения обеспечивал электродвигатель постоянного тока, питаемый через выпрямитель от лабораторного автотрансформатора. Передача крутящего

момента от электродвигателя к валу была либо прямой через гибкую муфту в случае вращения с низкими и средними угловыми скоростями, а именно с частотами ниже 140 Гц, либо повышающей ременной при необходимости разгона до 200 Гц. Здесь важно отметить, что от 200 Гц отстройка второй критической частоты экспериментального ротора как в пустом, так в полном жидкостью состоянии оставалась достаточно большой. Для безопасности поперечный прогиб вала ограничивался страхующим шарикоподшипником, размещенным вблизи камеры.

Рис. 1. Экспериментальная установка

Поперечные отклонения ротора в двух взаимно перпендикулярных направлениях и скорость вращения измерялись токовыхревыми датчиками. Электрические сигналы с переменным напряжением, пропорциональным величине зазора между этими датчиками и ротором, при помощи аналого-цифрового преобразователя и компьютера отображались в режиме реального времени и записывались. При наблюдении за движением ротора, жидкости и волн и измерении их скоростей вращения одновременно использовался

стробоскопический тахометр. При экспериментах также проводилась фото- и видеосъемка с разрешением 720p и скоростью 240 кадр/с или 4K и 30 кадр/с.

Первая критическая скорость, нижняя и верхняя границы волнового резонанса экспериментального ротора в зависимости от скорости вращения, числа перегородок, количества и вязкости жидкости в нём определялись соответственно по максимуму и внезапному росту/спаду огибающей поперечных колебаний ротора при медленном его разгоне-останове. В ходе экспериментов выяснилось, что имеется и вторая возможность обнаружения начала волнового резонанса – по появлению заметных, даже невооруженным глазом, биений ротора, т.е. биений его круговой прецессии. При этом изначально низкая (порядка нескольких герц) частота изменения радиального отклонения ротора уменьшалась по мере «вхождения» роторной скорости в диапазон существования биений со стороны области вынужденной прецессии ротора, т.е. его нормального синхронного движения, вызванного остаточным дисбалансом. Различие в скоростях, при которых начиналось внезапное повышение уровня вибраций и самовозбуждение ярко выраженных биений ротора, мало (порядка нескольких десятков оборотов в минуту), поэтому выбор критерия слабо влиял на результаты.

Явное воздействие на ротор волн, распространяющихся по свободной поверхности жидкости, подтверждалось при каждом её полном наливе-сливе, путем сравнения полученных АЧХ квазистационарных колебаний системы. В случаях пустого и полного ротора вне зависимости от числа перегородок возникала всегда одна резонансная область, тогда как при частичном заполнении – всегда две резонансные области. Многократный безаварийный переход ротора через соответствующие критические скорости обеспечил встроенный в экспериментальную установку шарикоподшипниковый ограничитель роторных колебаний.

Динамика экспериментального ротора с жидкостью и герметичными перегородками

Опыты проведены с тремя жидкостями – водой, дизельным топливом и минеральным маслом. При этом ротор имел либо свободную полость, либо полость с 2, 3, 4 и 6 радиальными перегородками.

С самого начала всей серии испытаний обнаружились непредвиденные сложности с роторным и волновым резонансами. Пики и границы схода с этих резонансов при разгоне несколько смещались в сторону высоких частот, при останове – в сторону низких. Гистерезис АЧХ при прохождении роторной системы через данные резонансные состояния в обоих направлениях порождал страшный подшипник, приводящий к контактному движению, т.е. к нелинейности системы при больших уровнях вибрации. Кроме того, роторный резонанс происходил в условиях небольшого «раздвоения» критической скорости, что, вероятно, связано с несимметричной жесткостью рамы установки и креплений подшипников.

Средняя критическая скорость ротора при полном наливе ожидаемо понижалась в соответствии с удельным весом жидкости (табл.1).

Таблица 1

Инерционно-динамические характеристики исследуемой системы

Жидкость	Плотность, г/см ³	Вязкость, мПа·с	Отношение массы жидкости, занимающей всю полость, к массе пустого ротора	Критическая скорость полного и частично заполненного ротора без перегородок, об/мин
Вода	1	1	0.4	2500
Дизельное топливо	0.88*	4*	0.35	2650
Минеральное масло	0.9*	60*	0.36	2650

* – по данным производителей данных жидкостей при 20°C.

Критическая скорость частично заполненного ротора (рис.2) без перегородок не зависит от объема жидкости в нём, за исключением случая весьма малых её количеств – недостаточных для смачивания всей боковой стенки полости при вращении/прецессии, и близка к той, которую имеет полный ротор. При повышенной вязкости жидкости возникает нормальная тенденция роста критической скорости ротора с уменьшением его массы, т.е. при опорожнении, которая, по-видимому, для масел остается пренебрежимо слабой. Герметичные перегородки приводят к явной зависимости критической скорости ротора от объема залитой жидкости и видно без какой-либо связи с количеством перегородок и вязкостью жидкости.

Рис. 2. Критическая скорость экспериментального ротора в зависимости от количества и вязкости жидкости, а также от числа перегородок и особенностей переливных отверстий в каждой из них (квадр. - 0 перегород., переверн. треуго. - 2 перегород., треуго. - 3 перегород., ромбы - 4 перегород., окруж. - 6 перегород., > - 3 перегород. с 32 разнесен.отв., < - 3 перегород. с 4 сосред.отв. у дна)

Как уже отмечалось, трудность исследования динамики ротора в области волнового резонанса состояла в самовозбуждении круговой прецессии большого радиуса, что часто приводило к выбору зазора между ротором и страхующим подшипником, т.е. к виброударному движению ротора. Тем не менее, при некоторых системных параметрах наблюдались траектории движения ротора в пределах указанного зазора, которые, очевидно, и представляют собой истинный характер прецессии ротора, возбуждаемой волнами. Анализ таких умеренных самовозбуждающихся колебаний ротора с жидкостью проведен, судя по научным трудам предшественников, впервые.

Исследованы как квазистационарные, так и установившиеся умеренные отклонения ротора в диапазоне волнового возмущения. Во всех случаях они представляют собой биения с различной степенью выраженности (рис.3).

Рис. 3. Квазистационарные колебания экспериментального ротора без перегородок при изменении частоты вращения от 65 до 85 Гц и 80%-ном заполнении дизтопливом

Частотный спектр не самых ярких биений, представленных на рис.4, после быстрого преобразования Фурье показывает, что имеются четыре источника вибрации. Остаточный дисбаланс дает синхронное возмущение, т.е. с оборотной частотой 156 Гц. Ременный привод с передаточным отношением 2.35 приводит к возбуждению с частотой 66 Гц. Основной пик — это динамическая неустойчивость или самовозбуждение собственных колебаний ротора с основной частотой пустого ротора 49 Гц. Очевидно, волнообразование

на поверхности жидкости есть четвертое возмущение, в частности с критической частотой полного ротора 41 Гц. Таким образом, биения вызваны близостью частот волнового возмущения и собственных колебаний ротора.

В общем, как показал спектральный анализ большого числа осциллограмм, в области динамической неустойчивости системы скорость самовозбуждающейся асинхронной прецессии ротора и угловая скорость волнового возмущения (волны) повышаются с нарастанием и снижаются с убыванием скорости вращения, т.е. увеличиваются при разгоне и уменьшаются при останове ротора. При этом они изменяются строго в пределах от критической скорости полного ротора у нижней границы до критической скорости пустого ротора у верхней границы области. Более того, они характеризуются уменьшающейся расстройкой между собой по мере изменения скорости вращения от нижней границы к центру неустойчивого диапазона. Отсюда наиболее выраженные биения системы происходят на нижней границе потери устойчивости.

Рис. 4. Стационарные колебания экспериментального ротора с четырьмя перегородками при вращении с частотой 156 Гц и 20%-ном заполнении водой, а также их частотный спектр

Подтверждение факта, что роторное и волновое движения совершаются с близкими угловыми скоростями, заключенными между критическими скоростями полного и пустого ротора, было визуальным в условиях освещения ротора стробоскопом, настроенным на частоту от 40 до 50 Гц. Получался эффект застывшего изогнутого ротора и движущейся волны по кругу или стоячей (неподвижной) волны относительно вращающегося ротора.

Рис. 5. Бегущая против часовой стрелки волна в полости вращающегося по часовой стрелке экспериментального ротора

Факт существования одной (уединенной) волны, даже в случаях с перегородками, легко подтверждается фотографиями (рис.5). При этом как показала видеосъемка, она является обратной, т.е. её перемещение

относительно боковой стенки полости, в т.ч. «сквозь» перегородки, происходит в сторону, противоположную вращению ротора.

В результате обобщения соответствующих экспериментальных данных определен скоростной диапазон асинхронных прецессий ротора, вызываемых волной. Он зависит от низших собственных частот пустого и полного ротора, числа перегородок, количества и вязкости жидкости. Причем нижняя граница диапазона является функцией критической скорости полного ротора Ω_R (рис.6), а верхняя – критической скорости пустого ротора ω_R и Ω_R .

Рис. 6. Диапазон скоростей неустойчивого вращения ротора вследствие волнового резонанса в зависимости от критической скорости полного ротора, количества перегородок и жидкости и её вязкости (треуг. - вода, окруж. - дизельное топливо, квадр. - минеральное масло)

Явление волнового резонанса не наступает при скоростях вращения ниже Ω_R и выше $(1 + \sqrt{\kappa/2})(2\omega_R - \Omega_R)$, где коэффициент κ зависит от числа радиальных перегородок, в частности, если перегородки отсутствуют $\kappa = 1$. С увеличением вязкости жидкости и числа перегородок область динамической неустойчивости системы уменьшается, более того, вплоть до полного исчезновения. В частности, биения перестали наблюдаться у экспериментального ротора с водой и шестью перегородками.

Таким образом, полученные экспериментальные данные дают основание утверждать, что есть потенциал оптимизации роторных машин. Возможно установить достаточное и необязательно большое количество перегородок для устранения динамической неустойчивости (волн) при вращении/прецессии ротора с жидкостью.

Динамика экспериментального ротора с жидкостью и проницаемыми перегородками

Влияние негерметичности секторов полости на критическую скорость и диапазон волнового резонанса оценено с помощью ротора, содержащего воду и три перегородки. Каждая из них имела одинаковую проницаемость, что реализовано либо рядом из четырех отверстий с диаметром 2 мм, сосредоточенных недалеко от края перегородки, примыкающего к боковой стенке полости, либо пятью рядами из четырех и четырьмя рядами из трех таких же отверстий, разнесенных подобно сотовой структуре по всей площади перегородки, которая близка к квадрату 32x32 мм². Расстояние между смежными рядами отверстий составляло 2.5 мм. Таким образом, суммарная площадь отверстий в одном ряду 4π или 3π мм² по отношению к площади участка перегородки 2.5x32 мм², на котором они располагались, была порядка 15%.

Жидкостный обмен между секторами полости через переливные каналы приводит к промежуточным значениям критической скорости по сравнению с

ротором без перегородок или с непроницаемыми перегородками (см. рис.2 справа внизу). Эта тенденция особенно заметна при 10%-ном заполнении экспериментального ротора водой. Очевидно, чем больше поперечное сечение переливных каналов в перегородках, тем ближе значения критической скорости ротора с проницаемыми секторами к критической скорости ротора без перегородок (полного ротора). В общем, для этого необходимо и достаточно, чтобы переливные каналы находились на дне слоя жидкости, т.е. как можно ближе к периферийным краям перегородок, а также соизмерялись с вязкостью жидкости. Проходное сечение каналов следует увеличивать пропорционально вязкости.

Эффект изменения области волнового резонанса за счет проницаемости перегородок иллюстрирует рис.7. Границы диапазона волнообразования определяются удаленностью переливных каналов от свободной поверхности жидкости. Система, состоящая из ротора, частично заполненного жидкостью, и перегородок, в которых переливные каналы разнесены по всей площади перегородки (вариант с 32 отверстиями в каждой перегородке), незначительно отличается от аналогичной роторной системы без перегородок. Они имеют идентичные нижние и несовпадающие верхние границы волнового резонанса.

Рис. 7. Диапазон волнового резонанса в роторе в зависимости от критической скорости полного ротора, количества воды и особенностей переливных каналов перегородок (квадр. - 0 перегород., треугол. - 3 перегород., > - 3 перегород. с 32 разнесен.отв., < - 3 перегород. с 4 сосред.отв. у дна)

Ротор с перегородками, в которых ряд переливных каналов сосредоточен на некотором расстоянии от боковой стенки полости (вариант с 4 отверстиями в каждой перегородке), при толщине слоя жидкости меньше этого расстояния характеризуется границами волнообразования герметичного ротора. Этот же ротор при толщине слоя жидкости больше этого расстояния приобретает волновые свойства ротора без перегородок. Однако при заполнении такого ротора – чем дальше переливные каналы оказываются от поверхностного слоя жидкости, тем заметнее верхняя граница волнообразования приближается к нижней, вплоть до полного исчезновения волн в системе.

Явления резкого изменения критической скорости и границ волнового резонанса при неполном наливе маловязкой жидкости разумно использовать для снижения уровня синхронных вибраций ротора, вызванных его дисбалансом, в т.ч. при прохождении его критической скорости, а также для одновременного устранения зоны асинхронных колебаний системы вследствие волнообразования. На основании полученных экспериментальных данных, наиболее перспективной в этом смысле видится система ротора с маловязкой жидкостью, тремя перегородками и донными переливными каналами (непосредственно на концах перегородок у боковой стенки полости).

Идея сдерживания вибрации с использованием жидкости внутри ротора в том, чтобы скачком перейти с одной АЧХ системы на другую при частоте вращения, когда прецессия становится значительной. Это реализуемо с помощью вливания достаточного количества жидкости.

Возвращаясь к фотографиям экспериментальной роторной полости, частично заполненной той или иной жидкостью (рис.5), можно видеть, что были изготовлены две прозрачные крышки. Крышка с малым резьбовым отверстием и соответствующим винтом в центре использовалась в «тандеме» со шприцем, чтобы реализовать любое наполнение, в т.ч. 100%-ное. Крышка с центральным отверстием большого диаметра позволяла производить быстрое

наполнение полости жидкостью, типа воды и смазочных масел, без специальных приспособлений, в т.ч. прямо на ходу, т.е. без остановки ротора.

Амплитуды ($A = \sqrt{x^2 + y^2}$) квазистационарных колебаний экспериментального ротора с пустой 1 и полной 2 полостью, а также с половинным её заполнением на ходу 3 – с вливанием жидкости при вращении со скоростью 2700 об/мин – показаны на рис.8. Здесь важно уточнить, в последнем случае ротор был пустым вначале разгона, затем на 40-ой секунде, пока угловая скорость была около 2700 об/мин, он заполнялся водой до половины объема его полости за короткий промежуток времени (в течение одной секунды), далее ротор предоставлялся сам себе, т.е. разгонялся и останавливался без какого-либо вмешательства.

Как видно из амплитуд (рис.8), при разгоне (до 62-ой секунды) происходит заметное снижение уровня и сужение полосы резонансных колебаний ротора. Максимальное отклонение заполняемого на ходу ротора 3 уменьшается примерно на 20 и 40 % по сравнению с полным 2 и пустым 1 ротором соответственно. Увеличенный фрагмент осциллограмм показывает, что во время вливания ротор испытывает позитивный шок – возвращается к недеформированному состоянию – его амплитуда прецессии падает до нуля (напряжение датчиков устремляется к номинальному 3 В), далее ротор входит в «половинный» резонанс на приобретаемой критической скорости (2600 об/мин). Реализуется «закритическая половина» резонанса – полоса после критической скорости. Поскольку скорость вращения и вливания 2700 об/мин выше приобретенной критической 2600 об/мин, резонансная амплитуда также уменьшается.

При останове (с 62-ой секунды) ширина резонанса остается примерно одинаковой. Пик резонанса в первом случае приходится на 3000, во втором – на 2500, в третьем – на 2600 об/мин, т.е. на критическую скорость ротора в зависимости от количества воды в нём.

В идеале «зеленый» ротор мог бы незаметно перейти от АЧХ пустого ротора («красная» вибрация) к АЧХ полного ротора («синяя» вибрация) за счет быстрого вливания жидкости, когда амплитуды колебаний пустой и полной систем сравниваются (44-ая секунда). В действительности, как показали эксперименты в т.ч. с маслом, во-первых поймать такой момент затруднительно, особенно при неравножесткости ротора или опор, а во-вторых достижению абсолютного успеха мешает вязкость жидкости. Вливание жидкости в полость, а затем её растекание по внутренней поверхности ротора не являются мгновенными процессами.

Рис. 8. Угловая скорость и поперечное отклонение пустого (кр.), полного (син.) и частично заполненного на ходу (зел.) экспериментального ротора

Итак, вливаемая в полость жидкость безусловно быстро, но в то же время постепенно «перенастраивает» ротор так, что его критическая скорость безразрывно изменяется, в частности с 3000 до 2600 об/мин. Стремительное, последовательное изменение инерции и, следовательно, критической скорости ротора синхронно сдвигает диапазон его резонансного состояния. Отсюда ротор непременно войдет в резонанс в той или иной мере. Тем не менее, вливание жидкости – это эффективный и перспективный метод подавления резонансных вибраций ротора, особенно в сочетании с большим угловым ускорением. В этом случае достижимо сжатие их полосы и размаха как гармошки.

Теория движения ротора с маловязкой жидкостью и радиальными перегородками

Пусть простейший симметричный полый ротор в виде двухопорного гибкого вала с цилиндрической полостью посередине имеет внутри несколько радиальных перегородок, причем образованные ими отсеки одинаковы, частично и равно заполнены несжимаемой маловязкой жидкостью, и вся эта роторная система вращается с постоянной угловой скоростью ω .

В случае вертикальной ориентировки, уравновешенности и невозмущенного (чистого) вращения такой системы ротор движется вместе с жидкостью как одно твердое тело вне зависимости от вязкости. Пусть относительно этого динамического равновесия колебания ротора и жидкости малы, т.е. возмущенным движением ротора является прецессия его геометрического центра с отличной от ω угловой скоростью Ω и малым радиусом e , а возмущенным движением жидкости являются малые перемещения её некоторых частиц с линейными скоростями u, v относительно ротора (рис.9), в т.ч. с отклонением ε свободной её поверхности от внутреннего радиуса r гипотетической жидкости, затвердевшей при синхронной прецессии системы.

Здесь и далее приняты допущения, что числа Рейнольдса, Фруда и Бонда достаточно велики, т.е. что эффекты вязкости, поверхностного натяжения и гравитации пренебрежимо слабо отражаются на поведении пограничных слоёв жидкости. Таким образом, жидкость рассматривается как идеальная, однослойная и невесомая. Условия, при которых это возможно: $\omega r^2 \gg \nu$, $\rho r^3 \omega^2 \gg \sigma$ и $r \omega^2 \gg g$ (когда ось роторной системы ориентирована вертикально) или $r^2 \omega^2 \gg gL$ (когда – горизонтально), где ν , ρ и σ - кинематическая вязкость, плотность и коэффициент поверхностного натяжения жидкости, g - гравитационное ускорение, L - размер полости вдоль собственной оси.

Рис. 9. Динамическая модель симметричного гибкого ротора с полостью, разделенной сплошными радиальными перегородками, частично и равно заполненной маловязкой жидкостью, а также плоских (распространяющихся в окружном направлении) волн 1-го порядка ($\kappa=1$)

Асинхронную прецессию ротора удобно анализировать в неподвижной цилиндрической системе координат $e\psi Z$ с началом в геометрическом центре полости при недеформированном вале ротора, так что ось Z есть линия центров подшипников. Колебания вращающейся жидкости удобно исследовать в связанной с ротором цилиндрической системе координат $r\theta z$, начало которой находится в центре полости деформированного ротора, а также с осью z , параллельной оси Z .

Со введением неподвижных декартовой XYZ и цилиндрической $e\psi Z$, а также движущихся вместе с ротором прямоугольной xuz и цилиндрической $r\theta z$ систем отсчета динамическая модель полого секторированного ротора с жидкостью принимает вид (рис.9).

В рассматриваемой системе пустой ротор имеет массу m . Подшипники являются жесткими по сравнению с валом, обладающим изгибной жесткостью k . Внутреннее и внешнее демпфирование ротора, включая трение в подшипниках, характеризуются коэффициентами b и d соответственно. В такой формулировке как известно [1, 2], уравнения движения гибкого симметричного ротора имеют вид:

$$\begin{aligned} m\ddot{X} + (b + d)\dot{X} + kX + b\omega Y &= F_x \\ m\ddot{Y} + (b + d)\dot{Y} + kY - b\omega X &= F_y \end{aligned}$$

где X, Y - отклонения геометрического центра ротора (полости) от положения равновесия вдоль осей неподвижной прямоугольной системы координат, F_x и F_y - составляющие некоторой силы F , действующей со стороны жидкости на ротор, вследствие его отклонений X и Y .

То же самое, вводя удобное комплексное представление отклонений $Z = X + iY$:

$$m\ddot{Z} + (b + d)\dot{Z} + kZ - ib\omega Z = F, \text{ где } F = F_x + iF_y.$$

Путём подстановки $Z = e e^{i\psi}$ можно выразить уравнение прецессии заданного ротора в полярных координатах e, ψ :

$$m(\ddot{e} + i e \ddot{\psi} + i 2 \dot{e} \dot{\psi} - e \dot{\psi}^2) + (b + d) \dot{e} + k e + i d e \dot{\psi} + i b e (\dot{\psi} - \omega) = F e^{-i \psi}. \quad (1)$$

Составляющие гидродинамической силы F есть интегральные величины (суммы) проекций на неподвижные оси X и Y давлений жидкости на всей поверхности S боковой стенки полости:

$$F_X = \int_S p_{r=R} \cos(\omega t + \theta) dS, \quad F_Y = \int_S p_{r=R} \sin(\omega t + \theta) dS, \quad \text{где } dS = RL d\theta. \quad (2)$$

Соответственно, гидродинамические составляющие в направлениях подвижных осей x и y :

$$F_x = RL \int_0^{2\pi} p_{r=R} \cos \theta d\theta, \quad F_y = RL \int_0^{2\pi} p_{r=R} \sin \theta d\theta.$$

Очевидно, анализ движения ротора, содержащего жидкость, требует решения совместной задачи теории колебаний и гидродинамики. Гидродинамическая сторона задачи сводится к отысканию поля давлений в наиболее общем случае с помощью уравнений Навье-Стокса и неразрывности. Согласно им, течение вязкой жидкости, свободной от массовых и поверхностных сил, вращающейся со скоростью ротора ω и в то же время прецессирующей вместе с ним со скоростью $\dot{\psi}$ (рис.9) будут определять уравнения [3, 4]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} - v \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{\partial u}{r \partial r} + \frac{\partial^2 u}{r^2 \partial \theta^2} - \frac{u}{r^2} - 2 \frac{\partial v}{r^2 \partial \theta} \right) + u \frac{\partial u}{\partial r} + v \frac{\partial u}{r \partial \theta} - \\ - \frac{v^2}{r} - \omega^2 r - 2 \omega v = - \frac{\partial p}{\rho \partial r} - \ddot{X} \cos(\omega t + \theta) - \ddot{Y} \sin(\omega t + \theta), \\ \frac{\partial v}{\partial t} - v \left(\frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{\partial v}{r \partial r} + \frac{\partial^2 v}{r^2 \partial \theta^2} - \frac{v}{r^2} + 2 \frac{\partial u}{r^2 \partial \theta} \right) + u \frac{\partial v}{\partial r} + v \frac{\partial v}{r \partial \theta} + \\ + \frac{uv}{r} + 2 \omega u = - \frac{\partial p}{\rho r \partial \theta} + \ddot{X} \sin(\omega t + \theta) - \ddot{Y} \cos(\omega t + \theta), \\ r \frac{\partial u}{\partial r} + u + \frac{\partial v}{\partial \theta} = 0. \end{aligned} \quad (3)$$

где u и v - радиальная и тангенциальная составляющие скорости частицы жидкости в связанной с ротором (подвижной) цилиндрической системе отсчета, r и θ - координаты жидкостной частицы в этой полярной системе, p - давление в любой точке жидкости, ρ и ν - её плотность и кинематическая вязкость.

Члены с множителем ω^2 и 2ω учитывают влияние нормального ускорения и ускорения Кориолиса от вращения ротора, а члены с множителем $\ddot{X}$ и $\ddot{Y}$ характеризуют эффект переносного ускорения начала отсчета связанной с ротором системы координат за счет его прецессии.

Возмущенные скорости u, v сопряжены с возмущенным давлением p , увеличивающим стационарное p_0 , которое пропорционально квадрату скорости вращения ω^2 . По аналогии с гидростатическим давлением столба жидкости, в заданной системе ускорение $=\omega^2(r+r)/2$, а высота $=r-r$. Таким образом, без потери общности, давление в жидкости:

$$p = p_0 + p(r, \theta, t), \text{ где } p_0 = \rho\omega^2(r^2 - r^2)/2. \quad (4)$$

Похожим образом определяется свободная поверхность жидкости:

$$r = r + \varepsilon(\theta, t), \quad (5)$$

где ε - её возмущенное смещение.

Граничные условия, дополняющие (3), т.е. задающие поведение уравнений (3) на поверхностях жидкости:

$$u = 0 \text{ при } r = R \text{ (на боковой стенке полости),}$$

$$v = 0 \text{ при } \theta = M \gamma, \text{ где } M - \text{целое число от } 0 \text{ до } n, \gamma = 2\pi/n \text{ (на } n \text{ перегородках)}$$

,

$$u = \partial\varepsilon/\partial t, \quad p = 0 \text{ при } r = r \text{ (на свободной поверхности жидкости).}$$

При этом, если подставить (5) в (4) и отбросить квадрат малого, т.е. величину ε^2 , то $p = \rho\omega^2 r \varepsilon + p(r, \theta, t)$ и $p_{r=r} = -\rho\omega^2 r \varepsilon$, а ключевые кинематические и динамические граничные условия могут быть преобразованы к виду:

$$u_{r=R} = 0, \quad \partial p_{r=r} / \partial t = -\rho\omega^2 r u_{r=r}. \quad (6)$$

Задача состоит в отыскании решений (законов) таких движений, которые представляют собой малое незатухающее периодическое+переносное отклонение жидкости в окружном направлении от её установившегося состояния вращения как твердого тела. В этом случае можно пренебречь в уравнениях (3) вязкими компонентами и скоростными членами второго порядка малости, а также с учетом (4) в первом приближении получить:

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial t} - 2\omega v &= -\frac{\partial p}{\rho \partial r} - \ddot{X} \cos(\omega t + \theta) - \ddot{Y} \sin(\omega t + \theta), \\ \frac{\partial v}{\partial t} + 2\omega u &= -\frac{\partial p}{\rho r \partial \theta} + \ddot{X} \sin(\omega t + \theta) - \ddot{Y} \cos(\omega t + \theta), \\ r \frac{\partial u}{\partial r} + u + \frac{\partial v}{\partial \theta} &= 0,\end{aligned}$$

где p - переменная часть давления в любой точке жидкости.

При умножении второго уравнения на мнимую единицу и сложении первых двух уравнений, а затем при умножении первого уравнения на мнимую единицу и вычитании из него второго уравнения, они преобразуются в:

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial t} - 2\omega v + i \frac{\partial v}{\partial t} + i 2\omega u &= -\frac{\partial p}{\rho \partial r} - i \frac{\partial p}{\rho r \partial \theta} - \ddot{Z} e^{-i(\omega t + \theta)} \\ i \frac{\partial u}{\partial t} - i 2\omega v - \frac{\partial v}{\partial t} - 2\omega u &= -i \frac{\partial p}{\rho \partial r} + \frac{\partial p}{\rho r \partial \theta} - i \ddot{Z} e^{-i(\omega t + \theta)}.\end{aligned}\quad (7)$$

Решение уравнений стационарного движения системы «ротатор-жидкость»

В случае установившейся прецессии $\psi = \Omega t$, $e = \text{const}$, $\ddot{Z} = -e\Omega^2 e^{i\Omega t}$, т.е. системные уравнения (1) и (7) принимают вид:

$$ke - me\Omega^2 + ibe(\Omega - \omega) + ide\Omega = Fe^{-i\Omega t}, \quad (8)$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial t} - 2\omega v &= -\frac{\partial p}{\rho \partial r} + e\Omega^2 e^{i(\Omega t - \theta)}, \\ \frac{\partial v}{\partial t} + 2\omega u &= -\frac{\partial p}{\rho r \partial \theta} - ie\Omega^2 e^{i(\Omega t - \theta)}, \\ r \frac{\partial u}{\partial r} + u + \frac{\partial v}{\partial \theta} &= 0, \quad \text{где } \Omega = \Omega - \omega.\end{aligned}\tag{9}$$

Если предположить, что:

$$\begin{aligned}\varepsilon(\theta, t) &= a(\theta) e^{i\Omega t} \\ p(r, \theta, t) &= P(r, \theta) e^{i\Omega t} \\ u(r, \theta, t) &= U(r, \theta) e^{i\Omega t}, \\ v(r, \theta, t) &= V(r, \theta) e^{i\Omega t}\end{aligned}\tag{10}$$

то подстановка функций (10) в уравнения вынужденного движения жидкости (9) приводит к:

$$\begin{aligned}i\Omega U - 2\omega V &= -\frac{\partial P}{\rho \partial r} + e\Omega^2 e^{-i\theta} \\ i\Omega V + 2\omega U &= -\frac{\partial P}{\rho r \partial \theta} - ie\Omega^2 e^{-i\theta}. \\ r \frac{\partial U}{\partial r} + U + \frac{\partial V}{\partial \theta} &= 0\end{aligned}$$

Решения первых двух из этих уравнений следующие:

$$\begin{aligned}U &= i \frac{\Omega}{\rho(\Omega^2 - 4\omega^2)} \frac{\partial P}{\partial r} + \frac{2\omega}{\rho r(\Omega^2 - 4\omega^2)} \frac{\partial P}{\partial \theta} - ie\Omega^2 \frac{\Omega - 2\omega}{\Omega^2 - 4\omega^2} e^{-i\theta} \\ V &= -\frac{2\omega}{\rho(\Omega^2 - 4\omega^2)} \frac{\partial P}{\partial r} + i \frac{\Omega}{\rho r(\Omega^2 - 4\omega^2)} \frac{\partial P}{\partial \theta} - e\Omega^2 \frac{\Omega - 2\omega}{\Omega^2 - 4\omega^2} e^{-i\theta}.\end{aligned}\tag{11}$$

С этими выражениями третье уравнение (неразрывности) дает:

$$r^2 \frac{\partial^2 P}{\partial r^2} + r \frac{\partial P}{\partial r} + \frac{\partial^2 P}{\partial \theta^2} = 0.$$

Если предположить, что решением этого уравнения является

$$P(r, \theta) = P(r) e^{-in\theta},$$

где n – число радиальных перегородок, то получится простейшая форма уравнения Бесселя:

$$r^2 \frac{\partial^2 P}{\partial r^2} + r \frac{\partial P}{\partial r} - n^2 P(r) = 0,$$

общее решение которого:

$$P(r) = C_1 r^n + C_2 r^{-n}, \quad (12)$$

где C_1 и C_2 – константы, определяющиеся исходными (6) или в силу равенств:

$$\begin{aligned} p_{r=r} &= P(r, \theta) e^{i\Omega t} = P(r) e^{-in\theta} e^{i\Omega t} \\ u_{r=r} &= U(r, \theta) e^{i\Omega t} = U(r) e^{-in\theta} e^{i\Omega t} \\ u_{r=R} &= U(R, \theta) e^{i\Omega t} = U(R) e^{-in\theta} e^{i\Omega t} \end{aligned}$$

граничными условиями вида:

$$U(R) = 0, \quad i\Omega P(r) = -\rho\omega^2 r U(r).$$

Чтобы найти C_1 и C_2 , следует перейти от U к $U(r)$, производя в (11)

замены $\frac{\partial P}{\partial r} = \frac{\partial P(r)}{\partial r} e^{-in\theta}$ и $\frac{\partial P}{\partial \theta} = -inP(r) e^{-in\theta}$, т.е.:

$$\begin{aligned} U(r) &= i \frac{\Omega}{\rho(\Omega^2 - 4\omega^2)} \frac{\partial P(r)}{\partial r} - i \frac{2\omega n}{\rho r(\Omega^2 - 4\omega^2)} P(r) - ie\Omega^2 \frac{\Omega - 2\omega}{\Omega^2 - 4\omega^2} e^{i(n-1)\theta} \\ V(r) &= -\frac{2\omega}{\rho(\Omega^2 - 4\omega^2)} \frac{\partial P(r)}{\partial r} + \frac{n\Omega}{\rho r(\Omega^2 - 4\omega^2)} P(r) - e\Omega^2 \frac{\Omega - 2\omega}{\Omega^2 - 4\omega^2} e^{i(n-1)\theta}. \end{aligned}$$

Раскрытие здесь $P(r)$ и $\partial P(r)/\partial r$ через равенство (12) приводит к выражениям:

$$\begin{aligned} U(r) &= i \frac{n}{\rho} \left(\frac{C_1 r^{n-1}}{\Omega + 2\omega} - \frac{C_2 r^{-n-1}}{\Omega - 2\omega} \right) - i \frac{e\Omega^2}{\Omega + 2\omega} e^{i(n-1)\theta} \\ V(r) &= \frac{n}{\rho} \left(\frac{C_1 r^{n-1}}{\Omega + 2\omega} + \frac{C_2 r^{-n-1}}{\Omega - 2\omega} \right) - \frac{e\Omega^2}{\Omega + 2\omega} e^{i(n-1)\theta}. \end{aligned} \quad (13)$$

Условие $U(R)=0$ и (13) определяют, что

$$C_2 = C_1 \frac{\Omega - 2\omega}{\Omega + 2\omega} R^{2n} - \frac{\rho e\Omega^2}{n} \frac{\Omega - 2\omega}{\Omega + 2\omega} R^{n+1} e^{i(n-1)\theta}. \quad (14)$$

На основании соотношений $i\Omega(C_1 r^n + C_2 r^{-n}) = -\rho\omega^2 r U(r)$, (13) и (14) получается, что

$$C_1 = \frac{\rho e \Omega^2}{n} \frac{\Omega^2 - 2\omega\Omega - \bar{\sigma} n \omega^2}{\Omega^2 - 2\sigma\omega\Omega - \sigma n \omega^2} \frac{R^{n+1}}{R^{2n} + r^{2n}} e^{i(n-1)\theta}, \quad (15)$$

где $\sigma = \frac{R^{2n} - r^{2n}}{R^{2n} + r^{2n}}, \quad \bar{\sigma} = 1 - \frac{r^{n+1}}{R^{n+1}}.$

Константа (14) при подстановке (15) преобразуется в:

$$C_2 = -\frac{\rho e \Omega^2}{n} \frac{\Omega - 2\omega}{\Omega + 2\omega} \frac{\Omega(\Omega + 2\omega)r^{2n} + \bar{\bar{\sigma}} n \omega^2}{\Omega^2 - 2\sigma\omega\Omega - \sigma n \omega^2} \frac{R^{n+1}}{R^{2n} + r^{2n}} e^{i(n-1)\theta}, \quad (16)$$

где $\bar{\bar{\sigma}} = r^{2n} - R^{2n} \frac{r^{n+1}}{R^{n+1}}.$

Выражение (12) с заменами (15) и (16) принимает вид:

$$P(r) = \frac{\rho e \Omega^2}{n} \frac{R^{n+1}}{R^{2n} + r^{2n}} \times \\ \times \frac{(\Omega^2 - 2\omega\Omega - \bar{\sigma} n \omega^2)r^n - (\Omega^2 - 2\omega\Omega)r^{2n}r^{-n} - \frac{\Omega - 2\omega}{\Omega + 2\omega} \bar{\bar{\sigma}} n \omega^2 r^{-n}}{\Omega^2 - 2\sigma\omega\Omega - \sigma n \omega^2} e^{i(n-1)\theta}.$$

Соответственно

$$p(R, \theta, t) = \frac{\rho e \Omega^2}{n} f(R, r, n, \Omega, \omega) \operatorname{Re} e^{i(\Omega t - \theta)},$$

где $f(R, r, n, \Omega, \omega) = \frac{(\Omega^2 - 2\omega\Omega - \bar{\sigma} n \omega^2)R^{2n} - (\Omega^2 - 2\omega\Omega)r^{2n} - \frac{\Omega - 2\omega}{\Omega + 2\omega} \bar{\bar{\sigma}} n \omega^2}{(\Omega^2 - 2\sigma\omega\Omega - \sigma n \omega^2)(R^{2n} + r^{2n})},$

и при отбрасывании мнимой части $e^{i(\Omega t - \theta)}$ выражение суммарной реакции жидкости на боковую стенку ротора:

$$P_{r=R} = \frac{\rho \omega^2}{2} (R^2 - r^2) + \frac{\rho e \Omega^2}{n} f(R, r, n, \Omega, \omega) R \cos(\Omega t - \theta).$$

Таким образом, составляющие искомой гидродинамической силы согласно (2):

$$F_X = \frac{m_F e \Omega^2}{n} f(R, r, n, \Omega, \omega) \cos(\Omega + \omega)t, \quad F_Y = \frac{m_F e \Omega^2}{n} f(R, r, n, \Omega, \omega) \sin(\Omega + \omega)t,$$

где $m_F = \rho\pi R^2 L$ - масса жидкости, необходимая для полного заполнения полости ротора.

Для завершения формулировки, принимая во внимание равенство $\Omega = \Omega + \omega$, остается лишь подставить выражение $F = \frac{m_F e \Omega^2}{n} f(R, r, n, \Omega, \omega) e^{i\Omega t}$ в (8), разделяя вещественные и мнимые части:

$$ke - me\Omega^2 = \frac{m_F e \Omega^2}{n} \frac{(\Omega^2 - 2\omega\Omega - \bar{\sigma}n\omega^2)R^{2n} - (\Omega^2 - 2\omega\Omega)r^{2n} - \frac{\Omega - 2\omega}{\Omega + 2\omega}\bar{\sigma}n\omega^2}{(\Omega^2 - 2\sigma\omega\Omega - \sigma n\omega^2)(R^{2n} + r^{2n})}.$$

$$b(\omega - \Omega) = d\Omega$$

Итак, согласно первому уравнению равновесия сил реакция жидкости на смещение ротора радиальна и направлена от начала отсчета. Второе уравнение показывает, что силы внутреннего и внешнего трения уравнивают друг друга. В знаменатель правой части первого уравнения входит известное уравнение частот собственных колебаний жидкости, а именно свободных поверхностных плоских волн [5]:

$$\omega_k^2 - 2\sigma\omega\omega_k - \sigma k\omega^2 = 0,$$

где $k=n\kappa$ - волновое число, κ - число гребней/подошв в волне вдоль окружности вращающейся жидкости в каждом из n отсеков (рис.9), образованных n радиальными перегородками (в случае отсутствия перегородок $k=\kappa$).

Корни последнего уравнения:

$$\omega_k^{+,-} = \omega \left(\sigma \pm \sqrt{\sigma^2 + k\sigma} \right),$$

где нижним знаком характеризуется волна, распространяющаяся против вращения, а верхним – прямая волна.

В результате совпадение Ω с одной из частот $\omega_k^{+,-}$ вводит систему «ротор-жидкость» в состояние волнового резонанса и может привести к потере динамической устойчивости.

Список литературы

1. Хронин Д.В. Теория и расчет колебаний в двигателях летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, – 1970. – 412 с.
2. Голоскоков Е.Г., Филиппов А.П. Нестационарные колебания механических систем. – Киев: Наукова думка, – 1966. – 336 с.
3. Гольдштик М.А., Штерн В.Н., Яворский Н.И. Вязкие течения с парадоксальными свойствами. – Новосибирск: Наука (сибирское отделение), – 1989. – 336 с.
4. Firouz-Abadi R.D., Haddadpour H. The Flexural Instability of Spinning Flexible Cylinder Partially Filled With Viscous Liquid. Journal of Applied Mechanics, Vol.77 (2010), No.1.
5. Никифоров А.Н. Поверхностные и внутренние двумерные колебания вращающейся жидкости в роторе с перегородками // Вестник научно-технического развития. – 2016. – № 11 (111). – С. 19-31.

УДК.681.34

Глава 8.
КОМПЛЕКС СРЕДСТВ СВЯЗИ ИСПЫТАТЕЛЬНОЙ
МОДЕЛИРУЮЩЕЙ УСТАНОВКИ.
ПРОБЛЕМЫ И ВАРИАНТЫ РЕШЕНИЯ

Мустафаев Нияз Гаджикурбанович
канд. техн. наук, доцент филиала АГУ
Леонтьев Роман Владимирович
начальник научно-исследовательского
испытательного управления
Игнатов Виталий Николаевич
старший научный сотрудник

Аннотация. В данной главе рассматривается роль и место комплекса средств связи (КСС) испытательной моделирующей установки (ИМУ) в ходе проведения испытаний опытных образцов сложных технических систем (СТС) специального назначения (СН).

Проводится анализ состояния существующего аналогового КСС ИМУ. Рассмотрены возможности его взаимодействия с вновь создаваемыми образцами комплексов средств автоматизации и существующие в настоящее время ограничения, затрудняющие выполнение задач по предназначению. Приведены примеры решения проблем, связанных с повышением эффективности его функционирования в современных условиях. Предложен вариант его модернизации до автоматизированной системы, целью которого должно стать обеспечение актуальности и востребованность на длительный период времени на основе возможностей современных информационных технологий. Рассмотрена возможность и целесообразность создания системы, способной работать без помощи специалиста-оператора, ответственного за

принятие решения по поводу действия – «интеллектуальная поддержка принятия решения».

Ключевые слова: моделирующая установка, сложная техническая система, комплекс средств автоматизации, протокол, канал

THE COMPLEX OF CONNECTION MEANS OF TEST MODELING INSTALLATION. PROBLEMS AND SOLUTIONS.

Abstract: This chapter discusses the role and place of the complex of connection means (CCM) of the test modeling installation (TMI) during the testing of prototypes of complex technical systems(CTS) for special purposes (SP).

The analysis of the state of the existing analog CCM TMI is carried out. The possibilities of its interaction with newly created samples of automation complexes and the currently existing limitations that make it difficult to perform tasks for their intended purpose were considered. Examples of solving problems related to improving the efficiency of its functioning in modern conditions are given. A variant of its modernization to an automated system is proposed, the purpose of which should be to ensure relevance for a long period of time based on the capabilities of modern information technologies. The possibility and expediency of creating a system that can work without the help of a specialist-operator responsible for making a decision about an action-"intellectual decision support" is considered.

Key words. modeling installation, complex technical system, complex of automation tools, protocol, channel

Введение

Одним из важнейших этапов создания сложных технических систем является проведение их испытаний. Существует много вариантов описания сложных систем. При рассмотрении СТС СН, создаваемых в интересах

профильного Министерства, под термином СТС будем понимать человеко-машинные системы, поведение которых в значительной степени зависит от интеллектуально-волевой деятельности людей [1]. Их характеризуют: осуществление основных и вспомогательных функций, точность функционирования, надежность, адаптивность, возможность к совершенствованию, совместимость с другими системами, и ряд других.

Испытания позволяют:

- оценить значения параметров и характеристик опытного образца;
- проверить соответствие его реальных тактико-технических характеристик заданным в тактико-техническом задании (ТТЗ) и требованиями руководящих документов;
- выработать рекомендации о целесообразности принятия на вооружение;
- выработать рекомендации по практическому применению и эксплуатации.

Технология испытаний сложных систем на научно исследовательском испытательном полигоне (НИИП) в настоящее время основывается на использовании опытно-теоретического метода, основными составляющими которого являются:

- натурный эксперимент;
- полунатурный эксперимент (ПНЭ);
- математический эксперимент.

НИИП представляет собой единый научно-исследовательский комплекс, имеющий высокий научно-технический потенциал, развитую экспериментально-техническую базу, выгодные климатические условия, территорию и воздушное пространство, позволяющие проводить испытания и совместную обработку оборонительных и наступательных систем вооружения.

Натурный эксперимент. Является наиболее объективным методом проведения испытания, так как только в этом случае возможна проверка

соответствия изделия всем требованиям ТТЗ в полном объеме в обстановке и условиях, максимально приближенных к реальным. Вместе с тем, натурный эксперимент дорог и сложен. Сроки подготовки и проведения натуральных экспериментов, как правило, велики и в значительной степени зависят от метеоусловий, материально-технического обеспечения и ряда других факторов, ограничивающих возможности создания требуемой оперативно-тактической обстановки в процессе проведения испытаний.

Кроме того, для проведения испытаний требуется наличие необходимого количества средств объективного контроля и регистрации характеристик изделия, автоматизированной обработки результатов измерений, что так же приводит к значительному возрастанию их стоимости. Вследствие этих объективных причин не всегда удастся провести надлежащий натурный эксперимент, отображающий функционирование сложной системы в целом или отдельных ее подсистем в реальном времени и в заданной среде.

Анализируя вышесказанное можно сделать выводы:

- натурные эксперименты имеют ряд существенных ограничений, которые не позволяют в полном объеме тактико-технических требований обеспечить проведение испытаний опытных образцов, в первую очередь, за счет невозможности создания адекватной среды во всем диапазоне боевого применения испытываемых образцов;

- при невозможности выполнения необходимых условий (рисунок 1) при проведении испытаний опытного образца методом натурального эксперимента (или даже любого одного из них), его применение признается нецелесообразным.

Рисунок 1 – Необходимые условия применения метода натуральных испытаний

Математический эксперимент применяется как исключение, что обусловлено некоторыми его свойствами, описываемыми следующими положениями [2]:

– математические модели оперируют с математическим описанием объектов и происходящих с ними процессов, при этом разрабатываемое средство на начальных этапах присутствует в виде математической модели. Чтобы исследовать математическую модель, выраженную на языке уравнений, которые большей частью являются дифференциальными, необходимо перейти от математического описания с помощью непрерывных функций переменных к описанию посредством функций дискретного аргумента. В результате получают возможность построить алгоритм для решения задачи. Ясно, однако, что такое решение будет некоторым приближением к первоначальной задаче, так как исходное непрерывное описание процесса заменяется дискретным

описанием. Отсюда следует, что полученный результат, в принципе, всегда будет только приближенным, а не точным;

- необходимая для решения задачи первоначальная информация (начальные и граничные условия уравнения, его коэффициенты) всегда может быть задана лишь с той или иной степенью погрешности, которая не только сказывается на окончательном результате вычисления, но и никогда не может быть устранена;

- имитируемые процессы протекают без привязки к шкале времени. Вместе с тем, создаваемый образец СТС СН должен работать (а значит, проверяться и отрабатываться) в условиях жесткого реального времени, при возникновении случайных сбоев и отказов различного характера в работе технических и программных средств, непредсказуемых потерь информации, то есть, в условиях, когда сложные и точные алгоритмы, отработанные на математических моделях, могут оказаться малоэффективными;

- математические модели свободны от ограничений, возникающих из-за необходимости соблюдения жестких требований по форме взаимодействия объектов между собой и с внешней средой;

- опытный образец СТС СН неизмеримо сложнее любого своего математического аналога;

- и рядом других.

Учитывая данные обстоятельства на современном этапе практически во всех областях научно-технической деятельности наблюдается тенденция переноса центра тяжести научно-экспериментальных исследований с экспериментальных работ на имитационное моделирование, базирующееся на использовании высокоэффективной компьютерной техники.

Суть опытно-теоретического метода заключается в том, что основной объем проверок испытываемых опытных образцов на соответствие требованиям ТТЗ осуществляется с помощью средств моделирования (проведение ПНЭ).

Полученные результаты подтверждаются небольшим объемом натурных экспериментов. Если подтверждение получено, то все результаты, полученные с применением средств моделирования, получают статус доверия.

Непосредственно для проведения ПНЭ на НИИП применяется ИМУ. ИМУ – это реализованная на комплексе технических средств совокупность программ имитационных моделей удара средств воздушно-космического нападения противника и элементов группировки ПВО ВКС, в том числе средств ПВО других видов ВС РФ, функционирующая в режиме реального времени и сопрягаемая с действующими образцами средств ПВО по штатным каналам связи (рисунок 2).

Под имитационной моделью ИМУ понимается описание логики функционирования исследуемой сложной системы и взаимодействия отдельных ее элементов во времени, выполненное на некотором формальном языке, учитывающее наиболее существенные причинно-следственные связи и обеспечивающие проведение статистических экспериментов.

**Рис. 2. Схема взаимодействия ИМУ и опытных
и существующих средств ПВО**

Определяющим отличием имитационной модели от математической модели заключается в непосредственном взаимодействии с натурными (реальными) объектами, среди которых, в частности, оказывается и испытываемый образец.

Использование возможностей ИМУ позволяет:

- проводить неограниченное количество экспериментов в кратчайшие сроки с разными параметрами;
- создавать условия, недоступные натурному эксперименту по загрузке, наземной и воздушной обстановке.
- обеспечить значительную экономическую выгоду т.к. на проведение ПНЭ затрачиваются минимальные денежные средства, технические и людские ресурсы.

1. Анализ состояния существующего аналогового КСС ИМУ

Как видно из рисунка 2, аппаратура КСС, при организации сопряжения как с испытываемыми образцами, так и существующими средствами ПВО из состава создаваемого фрагмента группировки ПВО последовательно включена в работу и определяет возможность взаимодействия ИМУ с ними.

Однако, в последнее время возможности ее взаимодействия с вновь создаваемыми образцами комплексов средств автоматизации (КСА) и автоматизированных систем управления (АСУ) ограничиваются по ряду причин, одной из которых является уровень технического оснащения КСС ИМУ:

- физическое и моральное устаревания применяемой на КСС аппаратуры образования аналоговых каналов связи с частотным разделением каналов;
- отсутствие возможностей эффективного контроля и обработки проходящей через КСС информации;
- отсутствие возможностей автоматизации технологических процессов.

Указанные факторы оказывают негативное влияние на уровень выполнения требований по своевременности и качеству обмена данными, а порой даже невозможности сопряжения с испытываемыми образцами. Эти обстоятельства свидетельствуют о необходимости модернизации КСС для обеспечения качественного выполнения поставленных задач по предназначению ИМУ.

Телекоммуникационные сети относятся к сложным и консервативным техническим системам. Однако, в тоже время, отрасль связи одна из самых динамично развивающихся. Данное противоречие приходится учитывать при разработке решений по модернизации существующих сетей. Эффективность подобных работ в значительной мере определяется правильной оценкой эволюционных процессов, свойственных для отрасли связи сегодня, а процессы реконструкции систем связи целесообразно оценивать с различных сторон.

В настоящее время в области развития систем связи имеет место точка зрения о том, что работы по совершенствованию и наращиванию функциональных возможностей существующих линий, узлов и сетей связи на основе аппаратуры аналоговых каналов (ААК) и аналоговые системы передачи (АСП) не имеют каких-либо дальнейших перспектив.

Из этого был сделан вывод о необходимости полной реконструкции существующих линий, узлов и сетей связи путем замены в них ААК на аппаратуру цифровых каналов (АЦК), а АСП на цифровые системы передачи (ЦСП).

Вместе с тем хотелось бы отметить, в настоящее время, и вероятно еще достаточно длительный период времени будут находиться десятки АСУ и КСА, разработанных на элементной базе, предусматривающей использование АСП информации и АКК связи.

Исходя из выше сказанного для модернизации КСС ИМУ копирование структуры какого-либо существующего современного узла связи с использованием мультисервисных сетей связи следующего поколения не целесообразно, и даже вредно, так как потребители не всегда способны оперативно и эффективно адаптироваться к новому формату услуги или сервиса, следствием чего может быть:

- деоптимизация штатной структуры подразделения;

– повышенный расход материально-технических средств, связанный с высоким коэффициентом простоя аппаратуры, нерациональным использованием созданных канальных ресурсов и др.

Накопленный в ходе проведения ПНЭ, участия в военно-технических экспериментах, проводимых во время проведения СКШУ «Центр-2019», «Кавказ-2020» опыт эксплуатации КСС ИМУ, а так же особенности функционирования комплекса, связанные с основным его предназначением – доставка адресатам блоков данных, которые при этом не должны терять своей целостности, доставляться без ошибок и искажения показал, что существующий аналоговый КСС в целом способен выполнять свою роль при испытании средств управления ПВО.

Ограничения связаны с отсутствием в составе КСС ИМУ цифрового сегмента для организации сопряжения с вновь создаваемыми образцами КСА и АСУ ПВО.

Вместе с тем, проведение испытаний осложняется возникновением различного рода погрешностей и ошибок по следующим основным причинам:

1. Инструментальные ошибки, связанные с возможными сбоями в КСС (например, несвоевременное поступление или отсутствие поступления информации в определенные испытываемой системой сроки) возникающие в основном из-за физического и морального устаревания применяемой аппаратуры.

2. Ошибки в результате «человеческого фактора» – задание неверных параметров взаимодействующих систем, использование некорректных протоколов функционального взаимодействия и т.д.

Анализируя наиболее часто проявляющиеся по указанным причинам проблемы сбоев работы КСС в ходе проводимых ПНЭ для их минимизации силами инженерно-технического состава на ИМУ были выполнены ряд доработок реализованных в виде рационализаторских предложений.

Разработаны устройства и системы для:

- оперативного сбора данных о состоянии информационного сигнала, передаваемого по каналам тональной частоты, используемым для сопряжения моделей образцов СТС СН с объектами испытаний;
- оперативного изменения конфигурации системы оперативно-командной связи (ОКС);
- автоматического контроля и восстановления подверженного флуктуациям амплитуды сигнала во времени канала тональной частоты;
- идентификации вызовов, поступающих на многоканальный модуль обработки сигналов тональной частоты;
- организации кратковременного оперативного доступа к абонентам сети без нарушения существующей конфигурации ОКС в ходе проведения ПНЭ операторам рабочего места КСС;
- подключения автономных усилителей сигнала тональной частоты со ступенчатым корректором уровня усиления сигнала;
- контроля уровня порогового сигнала в проблемных каналах связи;
- отображения в режиме реального времени алгоритмов настройки имитационных моделей ИМУ, и ряд других, всего более 20.

Применение этих доработок позволило:

1. В значительной степени исключить влияние случайных внешних факторов на организацию и ход проведения испытаний;
2. Повысить ситуационную осведомленность испытательного расчета в ходе проведения ПНЭ;
3. Оценить и понять необходимый уровень внедрения автоматизации управления, так как автоматизация облегчает процесс мониторинга состояния средства связи и сложной настройки большого количества параметров функционирования, учитывая фактор – эффективность применения сложных систем в целом в значительной степени зависит от автоматизированных процессов управления ими и того, насколько полно используются

возможности современных информационных технологий. Со временем эта зависимость будет стремительно возрастать.

Однако необходимо отметить, что финансово-экономические возможности организации не позволили реализовать указанные выше доработки не элементной базе с использованием современных технологий. Для их создания использовалась устаревшая элементная база (радиодетали и узлы общего применения) [3].

Все процессы настройки, поиска ошибок, сбора данных о состоянии информационного сигнала, контроля каналов и коммутации информационного сигнала производятся в ручном режиме и занимают значительный промежуток времени, а функции оценки обстановки и принятия решения полностью возлагаются на человека и его личный опыт работы.

Считается, что успех в любом виде деятельности определяется правильным выбором идеи на стадии разработки концепций, постановки задач и определения приоритетов модернизации систем (выборе цели).

В процессе изучения уровня, методов и подходов к модернизации КСС ИМУ рассматривались различные варианты поддержания его способности к выполнению задач по предназначению, например:

- наращивание количества и видов аппаратуры передачи данных, различного типа модемов и иной аппаратуры для организации сопряжения объектов испытаний с ИМУ;
- возложение ответственности за организацию сопряжения опытных образцов с ИМУ на предприятия-изготовители – разрабатывать и включать в состав опытного образца различные модули сопряжения (модули сопряжения обмена данными, модули сопряжения передачи речевой информации, и др.), системы каналообразования, аналогичные применяемым на существующем аналоговом КСС и т.п.

Из достоинств данных подходов следует отметить небольшой по продолжительности времени эффект приобретения актуальности.

Основными недостатками следует считать:

- фактический отказ от участия в развитии, совершенствовании и в конечном счете научно-техническом прогрессе;
- возникновение в ходе дальнейшего функционирования КСС через достаточно короткое время проблем, аналогичных рассмотренным;
- утрата самостоятельности и самодостаточности;
- постоянное расширение используемых площадей для размещения аппаратуры и численности личного состава для ее эксплуатации и обслуживания;
- зависимость возможности объективного и качественного проведения ПНЭ и, как следствие, степени достоверности результатов испытаний опытных образцов СТС СН от внешних факторов (в частности заинтересованных организаций, предприятий-изготовителей).

4. Выработать единое мнение и предложить двухэтапный подход к модернизации существующего аналогового КСС ИМУ.

2. От аналогового КСС к аналогово-цифровому

Первый этап – создание системы автоматизированного управления канальными ресурсами КСС на основе использования принципов обработки аналогового сигнала на базе современных подходов и технологий (внедрение цифровой компонентной базы) [4, 5].

На рассматриваемом КСС для приема и передачи используются источники сигнала с однотипными параметрами, что дает возможность осуществлять их преобразования на базе современных технологий в рамках единого технологического процесса.

Исходя из этого, для решения проблемы создания системы автоматизированного контроля состояния каналов связи и оперативного их поддержания в исправном состоянии в режиме реального времени предлагается применить принцип преобразования и обработки сигналов тональной частоты,

представленный на рисунке 3, который позволит эффективно реализовать указанные выше сервисные функции и услуги.

Например, адаптивное управление мощностью сигналов на основании информации, полученной во время анализа устройством цифровой обработки сигнала характеристик каналов связи, реализация возможностей современных протоколов передачи данных без замены используемой аппаратуры передачи данных и ряд других.

Рис. 3. Принцип построения системы автоматизированной обработки и контроля состояния аналоговых каналов

Кроме этого, дооснащение КСС ИМУ вычислительным комплексом позволит сформировать в его составе цифровой сегмент, включающий в себя программно-управляемые многофункциональные первичные мультиплексоры и мультиплексоры связи двойного назначения.

Вариант модернизированного аналогового КСС на базе современных подходов и технологий, реализованный как аналогово-цифровой комплекс средств связи (АЦКСС), представлен на рисунке 4.

Рис. 4. Вариант АЦКСС ИМУ

Предлагаемое расширение функциональных возможностей КСС ИМУ позволит:

- значительно сократить количество личного состава испытательного расчета, принимающего участие в обеспечении проведения ПНЭ (рисунки 5,6);
- обеспечить высокую оперативность по перестроению каналов связи и вводу исходных данных в установленные сроки и с требуемым качеством;

Рис. 5. Схема прохождения информации на КСС ИМУ

- исключить ошибки в ходе проведения ПНЭ в результате «человеческого фактора» – задание неверных параметров взаимодействующих

систем, использование некорректных протоколов функционального взаимодействия;

– наглядно, в режиме реального времени осуществлять сбор, документирование и отображение информации о состоянии средств связи, каналов связи, оперативно принимать меры к их восстановлению;

Рис. 6. Схема прохождения информации на АЦКСС ИМУ

– оперативно реализовывать потребности по наращиванию функциональных свойств КСС ИМУ без его радикальной реконструкции и при минимальных экономических и временных затратах по мере поступления на испытания новых перспективных образцов СТС СН;

– обеспечить актуальность АЦКСС ИМУ на время, сопоставимое с периодом нахождения на вооружении средств управления ПВО старого парка.

3. Общие проблемы создания автоматизированных систем управления

Прежде чем перейти к изложению предложений второго этапа модернизации КСС ИМУ необходимо рассмотреть общие проблемы создания АСУ [6].

Практика создания отдельных автоматизированных СТС СН показала сложность решения задачи их увязки в единую автоматизированную систему управления. В ходе выполнения научно-производственными предприятиями работ по автоматизации управления СТС СН сложилось положение, при котором существующие и разрабатываемые автоматизированные системы слабо совместимы или несовместимы.

Причиной такого положения является невыполнение единых принципов их разработки, которые могут быть реализованы только на основе единой для исполнителей ОКР методологии и технологии, разработанных по заданию профильных Министерств. Поэтому автоматизированные СТС СН продолжают разрабатываться с применением тех механизмов, которыми владеет то или иное предприятие, разрабатывающее эти автоматизированные системы.

Предприятия руководствуется своими подходами к выбору технических решений при создании автоматизированных СТС СН. Эти решения не унифицированы, следствием чего является большое количество уникальных протоколов информационно-технического сопряжения и сложность обеспечения взаимодействия автоматизированных систем. Каждый разработчик АСУ сам формирует требования к изделию, так как это принято в их ведомстве. При этом интеграционные потребности автоматизированной системы управления СТС СН в целом не учитываются. Такое положение привело к тому, что в настоящее время эксплуатируется большое количество автоматизированных систем, построенных на различных технических решениях. В основном они создавались с применением единой операционной системы, но различными общим специальным программным обеспечением,

географической информационной системой, моделью хранения данных, системой управления базой данных и информационно-лингвистическим обеспечением. Так как вопросы обеспечения информационно-технического взаимодействия автоматизированных систем различного назначения не определены стандартами, обязательными для применения заказчиками профильного Министерства и исполнителями опытно-конструкторских работ, в каждой работе создавались новые средства информационно-технического сопряжения.

При этом всегда возникал ряд проблем: необходимость разработки множества уникальных протоколов информационно-технического сопряжения, поддержание протоколов информационно-технического сопряжения в актуальном состоянии в течение всего времени существования взаимодействующих АСУ.

Данные проблемы характерны не только для СТС СН, разрабатываемых и эксплуатируемых в нашей стране, но и в армиях иностранных государств [7].

В этих странах принято разделять АСУ войсками на несколько классов в зависимости от выполняемых системами функций – Command, Control, Communications, Computers, Intelligence, Surveillance, Reconnaissance (команда, контроль, коммуникации, компьютеры, интеллект, наблюдение и разведка).

Любая автоматизированная система управления относится к определенному классу в соответствии со степенью автоматизации в ней управленческих функций, которые указаны выше. Если какая-либо из перечисленных функций автоматизирована в системе в полном объеме, то в аббревиатуре класса этой системы будет присутствовать начальная буква этой функции.

Так, системы управления в которых автоматизированы только две функции, например, Command and Control, будут относиться к классу «СС». Для простоты аббревиатура класса обозначается как «С2».

В настоящее время большинство имеющиеся на вооружении иностранных государств АСУВ тактического звена относятся к классу «С2», или «С2+», и различаются между собой лишь небольшим расширением спектра решаемых задач. При этом, все системы тактического назначения принципиально «не дотягивают» даже до класса «С3». По мнению экспертов, основными препятствиями на пути развития АСУВ тактического звена из класса «С2» в классы «С3» и «С4» являются:

- отсутствие математически корректных алгоритмов оценки действий войск на тактическом уровне, ввиду огромного разнообразия применяемых ими способов и приемов выполнения боевых задач;
- сложность создания автоматизированной системы сбора и оценки данных тактической обстановки, ввиду очень большого разнообразия ее параметров и скоротечности изменений;
- возникающая в связи с предыдущим пунктом необходимость ручной работы по сбору, обработке и отображению большого количества переменных данных, превышающие возможности ответственных должностных лиц по вводу таких данных в систему;
- необходимость обработки относительно большого количества данных в единицу времени, которые по своим объемам в настоящее время превышают возможности машинного обеспечения;
- сложность создания самоорганизующихся сетей связи и надежных локальных сетей (систем передачи данных) между большим количеством высокоомобильных объектов управления.

Аналогично, на существующем КСС в настоящее время только для сопряжения с существующими АСУ ПВО применяемая аппаратура передачи данных реализует большое (но не конечно необходимое) количество протоколов, которые управляют одобренными коммуникационными стандартами модема и интерфейсами:

а) V.33 – предназначен для обеспечения дуплексной связи по четырехпроводным выделенным каналам на частоте 1800 Гц и со скоростью модуляции 2400 Бод. Используется квадратурная амплитудная модуляция совместно с решетчатым кодированием. Благодаря этому достигаются скорости передачи 12000 и 14400 бит/с.;

б) V.29 – протокол для дуплексной работы со скоростью передачи данных 9600 бит/с по 4-проводным каналам тональной частоты (ТЧ). В протоколе применяется квадратурная амплитудная модуляция. Частота несущего сигнала 1700 Гц. В состав модема, реализующего этот протокол, входит адаптивный автоматический корректор, а также скремблер.

в) V.27, V.27bis – протоколы для дуплексной работы со скоростью передачи данных 2400 и 4800 бит/с по 4-проводным каналам ТЧ. В этих протоколах применяется относительная фазовая модуляция с частотой несущей 1800 Гц;

г) V.26 – обеспечивает дуплекс по четырехпроводной выделенной линии. Протокол обеспечивает скорость передачи информации 2400 бит/с посредством четырехпозиционной (дибит) DPSK;

д) V.23 – рекомендация ИТУ-Т для полудвойной связи между двумя аналоговыми коммутируемыми модемами, используя частотную модуляцию FSK максимум в 600 или 1200 Бод. Модуляционная и информационная скорости равны: соответственно, 600 и 1200 Бод.

Развитие коммутационного и каналообразующего оборудования, а также развитие микропроцессоров, улучшают характеристики каналов связи, а значит появляется возможность создания более высокоскоростных модемов, что ведет за собой появление все новых протоколов.

В таблице представлены протоколы передачи данных Международного союза электросвязи:

Стандарт	Год утверждения	Максимальная скорость, бит/с	Тип модуляции
V.21	1964/1984	200/300	FSK
V.22	1980/1988	1200	DPSK
V.22 bis	1984/1988	2400	QAM
V.23	1964/1988	1200	FSK
V.26	1968/1984	2400	DPSK
V.26 bis	1972/1984	2400	DPSK
V.26 ter	1984/1988	2400	DPSK
V.27	1972/1984	4800	DPSK
V.27 bis	1976/1984	4800	DPSK
V.27 ter	1976/1984	4800	DPSK
V.29	1976/1988	9600	QAM
V.32	1984/1988	9600	QAM/TCM
V.33	1985/1988	14400	TCM
V.17	1991	14400	TCM
V.32 bis	1991	14400	TCM
V.34	1996	33600	QAM
V.90	1998	56700/33600	PCM/QAM
V.92	2000	56700/48000	PCM

Кроме этого существуют и ряд других протоколов: CSP, Express96, V.32 ter, V.32 ter/ASL, ZyX, HST, HST/ASL, PEP, TurboPEP, V.fast, X2, K56Flex, MSP, V.41, V.42, V.43, V.41, V.61, V.70 и др.

Для реализации каждого из указанных протоколов требуется конкретная аппаратура передачи данных (модем).

Вместе с тем, рассмотренные выше протоколы одобрены коммуникационными стандартами, а алгоритмы их решения найдены и

установлены. Процесс решения соответствующих задач становится таким, что его могут в точности выполнить (создать) вычислительная машина (должным образом запрограммированная) или робот. Как следствие бедующее за информационно-вычислительными системами с необходимой базой знаний, алгоритмом действий, интеллектуальной поддержкой (программное и инструментальное обеспечение, алгоритмическая и математическая поддержка), способной работать без помощи специалиста-оператора, ответственного за принятие решения по поводу действия.

4. От АЦКСС к интеллектуальной системе сопряжения

Рассмотрим второй этап, направленный на совершенствование АЦКСС ИМУ.

В связи с вышеизложенным, целесообразным и перспективным является создание системы, способной взаимодействовать в ходе проведения ПНЭ как с многообразием взаимодействующих образцов СТС СН из состава создаваемого фрагмента группировки ПВО военно-воздушных сил, сухопутных войск и военно-морских сил, так и с поступающими на испытания образцами СТС СН – построение квазиинтеллектуального цифрового КСС связи путем:

- создания максимально полной базы сертифицированных алгоритмов, модулей, преобразователей, логических и иных существующих и вновь разрабатываемых устройств, которая позволит описать их, создать модели и хранить в созданной базе данных, а при необходимости из соответствующих фрагментов создавать необходимые структуры, в соответствии с отрабатываемыми в данное время задачами по проведению ПНЭ с любым объектом испытаний (формирование базы знаний системы для решения задач разного рода сложности – выбора, принятия, исполнения решения).
- формирования понятий, определяющих выбор необходимой в соответствии с выполняемыми задачами по предназначению КСС ИМУ, схемы представления знаний пользователям в наиболее удобной для восприятия форме;

- определения механизма взаимодействия пользователей системы и процедур предложения решений (выработки на основании обработки поступающих данных вариантов ситуационного решения задачи);
- направленного расширения технических возможностей вычислительного комплекса на основе приобретаемого опыта эксплуатации АЦКСС;
- реализации в регламентируемых пределах принципа «открытости системы», т. е. доступа к набору передовых технических и организационных методов совместно с соответствующей культурой производства, предназначенных для реализации высокоэффективной стратегии жизненного цикла: минимизации совокупной стоимости владения и максимизация возможностей.

Результатом проведенной модернизации КСС ИМУ должна стать универсальная интеллектуальная система сопряжения имитационных моделей образцов СТС СН с объектами испытаний.

В ходе дальнейшей эксплуатации актуальность системы сопряжения будет поддерживаться в основном своевременным обновлением базы знаний (непрерывная эволюция наращивания функциональности) в соответствии с совершенствованием поступающих на испытания новых видов СТС СН (совершенствовании технологий).

Заключение

В данной главе рассматривалась задача, решение которой позволяет решить проблемы, связанные с повышением эффективности функционирования КСС ИМУ в современных условиях и сохранения его актуальности в будущем. Обоснована и подтверждена необходимость его модернизации с использованием возможностей современных технологий.

Необходимо также отметить, что двухэтапный подход не означает последовательное выполнение этапов модернизации. В таком случае она растянется на долгий период и потеряет актуальность.

Предложенный вариант выбора принципа и уровня модернизации КСС позволит:

- создать актуальную, надежную и конкурентоспособную систему для организации взаимодействия ИМУ с объектами испытаний (СТС СН);
- создаст базис, обеспечивающий предлагаемой системе всегда быть выше или на одном уровне с техническим состоянием образцов СТС СН, которые сегодня поступают на испытания и представляющие собой первые опытные системы, так же создающиеся по самым современным технологиям.

В данной главе не рассматриваются подходы к определению и пониманию искусственного интеллекта и интеллектуальных систем, их теоретические и технологические аспекты. Они подробно раскрыты и описаны в работах многих ученых, например [8,9].

Достаточно понимания, что владение интеллектуальными информационными технологиями и системами обеспечит КСС ИМУ необходимый и высокий уровень готовности к выполнению задач по предназначению обеспечение максимально быстрого и качественного испытания новых образцов СТС СН в интересах укрепления обороноспособности страны.

Список литературы

1. Лисецкий Ю.М. Сложные системы / Журнал «Программные продукты и системы». – Киев: Компания «ЭС ЭНД ТИ УКРАИНА», 2005. № 3 – 114 с.
2. Самарский А.А., Михайлов А.П. Математическое моделирование: идеи, методы, примеры. – 2-е изд., испр. – М.: «Физико-математическая литература», 2001. – 320 с.
3. Терещук Р.М. Полупроводниковые приемно-усилительные устройства: справочник радиолюбителя / Киев: «Наукова думка», 1981. – 672 с.
4. Павликов С.Н., Убанкин Е.И., Левашов Ю.А. Общая теория связи: учебное пособие / Владивосток: ВГУЭС, 2016. – 284 с.
5. Самуйлов К.Е., Шалимов И.А., Кулябов Д.С. Сети и телекоммуникации: учебник и практикум для академического бакалавриата / М.: Юрайт, 2017. – 363 с.
6. Иванов В.В. Проблемы создания АСУ Вооруженных Сил / Журнал «Воздушно-космическая оборона». – М.: ВПК – Медиа, 2014 № 4 – 122 с.
7. http://pentagonus.ru/publ/amerikanskaja_asuv_fbc2_2012/11-1-0-2201
8. Козлов А.Н. Интеллектуальные информационные системы: учебник / – Пермь: Изд-во ФГБОУ ВПО Пермская ГСХА, 2013. – 278 с.
9. Коровин, А.М. Интеллектуальные системы: текст лекций / Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2015. – 60 с.

УДК 101.1

Глава 9.

**ПРОБЛЕМА ДВИЖУЩИХ СИЛ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ
В СОВРЕМЕННОМ МИРЕ: ЛИНЕЙНЫЕ И НЕЛИНЕЙНЫЕ МОДЕЛИ**

Ушаков Евгений Владимирович

кандидат философских наук, доцент

ФГБОУ ВО «Российская Академия Народного Хозяйства
и Государственной Службы при Президенте Российской Федерации»
(Северо-Западный институт управления)

Аннотация. Развитие технологий сегодня является предметом многочисленных дискуссий. Общая направленность научно-технических разработок, выявление факторов, влияющих на технологическое развитие, а также обсуждение возможностей контроля за технологическими инновациями остаются сложными, нерешенными проблемами. В статье рассматривается потенциал линейных и нелинейных моделей технологического развития, делается вывод о необходимости их интеграции.

Ключевые слова: философия техники и технологии, фундаментальные проблемы современной цивилизации, технология и общество, технологическое развитие, управление технологическим развитием

**THE PROBLEM OF THE DRIVING FORCES OF TECHNOLOGICAL
DEVELOPMENT IN THE CONTEMPORARY WORLD: LINEAR
AND NONLINEAR MODELS**

Ushakov Evgeniy Vladimirovich

Abstract: The development of modern technologies today is the subject of numerous discussions. The general orientation of scientific and technical

developments, the identification of factors affecting technological development, as well as the discussion of the possibilities of controlling technological innovations remain complex, unresolved problems. The article considers the potential of linear and nonlinear models of technological development, and concludes that their integration is necessary.

Key words: philosophy of technology, fundamental problems of modern civilization, technology and society, technological development, management of technological development

Развитие технологий в современном мире приобрело стремительный характер. Этот глобальный процесс характеризуют такими терминами, как «технологическое общество», «технологическая эпоха» и т.п. Ряд авторов (например, Ж. Эллюль) рассматривают современную технологическую сферу как некую единую и всеобъемлющую моносистему [1].

Технологическое развитие идет неравномерно в различных направлениях. Это относится как к темпам и масштабам создания новых технологических продуктов, так и к степени их новизны; научно-технические разработки можно условно разделить на постепенные (инкрементальные, эволюционные) и радикальные (прорывные, революционные).

Постепенные технологические нововведения продвигаются малыми шагами как локальные изобретения, улучшения уже существующих технологий, а также как использование уже имеющихся средств для решения новых технических задач. В этом случае ученые и инженеры работают, как правило, в рамках какой-то устоявшейся «технологической парадигмы» (Дж. Доси); к этому понятию мы вернемся ниже.

Следует отметить, что постепенные технологические успехи на самом деле имеют очень важное значение, и в конечном счете любые революционные изобретения подвергаются инкрементальным усовершенствованиям.

Малые достижения играют огромную роль для решения практических задач. Например, исследования в оборонной сфере показали, что подавляющее большинство важных разработок систем оружия базировалось на мелких открытиях и улучшениях старой технологии [2, с. 90]. Более того, с развитием научно-технических возможностей на современном уровне все актуальнее становится задача эффективного использования и комбинирования того, что уже имеется (так называемый рекомбинантный подход).

Однако, разумеется, наибольшие перспективы для общества открывают радикально новые достижения – технологические революции.

Что следует понимать под технологическими революциями? Технологические революции – это крупные изменения в технологии, которые фундаментальным образом изменяют отношения человека со средой, а также трансформируют способы обеспечения жизнедеятельности общества.

Технологические революции – крупные скачки в общем развитии человеческого общества, техники, отношений человека и природной среды. Они оказывают фундаментальное воздействие на всю систему технологии общества. Крупный отечественный экономист С.Ю. Глазьев говорит в этой связи о смене «технологических укладов» как крупных, революционных событиях в хозяйственно-экономическом развитии общества (причем каждый уклад проходит ряд жизненных фаз, созревая еще в недрах прежнего, доминирующего уклада) [3].

Таким образом, технологические революции представляют собой своего рода критические пункты, завоеванные области, которые создают базу для радикального обновления всей технологической инфраструктуры. Революционные изменения в технологии становятся инициаторами дальнейшего ускоренного развития событий, обновлений во всей общественной жизни и всей структуры отношений человека с окружающим миром.

В ряде современных областей – философии технологии, социологии, экономике, менеджменте, инженерно-технических науках и др. активно

обсуждается проблема: каковы основные движущие силы технологического развития? Иными словами, какой комплекс факторов в первую очередь определяет содержание, направление и интенсивность технологических разработок?

Эти вопросы имеют важное значение – как фундаментально-философское, так и прикладное.

На фундаментальном уровне – это прежде всего потребность осмыслить глубинные основания технологического развития, а также нынешнего состояния и перспектив самого общества. На прикладном уровне – это задачи рационального регулирования технологического развития, стимуляции социально значимых линий разработок.

Разумеется, технологические разработки находятся под влиянием широкого многообразия воздействующих (и переплетающихся между собой, влияющих друг на друга) факторов. С известной долей условности, эти факторы можно разделить на внутренние и внешние. Внутренние – связаны с имманентными проблемами и процессами самой системы инженерно-технологического поиска. Внешние – представляют собой внетехнологические факторы разнообразной природы (социальные, культурные, экономические, политические и др.).

Акцентирование внутренних или внешних факторов выразилось в двух обобщенных подходах к проблеме движущих сил технологического развития, которые можно назвать интерналистским и экстерналистским. Эти точки зрения могут быть выражены различными способами.

Так, интерналистский подход в отношении инновационных процессов (в условиях рыночной экономики) представлен в виде концепции «технологического толчка» (technology push), которая предполагает, что внутренние технологические факторы являются определяющими в инновационных процессах и «подталкивают» дальнейшие изменения (экономические, социальные, культурные и др.).

Противоположный подход – точка зрения «давления спроса» (demand pull), согласно которой в основном рыночные факторы (тенденции рынка, предпочтения потребителей и т.п.) стимулируют появление технологических разработок и нововведений.

Это же расхождение можно охарактеризовать как различие между *проактивным* подходом в стратегиях технологического развития, который опережает социальную и экономическую реальность и навязывает обществу свое видение технологического будущего, и *реактивным* – который преимущественно реагирует на рыночные сигналы, подчиняясь экономической ситуации и ее правилам игры.

В современной философии науки и техники сформировались два крупных направления (которые следуют базисным идеям интернализма и экстернализма).

Первое направление рассматривает технологическую сферу как некую самостоятельную область. Признание имманентных закономерностей техники как главного фактора, стимулирующего научно-технические разработки, за которыми следуют глубокие изменения в обществе, в литературе отражают с помощью таких терминов, как «технологический эссенциализм» и «технологический детерминизм».

Второе направление характеризуется более социально-ориентированной позицией и уделяет больше внимания различным внетехнологическим факторам. В этой традиции подчеркивается, что технологическое развитие существенно подвержено внешним влияниям, и, более того, утверждается, что сама технологическая сфера должна пониматься как часть более широкой социальной системы.

С точки зрения интерналистского подхода, основные факторы, определяющие содержание, направление и интенсивность технологических разработок, находятся внутри самой технологической сферы. И учитывая, что современная технология существенно основана на научных знаниях, а система

технологического поиска тесно связана с научной сферой, движущую силу технологического развития можно охарактеризовать как «научные исследования плюс внутренняя логика самих технических разработок».

Такой взгляд на технологическое развитие стал широко принятым примерно к середине XX века. В индустриальных странах эта точка зрения выразилась в виде довольно стандартного представления о том, что процесс развития технологии есть некое направленное, последовательное «течение» от научного исследования к созданию технологии и к ее практическому применению.

Стадиями этого направленного процесса, в разных вариантах, называют, например, такие:

«наука – инновация – развитие – технология – коммерциализация» [4];

«фундаментальное (базисное) исследование – прикладное исследование – целевое развитие – производство и маркетинг – принятие на практике – использование» [5, р.3].

Это представление получило название *линейной модели*, которая была широко принята и внедрена в развитых странах (особенно в США) и со второй половины столетия легла в основу эффективной организации всей научно-технологической активности.

Следует отметить, что в русле интерналистского подхода было разработано немало содержательных концепций, подчеркивающих значение внутренних факторов научно-технологической сферы (Дж. Доси, Б.И. Кудрин, Р. Нельсон и С. Винтер, В.С. Мучников, Д. Сахал и др.). Эти исследования рассматривают технологию в контексте ее собственной технической эволюции, связанной с ее собственными закономерностями, проблемами и их решениями.

К примеру, в отечественной литературе оригинальную и последовательную концепцию разрабатывает Б.И. Кудрин. Он показывает, что техническая реальность на современном уровне стала самостоятельной и во многом самоорганизующейся, самовоспроизводящейся сферой. Применяя к

технической реальности ряд понятий биологии, Б.И. Кудрин рассматривает «техноценозы» как особые устойчивые «сообщества» технических объектов и их собственную «техноэволюцию», в которой действует принцип «информационного отбора», так что техническое порождает далее техническое [6].

В западной литературе примером интерналистского подхода может служить концепция Дж. Доси, в которой развивается представление о технологических парадигмах и технологических траекториях. Сама технология как решение определенной технической проблемы формируется как множество технических решений, а технологическая парадигма есть некий класс типичных технических решений для некоторого выбранного множества технических проблем. Таким образом, технологическая парадигма определенным способом направляет (но и ограничивает) деятельность разработчиков.

Траектория технологии выступает в теории Дж. Доси как последовательная серия радикальных или инкрементальных инноваций, возникающих в рамках общей технологической парадигмы и ведомых определенной «негативной» и «позитивной» эвристиками (т.е. правилами, как надо и как не надо действовать) [7].

К примеру, в авиационной отрасли путем преодоления массы сложных теоретических и технических проблем сформировался внутренне необходимый для нее комплекс базовых технических решений (относительно формы крыла, подбора материалов, преодоления звукового барьера и т.п.), который и определяет текущую технологическую траекторию авиастроения. Каким-то произвольным или необоснованным образом невозможно изменить эти важнейшие внутритехнические закономерности. Они являются итогом длительного и последовательного развития теоретической и прикладной науки и инженерно-конструкторского опыта.

Эмпирические исследования инновационных процессов и теоретические разработки постепенно привели во второй половине XX века к более сложной

картине по сравнению с той, которая представлена в линейной модели технологического развития; это выразилось в появлении новых моделей. Многие авторы считают, что линейная модель является слишком узкой и не дает возможности выйти к более адекватному современным реалиям пониманию процессов технологического развития.

К ограничениям линейной модели можно отнести по крайней мере следующие.

1. Главным двигателем инновационного процесса считается научно-техническая сфера, а значение различных внешних факторов недооценивается.

Более того, науке здесь придается исключительно важная роль, поскольку именно из базисных и прикладных научных исследований идет дальнейший «поток» технологий. Однако существуют и вненаучные источники технологического развития.

Например, для отрасли медицинских технологий важную роль в их производстве играет непосредственная клиническая практика. Есть примеры высоких технологий, вообще созданных вне научных центров. Яркой иллюстрацией служит баллонная ангиопластика, одно из крупных достижений современной кардиохирургии, созданная не в лабораторных условиях, а индивидуальными усилиями швейцарского энтузиаста-практика А. Грюнцига.

2. Сфера технологических разработок в линейной модели оказывается в подчиненном положении относительно науки, в то время как технологическое конструирование само по себе – важнейший этап непосредственного создания технологического продукта. Кроме того, данная стадия выступает наиболее ресурсоемкой и дорогостоящей фазой нововведений, поэтому данный этап правильнее было бы считать центральным звеном всего инновационного процесса.

3. Нововведение в линейной модели выглядит как последовательный, прямолинейный процесс, что совершенно не учитывает существования более сложных связей – как внутри его, так и по отношению к внешнему контексту.

В результате осознания более сложного хода технологического развития начался сдвиг к новому видению этого процесса. На сегодняшний день исследователями предложены различные варианты нелинейных моделей.

Одной из причин для перехода к «нелинейному» пониманию технологических разработок явилось то, что сами инновационные процессы в развитых странах претерпели за послевоенные десятилетия существенные изменения. Если еще в 60-70-е годы преимущественным организатором и заказчиком крупных проектов выступало государство (в ядерной энергетике, освоении космоса, военных разработках и т.п.), то в инновациях рубежа веков гораздо большую роль стали играть разнообразные сетевые взаимоотношения (между разработчиками и различными посредниками, пользователями и др.) и более широкое участие общественности.

В новых, нелинейных моделях формирование технологии рассматривается не как однонаправленный поток, а как намного более сложная система деятельности. Стадии научного поиска, развития, производства, применения технологии имеют обратные связи и циклические взаимодействия. Например, в процессе практического применения у пользователей возникают собственные идеи по развитию технологии, которые могут повлиять на ход научного поиска и инженерно-технического конструирования. По мнению А. Джелийнс, между стадиями научного исследования и собственно развития технологии существуют довольно тесные взаимоотношения, так что в более точном смысле эти стадии протекают совместно [5, р. 3-4].

Создание технологии понимается в нелинейных моделях как процесс плотных интеракций: в отличие от линейной модели, здесь предполагается более активное взаимодействие потенциальных пользователей и разработчиков уже на стадии целевого развития технологии с возможным возвратом к предыдущим стадиям для внесения улучшений в технологический продукт.

Кроме того, здесь принимается во внимание, что создание и применение технологий происходит в широком социальном контексте (включающем

экономические, политические, культурные и другие факторы). В условиях всеобщей рыночной экономики рыночные силы создают «давление спроса» (demand pull) и оказывают большое влияние на каждую стадию инновационного процесса.

Таким образом, технологическое развитие в нелинейных моделях выступает в качестве некоего *сетевого* взаимодействия между наукой, инженерно-технологической сферой, потребительскими рынками, а также разнообразными контекстными (социальными, политическими и др.) факторами.

Учитывая известный в экономической науке феномен «провалов рынка» – т.е. неспособности рынка как саморегулирующегося механизма удовлетворять в ряде случаев общественные потребности – фундаментально важную роль продолжает играть в технологическом развитии такой политический фактор, как государственное регулирование (законодательная политика, регуляторные механизмы, государственная поддержка, налоговые меры и др.).

Большое значение в инновационных процессах имеют также различные социокультурные факторы, влияние которых сказывается разнообразными способами: например, в виде стимуляции той или иной линии технологического развития, а также воздействия на окончательный дизайн продукта.

Переход от линейного к нелинейному представлению о нововведениях имеет не только сугубо описательное значение.

Новые, нелинейные модели имеют и нормативную значимость – и для эффективной стимуляции инновационных процессов (государственной инновационной политики), и для самих разработчиков технологий (ориентируя их на необходимость более тесных сетевых взаимодействий).

Здесь следует вернуться к экстерналистскому подходу к технологическим нововведениям. Он исходит из тех предпосылок, что внешние, нетехнические

факторы играют очень важную или даже определяющую роль в технологическом развитии. Эту точку зрения последовательно развивает такое влиятельное направление современных исследований проблем технологии, которое обозначают термином «социальный конструктивизм».

Данное направление (под которым сегодня объединяется целое семейство различающихся исследовательских перспектив) претендует на довольно решительный пересмотр концепций техники и технологии. Социальный конструктивизм в его наиболее радикальных версиях стремится преодолеть традиционное различие *технологического* и *социального* вообще. Он показывает их сложное взаимодействие в общем социотехническом процессе.

Иными словами, социальные конструктивисты оспаривают сложившееся концептуальное разделение или противопоставление «технологии» и «общества». Они утверждают, что технологическая и социальная сфера есть две стороны единой социотехнической реальности: технологическое развитие является не автономной, «чисто» инженерно-технической сферой, а проходит в непрерывном взаимодействии различных социальных участников.

В противовес тезису о существовании некоей «внутренней логики» технологических разработок, социальные конструктивисты утверждают, что эти разработки должны описываться на основе более сложной системы представлений. Технология – это развивающийся процесс, происходящий с участием самого общества, не предопределенный целиком какими-то «внутритехническими закономерностями».

Технологию, с точки зрения социального конструктивизма, следует рассматривать в панораме охватывающих социальных процессов, включающих ее создание, приобретение окончательного вида, совершенствование, распространение, использование и т.п. Так, эмпирические исследования изобретений и применения различных артефактов показали, что на самом деле общество множеством путей влияет на траекторию технологического развития,

на конечный дизайн технологического продукта и на дальнейшие способы его использования [8].

На развитие и внедрение технологий оказывают свое воздействие многочисленные социальные факторы: деятельность профессиональных сообществ, культурные нормы, политические интересы, общественная поддержка и т.п. На всех стадиях технологического развития на него воздействуют многие акторы – группы интересов, регуляторные органы, потребители и др.

Таким образом, технология формируется в некоем многостороннем, охватывающем процессе социальных обсуждений, или «переговоров» (*social negotiations*), идущем с участием различных общественных сил, объединений, организованных кампаний и т.п. У нас нет оснований априорно заявлять, что технология навязывает обществу определенные изменения, так как сама технология развивается «внутри общества» – в контексте социальных интеракций, влияний, дискуссий и т.п.

Понятие социотехнических систем, разрабатываемое в социальном конструктивизме, является плодотворным; оно помогает прояснить сущность многих актуальных проблем современного технологического развития. Оно отражает в том числе переход от чисто технического (системотехнического) к социотехническому проектированию сложных систем, в которых взаимодействуют человеческая деятельность и техническая инфраструктура. Сама методология проектирования сегодня расширяется и движется к тесным междисциплинарным связям технических и нетехнических отраслей.

Социальный конструктивизм внес немалый вклад в понимание проблем технологии, показав ту фундаментальную роль, которую играют в создании, внедрении и применении технологий социальные процессы и явления. Однако имеется и немало критики в его адрес. В частности, его ограниченность состоит в том, что он не уделяет достаточного внимания внутренней специфике

технологического развития, объективным закономерностям научно-технического знания и инженерно-технического опыта.

С точки зрения задач управления технологическим развитием и стратегического видения в области инновационной политики опора на нелинейные модели означает следующее.

Для управления и планирования в сфере технологических разработок на современном этапе необходимо учитывать более обширную совокупность и взаимную связь влияющих факторов [9]. К ним относятся, в частности, экономические процессы (например, становление глобальной экономики) и рыночные механизмы; деятельность практиков – пользователей технологии (которая может вести к новым идеям и даже со-производству технологических продуктов); предпочтения потребителей; активность особых групп давления (например, экологических движений); общественное мнение и проблематика публичных дискуссий (в частности, в отношении высоко инновационных, спорных разработок – нанотехнологий, нейротехнологий, биотехнологий и др.); и т.п.

Одной из значимых переменных, влияющих на масштабы и темпы технологического развития, которая стала осознаваться относительно недавно, является степень «закрытости» технологической разработки, которая зависит от ряда внешних факторов (политические, экономические, правовые и другие условия).

В развитых странах в последние десятилетия начинает завоевывать популярность концепция так называемой «открытой инновации», которую разработал американский исследователь из Гарвардского университета Генри Чесброу [10].

Ее суть состоит в осознании необходимости высвобождения, лучшего социального использования того потенциала, который содержится в проводимых разработках (прежде всего в корпоративных исследованиях). Рыночные правила игры ведут к тому, что многие внутренние разработки в

фирмах (как правило, выполняемые в условиях коммерческой тайны) оказываются незавершенными – например, если они слишком затянулись или корпорация решает переключиться на другой вид деятельности. Такие разработки «сворачиваются» и в итоге уже никогда не доходят до конечной точки. Количество таких незавершенных, остановленных исследований на самом деле довольно велико.

Но тем самым и бизнес, и научно-техническая сфера, и общество в целом несут крупные издержки упущенных возможностей – и все это только из-за разрозненности системы социальных взаимосвязей, в которой происходит технологическое развитие. Это приводит к бесполезным расходам ресурсов – в то время как полученные (но не востребованные) результаты, возможно, во многих случаях совсем немного «не дотягивают» до получения полезного продукта.

Идея «открытой инновации» заключается в том, чтобы создать условия для взаимообмена: незавершенные разработки вполне можно и нужно продавать другим фирмам – тем, которые готовы и способны ими воспользоваться. Нужно «открыть» эти конфиденциальные разработки и вывести их во внешнее пространство. Под влиянием этой простой идеи (которая начинает все шире усваиваться) уже появились специальные брокеры, занимающиеся посредничеством между теми субъектами, которым требуются результаты определенных разработок, и теми (независимо от их местонахождения), кто имеет эти результаты либо способен и желает выполнить такие разработки по сходной цене.

Итак, в современном мире технологическое развитие существенно опосредовано различными контекстными факторами и сетевыми взаимодействиями, включающими множество акторов. При этом внутренние закономерности техносферы тоже играют фундаментальную роль, особенно в области наукоемких, высокотехнологичных разработок.

Поэтому в современной философии технологии (а также других областях, связанных с технологическим развитием) одной из важнейших проблем является формирование таких подходов, которые могли бы эффективно объединить экстерналистскую и интерналистскую точки зрения, а также интегрировать линейные и нелинейные взаимоотношения в панораме технических разработок. Кроме того, необходимы новые, более специализированные модели, отражающие сложный процесс современного технологического развития.

Список литературы

1. J. Ellul. The Technological Society. New York: Knopf, 1964.
2. Янч Э. Прогнозирование научно-технического прогресса. – М.: Прогресс, 1974.
3. Глазьев С.Ю. Теория долгосрочного технико-экономического развития. М.: «ВлаДар», 1993.
4. Bromley D.A. Technology policy // Technology in Society. Volume 26, Issues 2-3 , 2004, P. 455-468.
5. Gelijns A.C. Technological Innovations. National Academy Press, Washington, D.C., 1989.
6. Кудрин Б.И. Введение в технетику. Томск: Изд-во Томского университета, 1993
7. Dosi G. Technological paradigms and technological trajectories // Research Policy, 1982, vol. 11, p. 142-167.
8. W.E. Bijker, Th.P. Hughes, T.J. Pinch (eds.). The social construction of technological systems: New directions in the sociology and history of technology. Cambridge, Mass.: MIT Press, 1987
9. Rip A., Misa Th.J., Schot J. (eds.). Managing technology in society: the approach of constructive technology assessment. London: Pinter Publishers, 1995.
10. Chesbrough H.W. Open Innovation. Harvard Business School Press, Cambridge, 2003.

УДК 378.018.43:004:81'243

Глава 10.

**ВОЗМОЖНОСТИ ЦИФРОВОГО ОБРАЗОВАНИЯ ПРИ ОБУЧЕНИИ
ИНОСТРАННЫМ ЯЗЫКАМ В ВЫСШЕЙ ШКОЛЕ**

Мазаева Татьяна Викторовна

Гилязева Эмма Николаевна

к.филол.н., доцент

Базарова Лилия Вязировна

к.филол.н., доцент

Хайруллина Динара Дилшатовна

к.филол.н., доцент кафедры филологии

Набережночелнинского института

Казанского (Приволжского) федерального университета

Аннотация: Цифровизация стала неотъемлемой частью обыденной жизни и прочно вошла во все сферы человеческой деятельности, включая образование в целом и высшее образование в частности. Преподаватель современной школы не может не учитывать нововведения в сфере современных технологий и для повышения интереса и мотивации учащихся в овладении иностранными языками вынужден учитывать данные изменения и планировать занятия, включая различные виды заданий, нацеленных на использование цифровых технологий. Авторы данного исследования рассматривают основные виды цифрового образования, применяемые при обучении иностранным языкам в высшей школе, изучают их особенности и возможности, преимущества и недостатки в современных условиях преподавания. Также отмечаются возможные трудности, с которыми может столкнуться как преподаватель, так и учащийся и предлагаются пути их преодоления для достижения оптимального результата. Во избежание дальнейших сложностей, связанных с цифровыми технологиями, авторы отмечают некоторые пути,

которые помогут преподавателю приспособиться к современным условиям и сделают процесс обучения ярким и увлекательным.

Ключевые слова: цифровые технологии, цифровое образование, иностранный язык, высшая школа, методика преподавания

DIGITAL EDUCATION POTENTIAL WHILE TEACHING FOREIGN LANGUAGES IN THE SYSTEM OF HIGHER EDUCATION

Mazaeva Tatyana Viktorovna

Gilyazeva Emma Nikolaevna

Bazarova Liliya Vyazirovna

Khairullina Dinara Dilshatovna

Abstract: Digitalization has become the indispensable part of our everyday life and has deeply penetrated into every field of human activity embracing education in general and the system of higher education in particular. The educator of a contemporary higher school cannot help taking into consideration the innovations in the sphere of cutting edge technologies and thus in order to enhance the learner's interest and motivation he has to take into account these changes and devise lesson plans incorporating various activities aimed at making use of digital technologies. The authors of the current research consider major types of digital education used while teaching foreign languages in institutions of higher learning, study their peculiarities and options, benefits and shortcomings in the present teaching context. The study also highlights possible difficulties that both a teacher and a student might encounter and suggests ways to overcome them to achieve the most desired effect. In order to avoid further potential hardships connected with digital technologies the authors point out some pathways that will facilitate the teacher's adaptation to modern conditions and will make the process of learning bright and fascinating.

Key words: digital technologies, digital education, comparison, a foreign

language, higher education institutions, teaching techniques

На сегодняшний день трудно представить жизнь современного человека без применения цифровых технологий. Так, термин «грамотность» в настоящих условиях подразумевает под собой не только способность писать и читать, как это было ранее, но и способность пользоваться техническими средствами, цифровыми устройствами и различного рода программным обеспечением. Именно поэтому кажется вполне естественным, что цифровые технологии нашли широкое применение в образовании на различных этапах обучения. Понятие «цифровое образование» прочно утвердилось в сознании современного человека вслед за термином «цифровая экономика» с начала 21 века [1, с. 26]. Особую популярность цифровое образование приобрело в период самоизоляции, тем не менее, реальность такова, что современные условия жизни невообразимы без использования цифровых технологий, в том числе и в образовании.

Цифровое образование в широком смысле – образование, которое осуществляется в условиях сетевого общества и включает в себя курсы дистанционного обучения, применение новых технологий (искусственный интеллект, достижение в области робототехники, компьютерное обучение, электронные учебники, веб-ресурсы) с помощью современных устройств (смартфоны, планшеты, интерактивные доски и т.д.) [1, с. 29]. В высшей, как и в средней школе, оно представлено в основном дистанционным и электронным обучением, где под дистанционным образованием подразумевается взаимодействие учителя и ученика на расстоянии с помощью информационных сетей. Однако стоит разграничивать понятия «цифровое образование» и «электронное обучение» (E-learning), поскольку электронное обучение подразумевает под собой лишь систему обучения при помощи информационных и электронных технологий, обучение с помощью интернета и мультимедиа и связано с использованием информации в рамках базы данных и

применением информационных технологий для обработки и передачи этой информации [2, с. 145].

Применение цифровых технологий при обучении иностранным языкам представляет особую актуальность, поскольку не просто служит средством мотивации обучающихся, но и значительно расширяет возможности репрезентации и усвоения предлагаемого материала.

Целью данного исследования является изучение различных видов цифрового образования, применяемые при изучении иностранных языков в высших учебных заведениях для повышения эффективности процесса преподавания и обучения. Практическая значимость работы нацелена на облегчение ориентации и процесса адаптации современного преподавателя при подготовке к занятиям по иностранному языку.

При подготовке к занятиям преподавателю иностранного языка следует принять во внимание особенности форм обучения при помощи цифровых технологий. Так, с одной стороны, цифровые устройства не требуют привязки учителя и учащегося к конкретному месту, обучение может проходить практически в любой географической точке земного шара, что, безусловно, делает процесс удобным и доступным.

Кроме того, учащийся может распределять время и работать в своем режиме, а это, несомненно, повышает мотивацию, самостоятельность, эффективность усвоения знаний и укрепляет чувство ответственности, при этом преподавателю гораздо проще реализовывать индивидуальный подход к студентам, а у последних не возникает чувства неловкости, стеснения задавать вопросы или высказать свое мнение, это можно сделать лично, например, написав преподавателю в чат.

Также дистанционные цифровые технологии дают возможность привлекать высококвалифицированные преподавательские кадры извне, которые предлагают семинары, мастер классы, тематические видеофрагменты, где специалисты делятся бесценным опытом. Это особенно важно при

обучении иностранным языкам, поскольку студенты получают доступ к аутентичным материалам, слушают носителей языка, погружаются в социокультурную среду, что, в свою очередь, облегчает работу преподавателя при подготовке к занятиям, повышает мотивацию и актуальность изучения живого языка, и, наконец, способствует формированию всесторонне развитой личности с широким кругозором и космополитическими взглядами.

С другой же стороны, необходимо учесть, что именно коммуникативная направленность изучения иностранного языка делает личное общение между преподавателем и учащимся незаменимым компонентом процесса обучения. Оно позволяет студенту задавать вопросы, участвовать в дискуссии, наладить эмоциональный контакт и общение со сверстниками, сформировать командный дух и проникнуться атмосферой живого общения. Максимальная вовлеченность в процесс посредством личного общения вдохновляет учащихся на успех и делает обучение динамичным, ярким и занимательным.

Также следует принять во внимание, что обучение при помощи цифровых технологий требуют повышенной дисциплинированности, ответственности и самоорганизации студентов, а это может вызывать определенные трудности при изучении языка даже у студентов старших курсов. Известно, что традиционная форма преподавания всегда подразумевала наличие педагога-наставника, многие студенты не привыкли работать, полагаясь на внутреннюю мотивацию, поэтому участие преподавателя в процессе обучения становится необходимым.

Более того, абсолютно очевидно, что работая с цифровыми источниками или же онлайн, студенту бывает сложнее сконцентрироваться на изучаемой теме вследствие однообразности и монотонности репрезентации материала, а также отсутствия командной работы.

К тому же, стоит отметить, что атмосфера вне аудитории не всегда способствует усвоению знаний, домашняя обстановка часто лишает студента возможности уединиться и сосредоточиться, а отсутствие собственного

компьютера, высокоскоростного интернета все еще продолжает быть актуальной проблемой и лишь усугубляет ситуацию.

Немаловажным также является и тот факт, что преподаватель вынужден уделять больше времени на подготовку онлайн занятия или занятия с применением цифровых технологий, внедряя наглядные средства, создавая различные презентации, разрабатывая интерактивные задания для максимального облегчения усвоения материала и поддержания интереса студентов.

В добавление к вышесказанному, отсутствие должного визуального контакта и ответной реакции подразумевает гораздо большую психологическую нагрузку для преподавателя, нацеленную на формирование мотивации учащихся [3].

С методической точки зрения, применение цифровых технологий на занятии иностранного языка позволяет преподавателю реализовать все традиционные педагогические задачи:

- обучающую, состоящую в презентации новых знаний в виде лексического или грамматического материала, а также формировании необходимых речевых умений и навыков;
- воспитательную, нацеленную на формирование личностных качеств, моральных ценностей, идеалов, жизненных взглядов, а также универсальных и профессиональных компетенций студентов, подразумевающих ознакомление с культурой страны изучаемого языка, норм речевого и поведенческого этикета;
- развивающую, направленную на всестороннее развитие личности, улучшение мышления, памяти и умственных способностей, развитие творческого потенциала учащихся и т.д.;
- мотивирующую, прививающую интерес к изучаемому языку при помощи аудиовизуальных средств и полного погружения в иноязычную среду благодаря применению цифровых технологий;

– познавательную, заключающуюся в формировании системы научных взглядов и практических умений их применения. [4, с. 300]

Что касается форм цифрового образования, выделяются следующие направления, которые стали крайне популярны в высшей школе за последнее время:

А) Массовые открытые онлайн курсы. (MOOCs) Этот формат был изначально создан в 2008 г. под эгидой и при поддержке международных университетов и пережил свое второе рождение, под девизом – «Образование для всех». Переход на дистанционное обучение в период пандемии в 2020 г. помог ему стать самым популярным: количество пользователей онлайн курсов в этот период увеличилось от 13000 до 100 000 000.

При изучении иностранных языков в высшей школе онлайн курсы в основном нацелены на отработку и закрепление практических навыков, которые формируются в процессе реализации основной части теоретической или практической дисциплины. Такие цифровые продукты могут быть представлены, например, серией лекций и практических заданий по стилистике, лексикологии, фразеологии изучаемого языка или же онлайн курсы, носящие исключительно прикладной характер, например, цифровой ресурс для закрепления лексического материала по определенной теме («Hiking», «Medicine»...) или для отработки грамматических навыков по практической грамматике изучаемого языка.

Популярные цифровые ресурсы по изучению иностранного языка предлагают широкий спектр возможностей для развития языковых компетенций, таких как обучение по Skype, дистанционное онлайн обучение в языковых школах (например, SkyEng), бесплатные и платные онлайн-ресурсы Lingualeo, Puzzleenglish и Duolingo, Grammarly.com и т. д.

Считается, что данные ресурсы отличаются удобством использования, возможностью доступа в любой момент, интерактивностью и т.д.

Как показывает опыт педагогов-преподавателей иностранного языка в ВУЗе, прохождение онлайн курсов студентами не может являться единственным ресурсом для достижения эффективного результата. Онлайн курс рекомендуется использовать как дополнение традиционной формы обучения или же в сочетании с другими форматами. Низкая заинтересованность и активность студентов данными курсами объясняется частично плохо сформированными навыками самостоятельной работы, привычная форма работы всегда подразумевала наличие наставника на занятии. Сами студенты среди недостатков отмечали низкую самомотивацию, вызванную однообразием заданий курса, технические неполадки в процессе выполнения работы и нехватку живого общения с преподавателем [5, с. 10].

Б) Zoom и видео платформы. Они отличаются тем, что представляют собой единую замкнутую систему, которая позволяет преподавателю полноценно проводить теоретические и практические занятия по изучению иностранного языка. В процессе обучения возможно сочетать групповые и индивидуальные занятия при помощи использования презентаций, пособий и словарей в электронном виде и различных учебных материалов.

Формат приобрел широкое распространение также в период карантина в связи с вынужденным переходом на дистанционное обучение.

Среди преимуществ таких обучающих платформ следует отметить опцию видеозаписи занятий, что может быть полезно в случае отсутствия студентов на занятии или же возможность обращения к материалу при необходимости его повторения. Однако, недостатки представлены потенциальными техническими проблемами во время занятия, нежеланием или невозможностью студентов присутствовать на занятии в видеорежиме и, следовательно, большие эмоциональные затраты по получению ответной реакции, дополнительные временные затраты преподавателя по подготовке материала, трудности по контролю знаний, проверке устного и письменного домашнего задания и т.д.

Актуальный на сегодняшний день вопрос сможет ли дистанционное обучение при помощи обучающих видео платформ заменить традиционное обучение все еще остается открытым в связи с наличием ряда недостатков. На наш взгляд, несомненно, это оптимальный выход в форс мажорной ситуации, и эффективная дополнительная форма обучения языку, тем не менее, унификация данного формата кажется сомнительной и не в полной мере рациональной.

В) Проблемно-ориентированное (исследовательское) обучение. (Inquiry-based learning). Суть этого направления состоит в том, что обучающийся становится инициатором в процессе обучения, в то время как роль преподавателя заключается не просто в трансляции, передаче знаний, а в направлении студента двигаться в нужном направлении и создании положительной мотивации к поиску дальнейшей информации и изучению дисциплины или языка в целом. Данный формат подразумевает высокий уровень сознательности у учащихся начиная от выбора дисциплины до самостоятельного подбора и изучения материала.

Период карантина также ускорил широкое распространение этого направления ввиду ограниченных возможностей общения с преподавателем. В России этот вид обучения был крайне востребован до периода пандемии в корпоративной и бизнес среде. В настоящее время формат повсеместно применяется в высшей школе и особенно эффективен у студентов старших курсов.

При изучении иностранного языка преподаватель может поставить перед учащимися проблемные задачи в индивидуальном порядке или разделить их на группы и организовать последующую дискуссию, доклады с обсуждением по таким дисциплинам, как история изучаемого языка, межкультурная коммуникация, переводческий анализ текста и т.д. Возможно также дать темы для докладов и презентаций по практическому курсу изучаемого языка, например по темам «Education», «Painting and artists», «Upbringing of children» и сравнить ситуации в странах изучаемого языка и родной стране и т.д.

В целом эксперты в области образования приходят к единодушному мнению, что элементы этого формата могут и должны быть интегрированы в процесс обучения, поскольку именно активный поиск информации способствует максимально эффективному усвоению знаний. Основная задача педагога заключается лишь способности заинтересовать студентов и показать актуальность и важность изучаемой проблематики.

Г) Обучение с помощью мобильных устройств (Mobile learning /m-learning) основано на применении гаджетов, в основном смартфонов. Большая часть проектов в области образовательных технологий пытается адаптировать программные продукты под смартфоны для удобного пользования, как и на компьютере. Согласно исследованиям, ежедневно более 90% Россиян получают доступ к интернету при помощи смартфона или планшета. Юнеско оказывает особую поддержку проектам по внедрению эффективного использования мобильных технологий в образовании. Эксперты создали коллекцию ресурсов онлайн по реализации данных проектов и отбирают лучшие образовательные мобильные приложения с применением геймификации, интерактива, виртуальной и дополненной реальности.

В действительности, внедрение стратегии «Принеси свое устройство» - BYOD (bring your own device) – стало широко применимо в университетской среде по всему миру, где студенты используют собственные гаджеты в образовательных целях. Это дает возможность образовательному учреждению значительно снизить расходы на закупку оборудования и делает процесс обучения более удобным и доступным даже в неоснащенной аудитории. Основная задача преподавателя заключается лишь в том, чтобы использование мобильного устройства было нацелено исключительно на решение образовательных задач и у студентов не возникало соблазна применять его в личных целях.

Что касается изучения иностранных языков, данный формат уже стал естественным и необходимым на обычном рабочем занятии, как на начальном

этапе изучения, так и на более продвинутом уровне. Так, например, для закрепления лексических навыков студентам доступны электронные словари издательств Longman, Cambridge, Oxford и т.д., где быстро можно найти перевод незнакомого слова, его толкование, проверить правописание, посмотреть или прослушать варианты произношения, изучить грамматические формы слова и увидеть употребление слова в его лексическом окружении (например, использование нужного предлога, возможные словосочетания). Преподаватель также может дать различные задания с применением словаря или интернет источника, такие как подбор синонимов или антонимов к изучаемому слову, изучение всех его значений в случае полисемии, установление различий между синонимами в синонимичном ряду, поиск производных слова, составление собственных предложений с использованием нового слова и т.д.

Помимо словарей, использование различных сервисов, как, например, Talk to books позволит разнообразить задания и поможет преподавателю в подборе творческих заданий, например, составление списка книг по изучаемой теме, подбор мыслей и цитат авторов и их анализ, обсуждение изученного в группах. [4, с. 302]

Таким образом, грамотное использование данного формата послужит эффективным инструментом в руках преподавателя.

Д) Гибкий формат (Flexible learning) подразумевает индивидуальный подход к обучению и позволяет учащемуся выбирать собственную стратегию. Он не предполагает четких и жестких правил и основан на методике, учитывающей потребности, возможности и интересы конкретного студента. Некоторые высшие учебные заведения России одобрили и уже запустили проекты, где студенты могут частично определять свою траекторию обучения.

Например, студентам языковых ВУЗов предлагается выбирать дисциплины для изучения из раздела учебного плана «Дисциплины по

выбору», такие как испанский или китайский язык; лингвострановедение или этнолингвистика; лексикография или основы фразеологии и т.д.

Данный формат успешен в мотивации студентов к изучению конкретных дисциплин, однако рассчитан на высокий уровень сознательности учащихся.

Е) Смешанное обучение (Blended learning) представляет собой чередование работы онлайн и оффлайн. Студент обучается индивидуально преподавателем, но также пользуется и онлайн сервисами, чат-форумами, посещает онлайн вебинары, и т.д. В настоящее время по очевидным причинам фокус смешанного обучения смещается в онлайн пространство. Перспективы дальнейшего распространения смешанного обучения зависят во многом от политики и стратегии развития университетов, однако эксперты рекомендуют не игнорировать решающую роль традиционной системы образования.

Преподавание иностранных языков в высших учебных заведениях сегодня фактически проходит в формате смешанного обучения, где преподаватель сочетает обучение с привлечением цифровых технологий с традиционной методикой преподавания. Умелое комбинирование различных подходов в зависимости от цели и тематики конкретного занятия поможет достичь максимально желаемого результата. Так, современное занятие по изучению языка может включать в себя и обучение с помощью мобильных устройств, и проблемно-ориентированное обучение, и работу посредством видео платформы в сочетании с традиционной работой над текстом, отработкой лексических навыков и т.д.

Ж) Перевернутый класс (Flipped classroom). Этот формат, созданный в 2000 году Джонатаном Бергманом и Ароном Сэмсом, представляет собой разновидность смешанного обучения и считается одним из простых и доступных образовательных стратегий. Он подразумевает самостоятельное усвоение знаний студентами, выделением проблемных моментов с последующим закреплением материала на занятии, выполнением практических и лабораторных заданий, обсуждением под руководством преподавателя.

Самостоятельный поиск информации способствует активному вовлечению студентов в процесс обучения и, следовательно, повышает качество усвоения знаний.

Этот формат может быть успешно применен при изучении теоретических дисциплин иностранного языка, когда преподаватель предлагает студентам подготовить, например, выступление для семинарского занятия, которое впоследствии будет разбираться на занятии. Элементы данного подхода используются и на практических занятиях изучения языка: студентам старших курсов можно предложить сначала провести самостоятельную работу над текстом с составлением вокабуляра новых слов, выражений, упражнений по тексту и их дальнейшее обсуждение в аудитории.

3) Система управления обучением (Learning management system/LMS) сочетает в себе смешанное обучение с индивидуальной траекторией образования. Она позволяет создать собственные курсы, учитывая индивидуальные потребности и желания учащегося. Благодаря такой стратегии возможно персонифицированную систему обучения, нацеленную на конкретную личность согласно его способностям, сильным и слабым сторонам.

И) Система STEAM – формат образования, основанный на реализации междисциплинарного и прикладного подхода, включающего пять дисциплин в одну систему обучения: S – наука (science); T – технологии (technology); E – инженерное дело (engineering) ; A – гуманитарные науки (art); M – математика (mathematics). Данные проекты набирают все большую популярность, где преподаватели обучают студентов современным технологиям и машиностроению, программированию и иностранным языкам в форме мастер классов. Проектная деятельность также играет ключевую роль в этом формате [6].

Овладение техническими знаниями в сочетании с изучением иностранного языка кажется крайне перспективным в настоящее время.

На современном рынке труда специалисты такого уровня всегда будут востребованы и конкурентоспособны.

Чтоб интегрировать цифровые технологии в процесс преподавания преподавателю желательно пройти самому онлайн курс, ознакомиться с форматом, оценить его содержательную сторону. Кроме того, стоит выяснить, какими платформами и устройствами располагает данное учебное заведение для подготовки к занятиям. Также необходимо отслеживать нововведения в образовании на государственном уровне и постепенно вводить элементы цифрового образования в привычный формат работы.

Таким образом, внедрение цифровых технологий в образовательный процесс становится необходимым и естественным. Смешанное и исследовательское обучение наиболее популярны на сегодняшний день. Несомненно, роль преподавателя всегда останется значимой: несмотря на цифровую грамотность молодого поколения и бурный рост цифровизации усвоение знаний происходит наиболее эффективно под чутким руководством преподавателя. Как показывают исследования, именно человеческий фактор влияет на мотивацию студентов и вовлеченность в процесс обучения. Только сильная, харизматичная личность преподавателя и его авторитет могут поддерживать интерес и вдохновлять студентов. Цифровые технологии лишь служат хорошим инструментом в руках опытного специалиста. Однако в современных условиях роль преподавателя несколько изменится, увеличится его значимость в качестве наставника, направляющего процесс обучения и мотивирующего студентов к поиску дальнейшей информации и новых решений.

Список литературы

1. Вайндорф-Сысоева М.Е., Субочева М.Л. «Цифровое образование» как системообразующая категория: подходы к определению URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovoye-obrazovanie-kak-sistemoobrazuyuschaya-kategoriya-podhody-k-opredeleniyu>
2. Воробьева Т.А. К вопросу о понятии электронного обучения URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-o-ponyatii-elektronnogo-obucheniya>
3. Матрусова А. «Это беспощадный псевдоофлайн». Какие мифы об образовании разрушила самоизоляция. URL: <https://www.pravmir.ru/eto-besposhadnyj-psevdooflajn-kakie-mify-ob-obrazovanii-razrushila-samoizolyacziya/>
4. Колесниченко А.Н. Применение цифровых технологий при обучении лексике иностранного языка в высшей школе URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-tsifrovyyh-tehnologiy-pri-obuchenii-leksike-inostrannogo-yazyka-v-vysshey-shkole>
5. Астанина А.Н. Проблемы цифровизации при обучении иностранному языку в ВУЗЕ URL: <https://elar.urfu.ru/handle/10995/74053>
6. Zoom и цифровой учитель: десять трендов школьного обучения после пандемии. URL: <https://trends.rbc.ru/trends/education/5f0c9e549a794701ee47d369>
7. This will revolutionize education URL: <https://www.youtube.com/watch?v=GEmuEWjHr5c>
8. Астанина А.Н., Вербицкая Н.О. Методика электронного обучения в повышении качества освоения иностранного языка студентами заочной формы получения высшего образования // Профессиональное образование в современном мире. 2018. Т. 8, № 1. С. 1670–1676.
9. Артюшина Л.А., Спирина Т.В., Троицкая Е.А. Компьютерные технологии в науке и образовании: учеб. - практ. пособие. Владимир: Изд-во ВлГУ, 2018. 228с.
10. Авраменко А.П., Шевченко В.Н. Мобильные приложения как инструмент геймификации языкового образования // Вестник МГОУ. Серия: Педагогика. – 2017. – № 4. – С. 64–71.

Коллектив авторов:

Базарова Л.В., Викторов А.А., Галкин С.В., Гилязева Э.Н., Гладких В.Д., Головина Н.А.,
Горленко Н.П., Гусева Т.М., Дебелова Н.Н., Зубкова О.А., Игнатов В.Н., Канина И.В.,
Леонтьев Р.В., Лотов В.А., Мазаева Т.В., Михайлова В.К., Мустафаев Н.Г., Никифоров А.Н.,
Саркисов Ю.С., Сроева Т.Р., Ушаков Е.В., Хайруллина Д.Д., Шепеленко Т.С., Шопов Д.Г.

Редактор: Ивановская И.И.

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

ИННОВАЦИОННОЕ РАЗВИТИЕ НАУКИ: ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ

Монография

Подписано в печать 04.10.21.

Тираж 500 экз.

Формат 60х85 1/16. Усл. печ. л. 16,91.

МЦНП «Новая наука»

185002, г. Петрозаводск

ул. С. Ковалевской д.16Б помещ. 35

office@sciencen.org