

## ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ АКУСТИКИ

УДК 534.62

### ИЗМЕНЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАГЛУШЕННЫХ КАМЕР СО СЪЕМНОЙ ЗВУКООТРАЖАЮЩЕЙ РАБОЧЕЙ ПЛОЩАДКОЙ

© 2019 г. Н. С. Виноградов<sup>а</sup>, Ю. Н. Маков<sup>а, б, \*</sup>

<sup>а</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет  
Россия, 119991 Москва, ГСП-1, Ленинские горы

<sup>б</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН  
Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова 38

\*e-mail: yuri\_makov@mail.ru

Поступила в редакцию 18.12.2018 г.

После доработки 18.12.2018 г.

Принята к публикации 21.12.2018 г.

Проведенные тестовые измерения в звукомерной заглушенной камере со звукоотражающей съемной площадкой (фанерные щиты) на подвесном сетчатом полу и полученные в результате этого октавные и интегральные эквивалентные уровни звукового давления от широкополосного шумового источника показали для частотной области ниже 500 Гц заметное отклонение от условия свободного поля при выполненной конструктивной модификации камеры. В экспериментально определенном низкочастотном диапазоне в наибольшей степени сказывается наличие заданного звукоотражающего элемента в заглушенной камере.

**Ключевые слова:** звукомерная заглушенная камера, навесной пол со звукоотражающим настилом, условие свободного поля

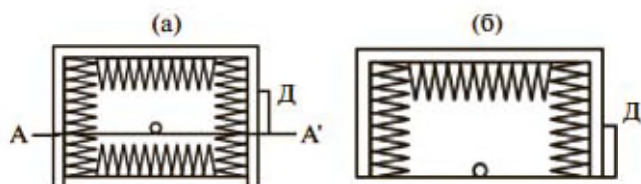
DOI: 10.1134/S0320791919090041

#### ВВЕДЕНИЕ

Значительная часть решаемых задач и выполняемых работ в области измерительной акустики связана с использованием *звукомерных камер* [1–3], причем это название для помещений со специальными акустическими свойствами объединяет два разных их типа: первый – это *акустические заглушенные (или безэховые) камеры* (далее АЗК) и второй – *акустические реверберационные камеры* (АРК). Отметим, что указание в их полном названии на принадлежность к акустике оправдано тем, что аналогичные два типа помещений используются для выполнения различных действий (в основном также измерительных) с электромагнитными волнами. Если предназначение АЗК – это создание условий для моделирования акустического поля в свободном (реально неограниченном) пространстве, что достигается исчезающе малым влиянием каких-либо отражений от границ и других объектов внутреннего объема камеры в диапазоне рабочих частот, то предназначение АРК – создание внутри этой камеры диффузионных акустических полей.

Дальнейший материал статьи будет относиться только к камерам одного типа, а именно к АЗК, что делает необходимым дать следующее пояснение. Наилучшее обеспечение условия свободного

поля в камере достигается покрытием всей ее внутренней поверхности (всех шести граней) системой звукопоглощающих элементов, функции которых наилучшим образом исполняют выступающие практически на метр от исходных плоскостей граней конусы или клинья из звукопоглощающего материала; к этому добавляется условие отсутствия каких-либо внутриобъемных для камеры отражающих конструктивных элементов. При наличии таких “идеальных” безотражательных условий камера доопределяется в своем названии как акустическая полностью заглушенная камера (АПЗК). Доступ в такую камеру и передвижение внутри нее при отсутствии естественного пола возможен только по горизонтально натянутой сетке (в простейшем варианте из стальной проволоки). Кроме того, высота расположения подвешенного сетчатого пола над уровнем нижней грани камеры определяет и расположение входной двери в камеру (для удобства порог двери должен быть примерно на одном уровне с подвесным полом). Описанная типичная конфигурация для АПЗК показана на рис. 1а. Вторая половина рисунка (рис. 1б) демонстрирует используемую упрощенную конструкцию камеры с отсутствием поглощающих элементов на ее нижней грани, что дает возможность использовать обычный и естественный



**Рис. 1.** Схематические рисунки (а) полностью заглушенной камеры с отмеченным уровнем AA' подвесного сетчатого пола и (б) полузаглушенной камеры. Символ Д обозначает входную дверь в камеру.

горизонтальный пол, на котором могут устойчиво располагаться тяжелые механизмы и конструкции для проведения акустических тестовых измерений. Такая разновидность камеры именуется акустической полузаглушенной камерой (АполуЗК). Отметим, что в некоторых случаях измерения в таких камерах больше соответствуют реальной обстановке относительно испытуемой системы (например, для транспортного средства на дороге).

Кратко описанные две разновидности камер (заглушенные и полузаглушенные) являются на сегодняшний день стандартными и именно эти названия фигурируют в последней редакции ГОСТа ISO 3745-2014 [4], который регламентирует использование этих камер для определения уровней звуковой мощности и звуковой энергии источников шума по звуковому давлению, а в приложениях к этому ГОСТу определяется процедура поверки (тестирования) самих камер.

В заключение этого раздела вернемся к рассмотрению характерных особенностей акустических полностью заглушенных камер (АПЗК), что естественным образом определит задачу данной работы.

Прежде всего отметим, что наличие в АПЗК натянутой сетки не должно нарушать условие свободного пространства, связанного с отсутствием хотя бы частичного отражения акустических волн от сетки (т.е. диаметр проволоки, из которой сделана сетка, должен быть меньше самой короткой длины волны рабочего диапазона, а шаг сетки должен быть заметно больше максимальной длины волны). В свою очередь, эти условия вступают в определенное противоречие с желательными требованиями устойчивости металлической сетки к изгибным деформациям и колебаниям, что необходимо для достаточно устойчивого передвижения исследователей по сетчатому полу и выполнения необходимой работы с расположением на сетке необходимого оборудования. В последнее время проблема сочетания более жесткой конструкции сетчатого пола при достаточно свободном прохождении акустических волн через эту структуру сетки стала обращать на себя внимание соответствующих специалистов [5]. Однако для существующих и функционирующих АПЗК, име-

ющих большие размеры, замена навесного сетчатого пола старого образца на более современный является практически нереальным делом (из-за вынужденного “простоя” камеры, сложности и дороговизны этого мероприятия и т.п.). Поэтому в некоторых случаях для создания более “комфортных” условий передвижения по “зыбкому” подвесному сетчатому полу АПЗК и для более устойчивых и фиксированных условий проведения измерительных экспериментов с различными объектами делают настил, чаще всего из листов фанеры подходящей толщины, и используют этот настил в качестве рабочей измерительной площадки. При этом существенны следующие детали: а) при большой площади камеры настилом покрывают не весь сетчатый пол, а лишь его часть; б) настил является съемным, что позволяет при необходимости возвращаться к исходной классической архитектуре АПЗК, в) присутствие настила (рабочей площадки) на навесном сетчатом полу “уводит” камеру из класса полностью заглушенных камер, но не делает ее полузаглушенной. Для большей определенности с типом камеры с настилом и для выработки “официального” названия камеры были проведены консультации со специалистами ведущих метрологических организаций (ВНИИФТРИ, Росстандарт), которые помогли сконструировать адекватным определение подобных камер с осуществленным настилом на подвесной сетчатый пол — “Безэховая камера со съемной звукоотражающей площадкой для испытания изделий”.

Все перечисленные выше особенности предопределяют изменение акустических свойств камеры с настилом, причем эти изменения также будут зависеть от частотного состава акустических полей, с которыми производятся эксперименты в камере с настилом. При всех этих факторах исследователи, эксплуатирующие камеру с настилом, чаще всего не имеют точных, или хотя бы оценочных данных об измененных характеристиках камеры с настилом; иногда потенциальные возможности получить эти данные сдерживаются отсутствием необходимого опыта или методики. С учетом всего сказанного в последующих разделах статьи будет описана методика проведения тестовых замеров в заглушенной камере с настилом кафедры акустики физического факультета Московского государственного университета им М.В. Ломоносова.

#### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ТЕСТОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В ЗУКОМЕРНОЙ КАМЕРЕ СО СЪЕМНОЙ ЗВУКООТРАЖАЮЩЕЙ ПЛОЩАДКОЙ

Вначале приведем основные параметры тестируемой заглушенной камеры, которая была сооружена в виде пустой трехсоттонной бетонной короб-

ки внутри здания физического факультета МГУ, строительство которого закончилось в 1953 г. Бетонная коробка камеры лежит (“плавает”) на резиновых прокладках-амортизаторах, установленных на специальном фундаменте на уровне 5-го этажа факультетского здания. С началом функционирования физического факультета на Ленинских горах сотрудники кафедры акустики под руководством и при непосредственном участии первого заведующего кафедрой акустики профессора С.Н. Ржевкина вели интенсивные исследования по выбору наиболее подходящего и наилучшего (на тот момент) по характеристикам звукопоглощающего покрытия [6]. Сами исследования, а затем и довольно трудоемкий процесс установки покрытия на стены, пол и потолок внутреннего объема коробки, заняли еще более чем двухлетний период после строительства факультета. Внутренняя поверхность камеры была “облицована” конусными звукопоглотителями, позади которых находились воздушные резонансные звукопоглотители, представляющие собой воздушное пространство между стенами и параллельными им деревянными плоскостями с определенным образом расположенными отверстиями, на которые (на деревянные плоскости) крепились основания конусов. Расположенный у стены резонансный звукопоглотитель предназначен для окончательного поглощения тех остатков волн, которые, пройдя конусы, не испытали должного поглощения.

Для конусных звукопоглотителей характерны следующие данные:

а) материал для конусов – стекловата, которая для формирования конусов обтягивалась марлей; плотность набивки стекловаты в конусах  $0.12 \text{ г/см}^3$ ;

б) размеры конусов: высота  $\sim 75 \text{ см}$ , площадь основания  $\sim 600 \text{ см}^2$ , воздушный зазор (расстояние оснований конусов от стены)  $\sim 25 \text{ см}$ ; таким образом, общая толщина звукопоглощающей конструкции составляет примерно  $1 \text{ м}$ , т.е. на таком расстоянии от стены находятся вершины конусов. Выбранная конструкция обеспечивает коэффициент отражения  $\beta \approx 10\text{--}12\%$  в диапазоне частот  $80\text{--}110 \text{ Гц}$ , а на более высоких частотах  $\beta < 5\%$ ;

в) для покрытия всей внутренней поверхности камеры использовано приблизительно  $6000$  конусов, что при выбранной плотности набивки стекловаты потребовало  $20$  тонн этого наполнителя.

С учетом метровой толщины системы “конусы из стекловаты + воздушно-резонансный поглотитель непосредственно у стен камеры” размеры рабочего пространства камеры составили  $6 \times 9 \times 5$  (высота) метров при объеме  $270 \text{ м}^3$ . Общий вид рабочего пространства звукомерной заглушенной камеры кафедры акустики физического факультета МГУ показан на рис. 2.

Для передвижения и проведения экспериментов во внутреннем пространстве камеры на высо-

те  $2 \text{ м}$  от нижней поверхности пола натянута стальная сетка, которая к тому же находится на уровне порога входной двери в камеру (см. рис. 3 и 1а). Условие свободного пространства сетка не нарушает, так как диаметр проволоки  $d$ , из которой она сделана, меньше самой короткой длины волны рабочего диапазона ( $d = 0.4 \text{ см}$ , при  $\lambda_{\min} \sim 2 \text{ см}$ ). Таким образом, данная камера с сеточным полом изначально относилась к типу полностью заглушенных камер. Позднее, для более удобного и устойчивого расположения аппаратуры при измерительных экспериментах, на подвесной сеточный пол был положен настил из фанерных панелей, причем для устойчивости и горизонтальности эти панели уложены на раму из деревянных брусьев. Этот настил занимает по площади ( $25.5 \text{ м}^2$ ) примерно половину подвесного сеточного пола (см. рис. 3). Отметим, что данное конструктивное изменение камеры является “возвратным”, т.е. при необходимости настил довольно легко и быстро демонтируется. Однако при наличии настила как отражающего элемента внутри камеры, вносящего искажения в условия свободного пространства, требуются тестовые измерения для выявления степени проявления этих искажений.

При разработке методики проведения тестовых измерений принимались во внимание рекомендации уже упомянутого выше ГОСТа [4] (точнее, приложений к нему). Однако полное выполнение предписанных им условий и полная реализация процедуры измерений не были осуществлены по двум основным причинам: а) этот ГОСТ, естественно, не охватывает конструкцию камеры со съемной звукоотражающей площадкой; б) поставленная при измерениях задача (определение степени приближенности нашей камеры со съемной звукоотражающей площадкой к полностью заглушенной камере) отличалась от рассматриваемой в приложениях ГОСТа (тестовая проверка стандартной звукомерной камеры на выполнимость условий свободного акустического поля внутри нее).

Для выполнения поставленной нами задачи нужно путем пространственных замеров генерируемого в камере акустического поля найти отличие распределения этого поля от закономерности полностью свободного поля; при этом будет приниматься во внимание наличие границы настила на плоскости навесного сетчатого пола (см. рис. 2). Замеры поля проводились вдоль предварительно натянутых от излучателя в центре камеры к ее стенам нитей, на каждой из которых отмечено расстояние в метрах от излучателя (см. рис. 3).

Отметим, что, как видно из углового распределения протянутых нитей (рис. 3, справа), две пары этих нитей (II и III, VII и VIII) проведены специально около границы настила. Метки радиального расстояния от излучателя вдоль протянутых



Рис. 2. Общий вид звукомерной заглушенной камеры кафедры акустики МГУ им. М.В. Ломоносова с добавленным конструктивным элементом – настилом из фанерных панелей на подвесной сетчатый пол.

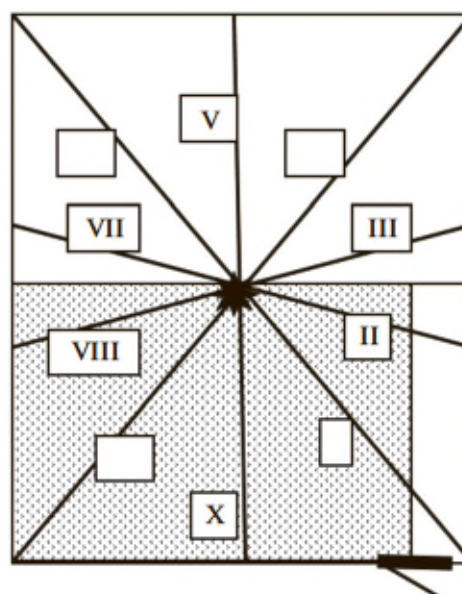
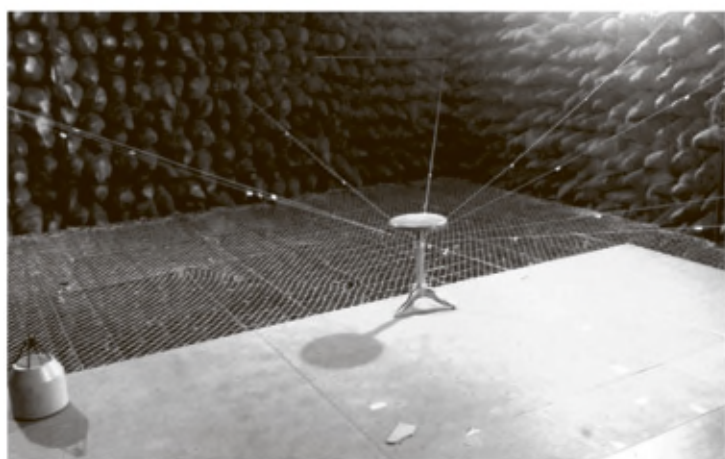
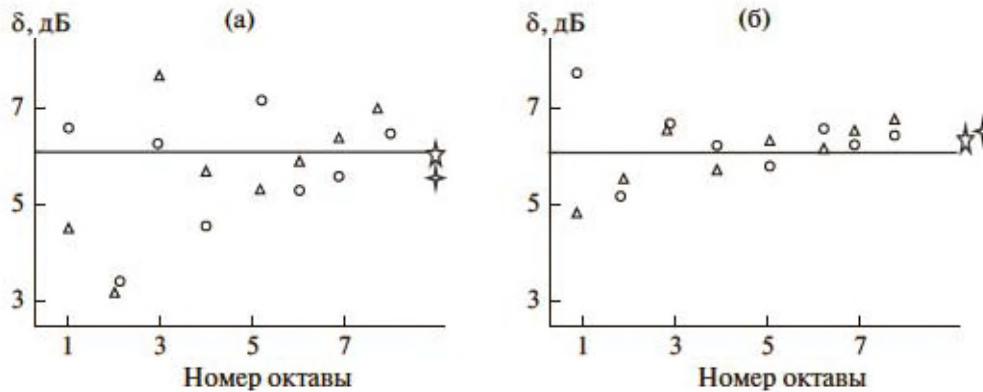


Рис. 3. Слева – фотография подготовленной к тестовым измерениям звукомерной камеры со звукоотражающей площадкой, над которой протянуты направляющие нити с нанесенными метками расстояния от излучателя. В левом нижнем углу расположен подготовленный для помещения на центральную подставку генератор шума. Справа – план разметочных линий и настила (вид сверху).



**Рис. 4.** Разности  $\delta$  уровней давления в октавах (их номера определены в тексте) для удвоенных расстояний от источника шума (отличие от 6 дБ). Треугольники – разности между 1 и 2 м, кружки – разности между 2 и 4 м; справа на каждом графике звездочками – разности между интегральными по частотам уровнями – между среднеквадратичными уровнями шумового сигнала с частотной коррекцией А. Два графика соответствуют двум выбранным (для примера) направлениям: левый соответствует направлению IX (над настилом), правый – направлению VI (над сеточным полом).

нитей позволяют проверить степень выполнимости простейшей закономерности для истинно свободного поля: увеличение радиального расстояния от излучателя вдвое должно уменьшать величину акустического давления на 6 дБ, что соответствует уменьшению давления свободного поля от точечного источника по закону обратной пропорциональности радиальному расстоянию.

В качестве источника акустического сигнала при проводимых измерениях использовался “Источник звука 4205” фирмы Brüel & Kjær (см. рис. 4). Этот калиброванный источник шумового звука генерирует широкополосный белый шум (частотный диапазон 50 Гц–10 кГц), розовый шум (частотный диапазон 100 Гц–10 кГц) и октавные полосы шума (семь октавных полос в частотном диапазоне 125 Гц–8 кГц). В данной работе использовалась 1-я опция (генерация белого шума), что позволило с помощью соответствующего приемника-анализатора получать октавные уровни акустического давления. В качестве такого приемника использовался “Измеритель акустический многофункциональный ЭКОФИЗИКА”, который, осуществляя прием и анализ акустических сигналов в диапазоне частот от 1.6 Гц до 100 кГц, способен выдавать значения октавных уровней акустического давления.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

Использование измерительных приборов с большими возможностями (генератор широкополосного белого шума в диапазоне 50 Гц–10 кГц, многофункциональный акустический измеритель, дающий, в частности, значения октавных уровней акустического давления принимаемого шумового сигнала и значение интегральной характеристики шума – среднеквадратичный уровень шумового сигнала с частотной коррекцией

А (дБА)) позволяет не только получать большой набор измерительной информации, но и заставляет учитывать частотно-зависимые характеристики отдельных конструктивных элементов камеры, в отношении которой и проводятся измерения. Обратим внимание на такие элементы с частотно-зависимыми характеристиками. Во-первых, в результате больших экспериментально-исследовательских усилий (см. [6]) выбранные и установленные в камере звукопоглощающие конструкции (см. 2-й раздел) дают малое значение (менее 5%) коэффициента отражения для всех частот рабочего диапазона, больших 110 Гц. Однако для самых низких частот рабочего диапазона (80–110 Гц) величина коэффициента отражения возрастает до 10–12%. Во-вторых, съемная звукоотражающая площадка из фанерных панелей толщиной 12 мм для проведения измерений в камере также имеет зависящие от частоты параметры отражения/поглощения: в октавной полосе со среднегеометрической частотой 125 Гц значение коэффициента поглощения определяется средним значением 0.28, а уже в следующих октавах его значение спадает до 0.08–0.1. К тому же определенным образом от частоты зависят локальные дифракционные эффекты на границе фанерной площадки (см. рис. 2, 3); для большего проявления дифракционных эффектов акустический источник располагался у граничной кромки настила (рис. 3). Все эти частотно-зависимые характеристики косвенным образом сказываются на полученных измерительных данных с учетом их индивидуализации по октавным частотным полосам. В дальнейшем эти данные будут использованы для специальной обработки с целью верификации различных тестовых критериев.

На рис. 4 приведены наиболее явные результаты по проверке основного критерия свободного

поля в камере вдоль некоторых направлений (два направления из всех использованных, см. рис. 3) и с индивидуализацией по октавным полосам; при этом дан и интегральный результат на основе измеренного среднеквадратичного уровня всего широкополосного шумового сигнала с частотной коррекцией А. Основным критерием идеального свободного поля в камере является проверка выполнимости закона спада амплитуды давления обратно пропорционально расстоянию от источника: при увеличении этого расстояния в два раза при перемещении по направлениям, указанным на рис. 3 справа с измерениями на расстояниях 1, 2 и 4 м, разность между соседними уровнями давления (значениями давления в децибелах) должна составлять 6 дБ. На рис. 4 на фоне теоретической разности в 6 дБ приведены реальные разности  $\delta$  для разных октав (нумерация октав с соответствующими центральными частотами: 1 – октава с 63 Гц, 2 – октава с 125 Гц, 3 – октава с 250 Гц, 4 – октава с 500 Гц, 5 – октава с 1000 Гц, 6 – октава с 2000 Гц, 7 – октава с 4000 Гц, 8 – октава с 8000 Гц), а также разности для среднеквадратичного уровня шумового сигнала с частотной коррекцией А (интегральное по всем частотам значение). Для примера результаты измерений приведены только для двух характерных направлений: для направления VI (над сеточным полом) и IX (над фанерной площадкой); номера направлений соответствуют рис. 3 (справа).

Первичный анализ приведенных на рис. 4 результатов показывает следующее. Значительно большее отличие (разброс) разностных уровней от значения 6 дБ в самых низкочастотных октавных полосах (полосы с центральными частотами 63, 125 и 250 Гц) обусловлено (как и предсказывалось выше) особенностью частотно-зависимых характеристик конструктивных элементов камеры, которые также в наибольшей степени проявляют себя в этом же низкочастотном диапазоне. Для следующих по частоте октавных полос эти разности уровней давления находятся в более

близкой окрестности уровня в 6 дБ. При этом хорошо видно, что эта окрестность меньше для направления над сеточным полом (т.е. для направления в той половине камеры, которая как бы остается полностью заглушенной). Важным является результат для разности между интегральными уровнями – между среднеквадратичными уровнями шумового сигнала с частотной коррекцией А (дБА). Несмотря на неравномерный разброс относительно 6 дБ разностей уровней в октавах, разность для интегральных (усредненных и скорректированных) уровней всегда близка к теоретической разности 6 дБ. Можно сделать следующий вывод: в несколько измененной для удобства работы заглушенной камере со съемной звукоотражающей площадкой для испытания изделий в рабочем диапазоне частот от 500 Гц и выше можно проводить измерения, считая выполненным условие свободного поля в камере.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ривин А.Н. Заглушенная звукомерная камера // Акуст. журн. 1961. Т. 7. № 3. С. 324–336.
2. Сапожков М.А. Электроакустика. М.: Связь, 1978.
3. Duda J. Basic design consideration for anechoic chambers // Noise Control Engineering. 1977. V. 9. № 2. P. 60–67.
4. ГОСТ ISO 3745-2014 (межгосударственный стандарт) Акустика. Определение уровней звуковой мощности и звуковой энергии источников шума по звуковому давлению. Точные методы для заглушенных и полузаглушенных камер (издание официальное). М.: Стандартинформ, 2015.
5. Sakamoto S., Saito F., Suzuki Y., Kakinuma M., Ohyama H., Matsuo H., Takashima K. Construction of two anechoic rooms with a new experimental floor structure // Proceedings of Inter-Noise 2016, Hamburg 2016. P. 6272–6280.
6. Велижанина К.А., Ржевкин С.Н. Исследование звукопоглощающих конструкций для звукомерной камеры физического факультета Московского государственного университета // Акуст. журн. 1957. Т. 3. № 1. С. 23–28.