

Об особенностях измерений на низких звуковых частотах в аэроакустике

Б.И. Гончаренко,* Е.О. Ермолаева†

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, кафедра акустики, Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

(Статья поступила 13.11.2014; Подписана в печать 03.12.2014)

Проводимые в последние годы сотрудниками кафедры акустики работы по изучению «шумового загрязнения» территорий жилой застройки, находящихся вблизи железных дорог и трамвайных путей, а также экспериментальные исследования звукового поля локальных шумовых зон (гоночная трасса, аэропорт, полигон) подтверждают необходимость нормирования как уровней звукового давления, так и колебательной скорости частиц среды в целях контроля за уровнем шумности на низких звуковых частотах. Обсуждаются способы градуировки приемников градиента звукового давления в ближнем поле на воздухе в звукозаглушенной камере и в реальных помещениях.

PACS: 43.60.+d, 43.58.+z УДК: 681.884, 534.88

Ключевые слова: Уровни звукового давления и колебательной скорости, приемник градиента звукового давления, векторный приемник, градуировка звукоприемников, измерения на низких звуковых частотах, транспортные шумы.

ВВЕДЕНИЕ

В 1960-е гг. на кафедре акустики [1] под руководством С. Н. Ржевкина и Л. Н. Захарова сформировалось и получило развитие новое направление — векторно-фазовые методы в акустике, и в этой новой области мы долгое время находились на более высоком уровне по сравнению с зарубежными странами [2]. Несмотря на то, что данное направление развивается достаточно давно, оно получает все новые приложения в различных областях акустики. Причина в том, что использование векторно-фазовых методов информативнее традиционных, так как сам метод основан на измерении не только звукового давления, но и вектора колебательной скорости частиц среды или градиента звукового давления. Проводимые в последние годы сотрудниками кафедры работы по изучению «шумового загрязнения» территорий жилой застройки, находящихся вблизи железных дорог, трамвайных путей, и автомобильных магистралей, а так же экспериментальные исследования звукового поля локальных шумовых зон (гоночная трасса, аэропорт, полигон) [1] подтверждают необходимость измерения, как уровней звукового давления, так и колебательной скорости частиц среды в целях контроля за уровнем шумности на низких звуковых частотах. Задача разработки метрологически обеспеченных методик градуировки векторных приёмников для использования их в аэро- и гидроакустике по-прежнему остается актуальной.

1. ИЗМЕРЕНИЕ ШУМОВ НА НИЗКИХ ЗВУКОВЫХ ЧАСТОТАХ**А. Измерение шума на территории жилой застройки**

Известно, что 70% города Москвы находится в зоне шумового загрязнения, где превышение допустимого уровня шума на территории города в помещениях жилых и общественных зданий достигает 15–25 дБА [3]. При этом для ряда территорий, например охраняемых природных объектов и парков, уровень шума вообще не нормируется. Важным вопросом в предотвращении роста негативного воздействия шумового загрязнения, особенно на низких звуковых частотах, является разработка нормативных документов, включающих как данные акустического поля звукового давления, так и колебательной скорости частиц среды или градиента звукового давления.

В настоящее время действуют Санитарные нормы (СН 2.2.4/2.1.8.562-96), которые устанавливают классификацию, нормируемые параметры и предельно допустимые уровни шума на рабочих местах, допустимые уровни шума в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки в звуковом диапазоне частот. Отметим некоторые недостатки этого документа. Нормы регламентируют лишь допустимые уровни звукового давления, и эквивалентные и максимальные уровни звука только проникающего шума в помещения зданий, при этом структурный шум не регламентируется. Однако шум, возникающий внутри помещений зданий, находящихся, например, вблизи транспортных магистралей можно разделить на две составляющие: проникающий шум, который возникает вне данного помещения и проникает в него через ограждающие конструкции, системы вентиляции, водоснабжения и т. д. и на структурный шум, являющийся результатом излучения звуковых волн вибрирующими поверхностями стен, пола и потолка самого помещения. Как показали наши исследования [4], уро-

*E-mail: gon-boris@yandex.ru

†E-mail: eoermolaeva@yandex.ru

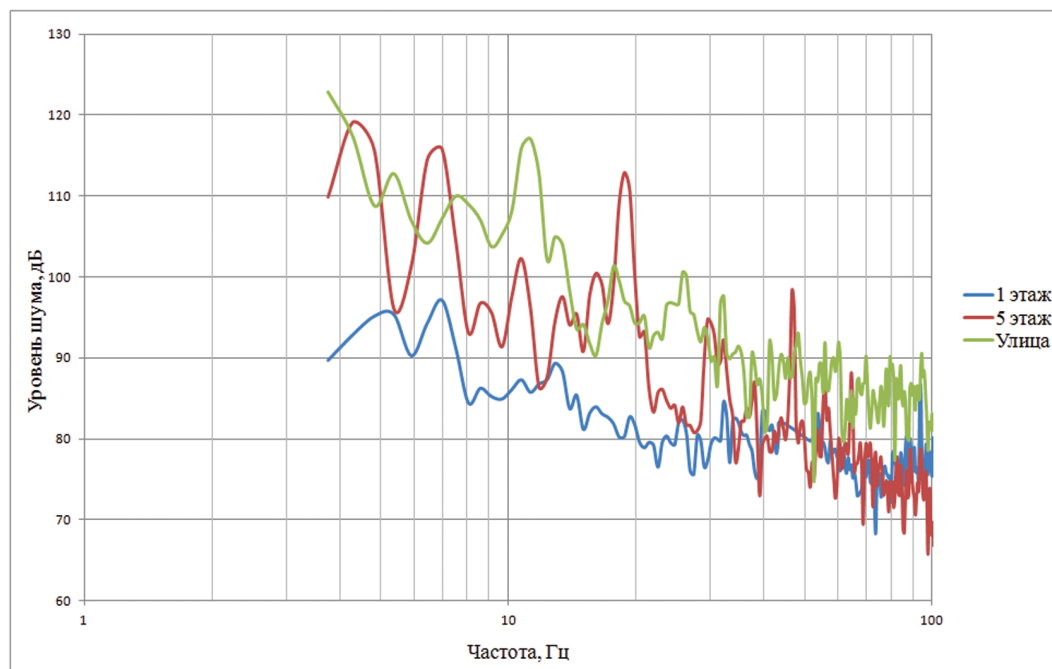


Рис. 1: Спектральные уровни горизонтальной составляющей колебательной скорости V_x

вень структурного шума, связанный с проникновением вибраций внутрь здания и зависящий как от формы колебаний поверхности конструктивных элементов помещения, так и его акустических и геометрических характеристик, значителен в низкочастотном диапазоне.

На рис. 1 приведены спектральные уровни горизонтальной составляющей колебательной скорости V_x , зарегистрированные одним из каналов трехкомпонентного векторного приемника, который был направлен в сторону трамвайных путей. Измерения проводились на улице и в помещениях на разных этажах внутри учебного корпуса Московского энергетического института, расположенного на Красноказарменной улице, в момент прохождения трамвая в летнее время года.

Уровень шума на 5 этаже здания, расположенного около трамвайных путей, в диапазоне частот ниже 100 Гц превышает на 10–20 дБ уровень шума на 1 этаже, что говорит о преобладании структурного шума. Кроме того, экспериментальные данные показали, что в диапазоне частот ниже 100 Гц уровни составляющих колебательной скорости V_x , V_y и V_z на 10–35 дБ превышают соответствующие уровни звукового давления и достигают на отдельных частотах 110–115 дБ. В диапазоне частот выше 100 Гц характер изменения амплитудно-частотных характеристик колебательной скорости и звукового давления одинаков: спектр не имеет выраженных экстремумов, уровни равномерно убывают с возрастанием частоты и не имеют существенных различий по амплитуде, т. е. шумовое поле является диффузным и шум проникает в здание в основном через окна (по воздуху). Полная характе-

ристика акустического поля подразумевает обязательное измерение двух его параметров — акустического давления (скалярный параметр) и градиента звукового давления, или колебательной скорости частиц среды (векторный параметр). Под влиянием этих параметров поля формируются два механизма воздействия акустических волн на объекты: всестороннее сжатие с частотой колебаний под действием звукового давления в волне и раскачивание под действием градиента звукового давления. Таким образом, на низких частотах для оценки уровней шумового поля в помещениях жилых и общественных зданиях регламентации должны подлежать как уровень звукового давления, так и уровень его градиента (или уровни колебательной скорости частиц среды).

В. Измерение шума около железнодорожных путей

Значительное место в решении проблемы борьбы с городскими транспортными шумами занимает снижение уровня шума от движения поездов, особенно в районе железнодорожных станций, где осуществляется их разгон и торможение. В диапазоне частот 10–1000 Гц в черте города около платформы Яуза были проведены измерения шума электропоездов типа ЭР2 при наличии акустического экрана высотой 4 м [5]. Комбинированная приемная система, состоящая из приемника звукового давления и векторного приемника (ВП), располагалась на высоте около одного метра от земли и последовательно размещалась на разных расстояни-

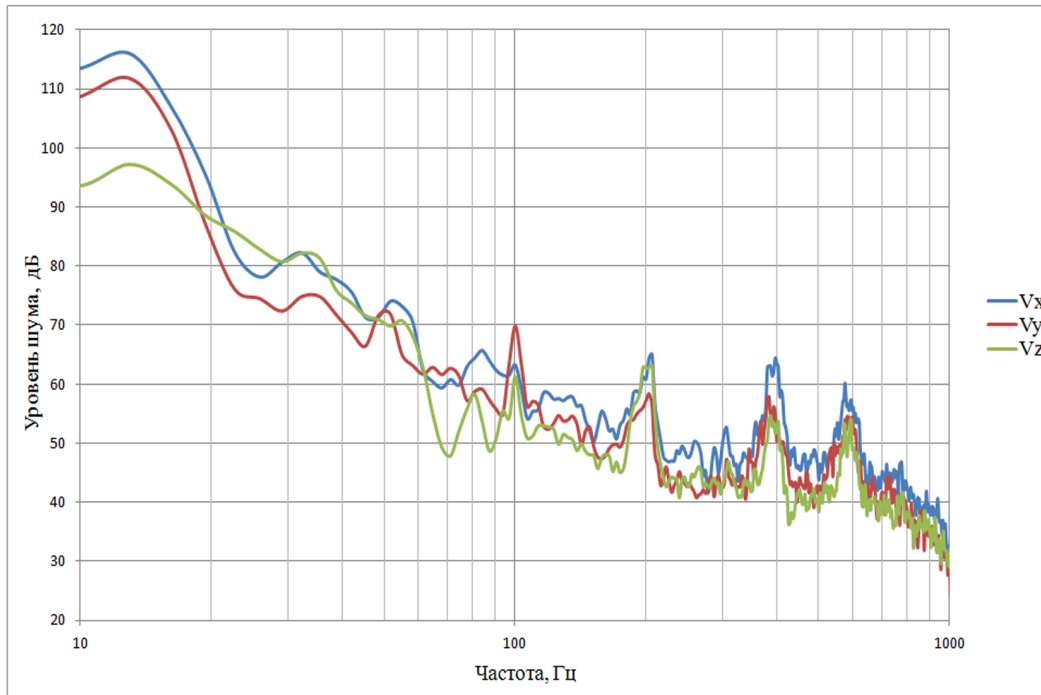


Рис. 2: Уровни составляющих колебательной скорости шумов электропоезда, отходящего от платформы

ях за акустическим экраном. Каналы ВП были ориентированы следующим образом: V_x направлен в сторону железнодорожных путей, канал V_y — вдоль железнодорожных путей, а канал V_z — вертикально. Уровни трех составляющих колебательной скорости шумов электропоезда, отходящего от платформы, приведены на рис. 2. Значения V_x , V_y и V_z в диапазоне частот 10–50 Гц превышали уровень канала P примерно на 10–20 дБ и достигали величины 100–115 дБ на частоте 10 Гц, а в его шумовом спектре появлялись дискретные составляющие. С увеличением скорости электропоезда их уровень возрастал, а значения смещались в область высоких звуковых частот. В диапазоне частот выше 100 Гц уровни по каналам составляющих колебательной скорости примерно совпадал с уровнем звукового давления. Шумозащитные свойства акустического экрана уменьшались при увеличении расстояния между ним и электропоездом. Экспериментальные данные показали, что на частотах, когда длина волны соизмерима или превышает высоту акустического экрана, его шумозащитные свойства существенно уменьшались. Поэтому на низких звуковых частотах для оценки уровней шумового поля на примыкающей территории следует измерять как уровень звукового давления, так и уровни составляющих колебательной скорости.

С. Измерение шума инфразвукового диапазона частот

В действующих санитарных нормах для инфразвукового диапазона частот нормируемым параметром является уровень звукового давления в октавных частот-

ных полосах. При этом не учитывается, что реакция отдельных органов человека на акустические воздействия определяется не только уровнем звукового давления, но и градиентом давления, когда связь между звуковым давлением и колебательной скоростью частиц среды не является однозначной. Особенно это касается низкочастотных шумов аэро- или гидродинамического происхождения, таких как шум в узком участке тоннеля метрополитена при движении по нему поезда или на станциях метро, шум реактивных и винтовых двигателей и т.п. [1] В этом случае средства измерений, реагирующие на градиент звукового давления, или колебательную скорость, будут регистрировать уровни на 20–40 дБ больше, чем уровень звукового давления в волне. В замкнутых объемах существует возможность возникновения стоячих и близких к ним инфразвуковых волн, поэтому необходимо учитывать, что сильное воздействие на организм и измерительные приборы может происходить в той области пространства, где измеренное значение звукового давления близко к нулю, но наблюдается пучность градиента звукового давления (колебательной скорости частиц среды). Аналогичные явления могут наблюдаться, когда исследуемая область находится в ближней зоне излучателя шума, которая для низких частот составляет десятки и сотни метров.

Д. Измерение уровней шума системы охлаждения суперкомпьютера

Хотя размеры суперкомпьютеров заметно уменьшаются, они по-прежнему требуют мощных систем охлаждения, которые и являются основными источниками шума суперкомпьютера. Как правило, в качестве систем охлаждения используются специальные блоки (чиллеры), установленные на улице на достаточно удаленном расстоянии от здания за пределами рабочих помещений и имеющие стандартные размеры (12x1,5x3) м³. Уровни постоянного широкополосного шума звукового давления в октавных полосах как на территории, прилегающей к рабочему корпусу, так и уровни шума, проникающего в здание, не должны превышать регламентируемых значений.

Были проведены измерения уровней шума рабочих блоков охлаждения суперкомпьютеров в летний и зимний периоды года. Как показали измерения, частотный диапазон излучаемого системой охлаждения шума находится в диапазоне от 20 до 6000 Гц с выступающими на 10–15 дБ дискретными пиками на частотах 30, 50, 100, 250, 740 Гц. Уровни звукового давления как с фронтальной, так и с торцевой сторон блоков охлаждения, по мере удаления от них уменьшаются, и на расстояниях 20–30 м составляет 66–67 дБА в летний период и 61–63 дБА в зимний период. Таким образом, в зимний период при наличии снежного покрова возникает дополнительное затухание уровня звукового давления примерно на 4–5 дБА. Наблюдается неоднородность излучения уровня шума, которая на расстоянии 2–3 м с фронтальной стороны блоков охлаждения в области забора воздуха составила 3 дБА, с противоположной стороны — 2 дБА, с торцевых сторон блоков системы охлаждения — 3 дБА. По мере удаления от блоков системы охлаждения неоднородность звукового поля со всех сторон уменьшается и на расстоянии примерно 12–14 м уже отсутствует. Таким образом, на прилегающей территории наблюдалось превышение измеренных уровней шума блоков системы охлаждения относительно допустимых уровней звукового давления. В целях уменьшения уровня шумности, требуется дальнейший анализ векторно-фазовой структуры шумового поля систем охлаждения.

Е. Измерение наземных локальных низкочастотных источников шума

В целях исследования возможностей использования векторно-фазовых методов для решения задач регистрации и локализации наземных низкочастотных источников шума была проведена серия экспериментов по регистрации и пеленгованию сигналов от импульсных источников взрывного типа [6]. В качестве источников сигналов использовались выстрелы наземных артиллерийских орудий, а также разрывы снарядов на полигоне в летнее время. Приемная система состояла

из двух комбинированных модулей, разнесенных между собой на расстояние 300 м. Каждый модуль состоял из двух векторных приемников (ВП) и датчика давления. Один из ВП в каждом приемном модуле размещался в воздухе, второй был присыпан грунтом. При выстреле из орудий должно регистрироваться три вида сигналов. В момент вылета снаряда из ствола возникает импульсная волна, называемая «дульной»; снаряд, вылетающий из ствола орудия со сверхзвуковой скоростью, порождает «баллистическую» волну; третий импульсный сигнал возникает спустя достаточно большое время в области разрыва снарядов. В реальном эксперименте количество регистрируемых импульсов может оказаться существенно больше, из-за многолучевого распространения, связанного с вертикальной стратификацией атмосферы, наличия ветра, неровностей земной поверхности и других причин. Полученные результаты измерений позволили сделать выводы о формировании и распространении реальных акустических и сейсмических низкочастотных импульсных сигналов. Так сигналы, регистрируемые ВП, расположенным в земле, содержат больше высокочастотных составляющих, а уровни регистрируемых сигналов выстрела и разрыва (особенно, в случае «затяжных» во времени сигналов) часто существенно выше, чем регистрируемые аналогичным ВП, размещенным в воздухе. Последнее свидетельствует о том, что во многих случаях «затяжной» характер сигналов связан с интенсивным взаимодействием возбужденной выстрелом волны с землей, многократными переотражениями этих сигналов и возбуждением наведенных сейсмоакустических волн. Несмотря на это, информация, снимаемая с каналов ВП, позволяет получить данные о пространственном распределении сигналов. Сигналы, зарегистрированные разнесенными приемными модулями, использовались для определения местоположения источника методом триангуляции.

2. ГРАДУИРОВКА ЗВУКОПРИЕМНИКОВ ГРАДИЕНТА ДАВЛЕНИЯ

А. Градуировка векторных приемников на установках кафедры акустики

Внедрение в практику аэроакустических измерений приемников градиента давления (ПГД) ставит задачу метрологического обеспечения таких измерений. На кафедре акустики были разработаны методики и созданы установки для градуировки таких приемников. Ввиду отсутствия специальных стандартов, касающихся ПГД, для определения их чувствительности в основном используется метод сравнения при использовании образцового приемника звукового давления и нахождения теоретической зависимости между компонентами звукового поля в условиях проведения градуировки.

В рамках договора о сотрудничестве МГУ-ЗИЛ [7] были разработаны методы градуировки ПГД в ближнем

поле в звукозаглушенной камере в различных диапазонах частот (Захаров Л. Н., Иванников А. Н., и др.). Особенность этих методов состоит в том, что при сопоставлении сигналов с ПГД и приемника звукового давления необходимо учитывать поправку на сферичность волны, которая зависит от типа излучателя и горизонтального расстояния между звукоприемниками и излучателем с учетом определения положения его акустического центра. Методики градуировки в звукозаглушенной камере физического факультета МГУ позволили градуировать ПГД как в низкочастотном 10–600 Гц, так и инфразвуковым диапазонах частот 5–10 Гц с точностью $\pm 1,2$ дБ.

Большой практический интерес представляет методика градуировки ПГД в ближнем поле на воздухе непосредственно в реальном рабочем помещении, наполненном стеллажами, столами, шкафами и т.д. [8]. В этом случае необходимо учесть поправку, обусловленную несовпадением в ближнем поле акустического центра звукоприемника с его геометрическим центром. Предложенная методика градуировки ПГД в «неприспособленном» помещении обеспечивает общую погрешность определения его чувствительности не хуже $\pm 1,5$ дБ, а измерение фазовой характеристики в исследуемом диапазоне частот $\pm 10^0$.

На кафедре акустики были созданы две уникальные установки [9] для градуировки векторных приёмников в диапазоне 2–500 Гц в вертикальном столбе колеблющейся жидкости с погрешностью не более 0,5 дБ, которая была метрологически аттестована, и в диапазоне 250–10000 Гц в незаглушённом гидроакустическом бассейне с погрешностью не более 1 дБ.

В. Работа в звукозаглушенной камере

В звукозаглушенной камере проводилась работа сотрудниками кафедры как по градуировке приемника градиента давления, так и настройке пятиэлементной приемной антенны, каждый комбинированной модуль которой состоял из приемника давления и трехкомпонентного векторного приемника. Разработанная

методика потом успешно использовалась при работе с комбинированной приемной антенной в морских условиях. Интересно отметить, что в этих же работах в звукозаглушенной камере на низких звуковых частотах впервые был опробован метод определения характеристики направленности сложных шумовых излучателей в любой наперед заданной плоскости, основываясь на однократном взятии на контрольной поверхности многокомпонентной выборки параметров поля давления и градиента давления и последующем ее расчете на РС, при использовании интегральной теоремы Гельмгольца [10].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Важным вопросом в предотвращении роста негативного воздействия шумового загрязнения, особенно на низких и инфразвуковых частотах, является разработка нормативных документов, включающих как данные акустического поля звукового давления, так и колебательной скорости частиц среды. Это связано с тем, что для полной характеристики акустического поля необходимо измерение двух его параметров — акустического давления (скалярный параметр) и градиента звукового давления, или колебательной скорости частиц среды (векторный параметр). Проводимые в последние годы сотрудниками кафедры работы по изучению «шумового загрязнения» территорий жилой застройки, находящихся вблизи железных дорог и трамвайных путей, а так же экспериментальные исследования звукового поля локальных шумовых зон подтверждают важность таких измерений. При этом на низких частотах при нормировании допустимых уровней шумового поля в помещениях жилых и общественных зданиях следует учитывать не только уровень проникающего шума, но и величину структурного шума. Внедрение в практику аэроакустических измерений приемников градиента давления по-прежнему делает задачу, проводимую на кафедре акустике по разработке методик для их градуировки, актуальной.

-
- [1] Кафедра акустики сегодня. К 70-летию кафедры акустики физического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова. Отв. редактор О. А. Сапожников. (М.: Физический факультет МГУ, 2013).
- [2] Wen Dong Zhang, Ling Gang Guan, Guo Jun Zhang, Chen Yang Xue, Kai Rui Zhan, Jian Ping Wang. *Sensors*. № 9. P. 6823. (2009). URL: www.mdpi.com/journal/sensors.
- [3] Департамент природопользования и охраны окружающей среды города Москвы «Доклад о состоянии окружающей среды в городе Москве в 2013 году». (М., 2013).
- [4] Гончаренко Б.И. Мир измерений. 2010. № 4. С. 6.
- [5] Гончаренко Б.И., Р.А. Миронов Р.А. Сб. трудов XX сессии РАО, Москва. 3. С. 206. (2008).
- [6] Гончаренко Б.И., Гордиенко В.А., Камышев В.В. Сборник докладов научной конференции «Ломоносовские чтения-2011. Секция Физика». МГУ. С. 29.
- [7] Кафедре акустики физического факультета 60 лет. Отв. редактор В.А. Гордиенко. (М.: Физический факультет МГУ, 2003).
- [8] Гончаренко Б.И., Гордиенко В.А. Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. № 1. С. 40. (2006).
- [9] Гончаренко Б.И., Гордиенко В.А., Ермолаева Е.О. Сб. трудов XXII сессии РАО, Москва. 2. С. 267. (2010).
- [10] Ermolaeva E.O. Goncharenko B.I., Gordienko V.A. *Proceeding of Forum Acusticum*. Budapest, Hungary. P. 23. (2005).

The specificity of measurements at low sound frequencies in aeroacoustics

B. I. Goncharenko^a, E. O. Ermolaeva^b

Department of acoustics, Faculty of Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia
E-mail: ^agon-boris@yandex.ru, ^beoermolaeva@yandex.ru

Studies of «the noise pollution» of territories which are located near the railroads and street railways, and also experimental studies of sound fields of local noise zones (race track, airport, gunnery range) which were carried out by the acoustics department employees in recent years confirm a necessity of rationing both levels of sound pressure, and oscillatory velocity of substance particles for control of noise levels at low sound frequencies. Methods of calibration in near field of pressure gradient receivers at the anechoic chamber and ordinary room are discussed.

PACS: 43.60.+d, 43.58.+z

Keywords: levels of sound pressure and oscillatory speed, receiver of sound pressure gradient, vector receiver, calibration of sound receivers, measurements at low sound frequencies, noise of transport.

Received 13.11.2014.

Сведения об авторах

1. Гончаренко Борис Иванович — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник; тел.: (495) 939-29-69, e-mail: gon-boris@yandex.ru.
2. Ермолаева Елена Олеговна — ведущий инженер; тел.: (495) 939-29-69, e-mail: eoermolaeva@yandex.ru.