ЧЕБЫШЕВСКИЙ СБОРНИК
Том 23. Выпуск 4.

УДК 51-76 DOI 10.22405/2226-8383-2022-23-4-188-197

О применении математического метода анализа размерностей к тесту шестиминутной ходьбы

А. В. Волков, Е. В. Березина, А. С. Парфенов, Т. В. Михайловская, И. Е. Мишина, А А. Е. Гвоздев

Волков Алексей Владимирович — кандидат технических наук, Ивановская государственная медицинская академия (г. Иваново).
e-mail: doc71@mail.ru
Березина Елена Владимировна — доктор технических наук, Ивановская государственная медицинская академия (г. Иваново).
e-mail: elena_berezina@mail.ru
Парфенов Александр Сергеевич — Ивановская государственная медицинская академия (г. Иваново).
e-mail: alsparf@gmail.com
Михайловская Татьяна Валентиновна — кандидат медицинских наук, Ивановская государственная медицинская академия (г. Иваново).
e-mail: tanyadoc8484@mail.ru
Мишина Ирина Евгеньевна — доктор медицинских наук, Ивановская государственная медицинская академия (г. Иваново).
e-mail: mishina-irina@mail.ru
Гвоздев Александр Евгеньевич — доктор технических наук, профессор, Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого (г. Тула).
e-mail: gwozdew.alexandr2013@yandex.ru

Аннотация

Тест с шестиминутной ходьбой (ТШХ) является одним из простых и доступных методов оценки толерантности к физической нагрузке. Вместе с тем до конца еще не изучены вопросы представления и интерпретации его результатов.

Известно, что в случае отсутствия формальных законов явления, может быть применен метод анализа размерности. Этот метод, впервые предложенный Фурье и развитый в работах Рэлея, Прандтля, Бакингема и др., довольно успешно применяется в физике, химии, технике, экономике и крайне редко в биологии и медицине.

Суть метода заключается в том, что зависимая величина представляется в виде набора независимых (или слабозависимых) друг от друга переменных. В данной работе представлена общая модель зависимости пройденного человеком расстояния R от 8 переменных: параметров человека (масса, рост, параметр толерантности), времени и характеристик среды (потенциал гравитации, плотность и вязкость воздуха, коэффициент трения покоя подошвы с поверхностью). К общей модели были применены две основные теоремы метода анализа размерностей: теорема о размерности величины и теорема Бакингема (о поиске числа безразмерных комплексов). Трудности, связанные с исследованием общей модели не позволяют формировать зависимости от других величин, которые в эксперименте варьировать значительно сложнее, чем другие, например, управлять плотностью и вязкостью среды, гравитационным потенциалом Земли.

Показана возможность редукции числа переменных модели и формирование системы новых, более простых моделей, которые позволяют явно описывать процесс движения от

всех переменных. В модели введен латентный параметр – степень толерантности человека к движению, который предложено характеризовать как энергетический параметр. Предложен метод его количественной оценки и сравнение людей по этому параметру. С точки зрения оценки динамики изменения толерантности к движению необходимо далее изучать зависимость этого параметра от времени.

Ключевые слова: ТШХ, размерность, модель, оценка латентных параметров.

Библиография: 16 названий.

Для цитирования:
А. В. Волков, Е. В. Березина, А. С. Парфенов, Т. В. Михайловская, И. Е. Мишина, А. Е. Гвоздев. О применении математического метода анализа размерностей к тесту шестиминутной ходьбы // Чебышевский сборник, 2022, т. 23, вып. 4, с. 188–197.

CHEBYSHEVSKII SBORNIK
Vol. 23. No. 4.

UDC 51-76 DOI 10.22405/2226-8383-2022-23-4-188-197

On the application of the mathematical method of dimensional analysis to the six-minute walk test

A. V. Volkov, E. V. Berezina, A. S. Parfenov, T. V. Mikhailovskaia, I. E. Mishina, A. E. Gvozdev

Volkov Alexey Vladimirovich — candidate of technical sciences, Ivanovo State Medical Academy (Ivanovo).
e-mail: doc71@mail.ru
Berezina Elena Vladimirovna — doctor of technical sciences, Ivanovo State Medical Academy (Ivanovo).
e-mail: elena_berezina@mail.ru
Parfenov Alexander Sergeevich — Ivanovo State Medical Academy (Ivanovo).
e-mail: alsparf@gmail.com
Mikhailovskaia Tatiana Valentinovna — candidate of medical sciences, Ivanovo State Medical Academy (Ivanovo).
e-mail: tanyadoc8484@mail.ru
Mishina Irina Evgen'evna — doctor of medical sciences, Ivanovo State Medical Academy (Ivanovo).
e-mail: mishina-irina@mail.ru
Gvozdev Alexander Evgen'evich — doctor of engineering, professor, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University (Tula).
e-mail: gwozdew.alexandr2013@yandex.ru

Abstract

The six-minute walk test (SMWT) is one of the simplest and most widely available methods of assessing exercise tolerance. At the same time, the issues of presentation and interpretation of its results have not been fully studied yet.

It is known that in the case of unavailability of formal laws of the phenomenon, the method of dimensional analysis can be applied. This method, first proposed by Fourier and developed in the works of Rayleigh, Prandtl, Buckingham and others, is quite successfully used in physics, chemistry, engineering, economics and very rarely in biology and medicine.

The essence of the method is that the dependent variable is represented as a set of variables that are independent (or weakly dependent) on each other. This paper presents a general model of the dependence of the distance R traveled by a person on 8 variables: human parameters (mass, height, tolerance parameter), time and environmental characteristics (gravity potential, air density and viscosity, the coefficient of friction of the sole with the surface). Two basic theorems of the dimensionality analysis method were applied to the general model: the dimensionality theorem of the quantity and Buckingham's theorem (about finding the number of dimensionless complexes). Difficulties associated with the study of the general model do not allow us to form dependences on other quantities, which are much more difficult to vary in the experiment than others, for example, to control the density and viscosity of the medium, the gravitational potential of the Earth.

The possibility of reducing the number of model variables and forming a system of new, simpler models that allow explicit description of the motion process from all variables is shown. A latent parameter is introduced into the model, i.e. a degree of tolerance of a person to motion which it is offered to characterize as an energy parameter. A method for its quantitative estimation and comparison of people by this parameter is proposed. In terms of assessing the dynamics of change in motion tolerance, it is necessary to further study the dependence of this parameter on time.

Keywords: SMWT, dimensionality, model, latent parameter estimation.

Bibliography: 16 titles.

For citation:
A. V. Volkov, E. V. Berezina, A. S. Parfenov, T. V. Mikhailovskaia, I. E. Mishina, A. E. Gvozdev, 2022, "On the application of the mathematical method of dimensional analysis to the six-minute walk test" , *Chebyshevskii sbornik*, vol. 23, no. 4, pp. 188–197.

1. Введение

Тест с шестиминутной ходьбой (ТШХ) является одним из простых и доступных методов оценки толерантности к физической нагрузке. Первоначально производилась оценка расстояния, пройденного пациентом в течение 6 минут, и результаты учитывались при оценке функционального класса хронической сердечной недостаточности, функционального класса ишемической болезни сердца [1] прогнозирования неблагоприятного исхода сердечно-сосудистых заболеваний [2, 3]. В дальнейшем были предложены формулы для расчета должных значений пройденного расстояния у взрослых здоровых лиц [4, 5, 7] и результаты ТШХ оценивались как процент от должного значения.

Вместе с тем до конца не изучены вопросы представления и интерпретации результатов теста [8]. До сих пор остается неясным, каким образом следует оценивать результаты ТШХ, какой прирост дистанции может быть оценен как оптимальный и каким способом следует отражать результаты ТШХ в протоколе исследования. Еще менее исследованы проблемы, касающиеся оценки динамически результатов ТШХ у одного и того же пациента, например, при проведении реабилитационных программ.

В случае, когда отсутствуют формальные законы, регулирующие процесс, может быть применен метод анализа размерностей, успешно используемый при исследовании явлений физики, химии, техники, но при рассмотрении живых систем (в биологии и, особенно, медицине) он применяется крайне редко. Одним из примеров применения в медицине можно привести использование данного алгоритма для анализа систолического/диастолического давления и ударного объема в сердечно-сосудистой системе [12, 13].

Первые идеи, предсказывающие метод размерного анализа, предложил Фурье, введя термин "размерная однородность физических уравнений"в 1822 году [6]. Первым человеком, применившим эти идеи, был лорд Рэлей в серии своих работ, опубликованных в 70-х и 80-х го-

дах 19 века; его исследования особенно касались процессов течения жидкости. Исследование вязкости жидкости, основанное на размерном анализе (тогда еще не совсем формализованном), также проводилось Прандтлем в первом десятилетии 20-го века. Бакингем, доказал, что уменьшение сложности задачи возможно в виде безразмерных параметров [10, 14].

2. Основной текст статьи

Задача моделирования на первом этапе состоит в том, чтобы как можно полнее задать параметры, определяющие исследуемый процесс. Полнота набора параметров может иметь решающее значение, поскольку это влияет на качество конечного результата. Основная особенность метода позволяет получить существенные знания о зависимости процесса от заданных параметров, исключая при этом необходимость использования сложных, например, дифференциальных уравнений.

Кроме того, он может быть использован для уменьшения числа параметров (часто значительного). Когда метод дополняется разумным числом экспериментальных значений, можно получить явную форму функции - точное или почти точное описание процесса.

Суть метода заключается в том, чтобы представить зависимую величину от других, которые не зависят или слабо зависят друг от друга в некотором диапазоне внешних факторов явления. Это необходимо для того, чтобы провести исследование данной зависимой величины от другой при фиксированных значениях всех остальных.

Само понятие размерности связано с выбором системы основных размерностей. Размерность – качественная характеристика величины, в которых ее значения могут измеряться в разных единицах. Например, размерность длины обозначается как L, а единицами измерения длины могут быть метры, километры, сантиметры, микрометры и т.п. Остальные размерности выражаются через систему основных размерностей, либо через законы, либо через определения этих величин. Например, размерность скорости (обозначается как $[v]$) может быть выражена как отношение размерности длины (L) к размерности времени (T), а именно: $[v] = L \cdot T^{-1}$. Главное в системе основных размерностей – их независимость друг от друга. Другими словами, масса, например, в описанном процессе не должна измеряться ни в единицах длины, ни в единицах времени [11].

В данной работе мы будем использовать привычную в физике систему основных размерностей: M – размерность массы, L – размерность длины, T – размерность времени.

В начале построения более полной модели для ТШХ принимаем, что пройденный человеком путь R можно представить в виде набора независимых размерных величин:

$$R = f\,(t,\ g,\ m,\ h,\ \rho,\ \mu,\ \varepsilon, k) \tag{1}$$

где t - время движения, g - ускорение свободного падения (характеристика потенциала гравитации планеты), m- масса человека, h - длина ног (или рост человека). Далее идут характеристики среды, в которой движется человек: ρ – плотность среды, μ – кинематическая вязкость среды, k - коэффициент трения покоя подошвы обуви и поверхности движения.

В модель введен некоторый параметр ε, который в ТШХ имеет смысл параметра толерантности к физической нагрузке. С точки зрения размерности будем интерпретировать этот параметр как некоторую характеристику энергетического потенциала человека - величину, которая определяет его энергопотенциал выполнять движение. Это латентный параметр, который проявляет себя в некотором спектре действий жизнедеятельности человека, например, при ходьбе.

Первая теорема анализа размерностей утверждает, что размерность любой величины $[\alpha]$ в системе основных размерностей M, L, T имеет степенной вид:

$$[\alpha] = M^m \cdot L^l \cdot T^t \tag{2}$$

Согласно первой теореме анализа размерностей представим величины модели (1) в системе M, L, T в виде таблицы:

Таблица 1: Размерности параметров модели (1) в системе основных размерностей M, L, T

Величина a	Размерность [a]
R	L
t	T
g	$L \cdot T^{-2}$
m	M
h	L
ρ	$M \cdot L^{-3}$
μ	$M \cdot L^{-1} \cdot T^{-1}$
ε	$M \cdot L^2 \cdot T^{-2}$
k	$M^0 \cdot L^0 \cdot T^0$

Вторая теорема анализа размерностей (ее называют π-теоремой или теоремой Бакингема) утверждает, что любое количественное соотношение между различными величинами может быть представлено в виде функциональной связи между безразмерными комбинациями этих величин [14].

В соответствии с этой теоремой, решая систему трех линейных уравнений (по числу основных размерностей) с девятью неизвестными (по числу величин в формуле (1) и с учетом безразмерности k), найдем основные безразмерные комплексы. Число этих комплексов равно шести:

$$\pi_1 = \frac{R}{h}, \pi_2 = \frac{m}{\rho \cdot h^3}, \pi_3 = \frac{g \cdot t^2}{h}, \pi_4 = \frac{\rho \cdot h^2}{\mu \cdot t}, \pi_5 = \frac{\varepsilon \cdot t}{\mu \cdot h^3}, \pi_6 = k \tag{3}$$

Теорема Бакингема утверждает, что зависимость (1) теперь можно представить иначе:

$$\pi_1 = \varphi(\pi_2,\ \pi_3,\ \pi_4,\ \pi_5, \pi_6), \tag{4}$$

Подставив π_1 в это выражение и выразив R, получим:

$$R = \ h \cdot \varphi(\pi_2,\ \pi_3,\ \pi_4,\ \pi_5,\ \pi_6) \tag{5}$$

Уравнение (5) показывает, что, как и указывалось выше, произошла редукция числа переменных: вместо восьми величин можно исследовать зависимость R от пяти безразмерных комплексов.

Как правило, в очень сложных процессах, зависящих от многих параметров, где взаимная зависимость может быть (и обычно является) относительно неясной, исследование с помощью размерного анализа может не дать когнитивно значимых результатов. Этот вывод и подтверждает уравнение (5).

В этом случае прибегают к разного рода упрощениям: сокращению числа переменных в уравнении (1), исходя из некоторых физических соображений, и/или объединению некоторых переменных в один, часто используемый в исследованиях параметр.

Например, можно было бы предположить, что при небольших значениях параметра ε, небольших скоростях движения, наиболее существенную роль в модели может играть вязкость среды, а не ее плотность. Кроме того, часто в подобных исследованиях используют

параметр, который называется индекс массы человека. Но разумнее с учетом тяжести планеты (в данном случае Земли) ввести индекс веса человека, который объединяет массу, рост и ускорение свободного падения планеты в виде:

$$I = \frac{m \cdot g}{h^2} \tag{6}$$

Тогда в выражении (1) можно уменьшить число переменных и записать их:

$$R = f(t, I,\ \mu, k, \varepsilon) \tag{7}$$

где I – индекс веса человека, с размерностью: $M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}$. В этом случае число безразмерных комплексов снижается до трех:

$$\pi_1 = R\sqrt[3]{\frac{\mu}{t\varepsilon}}, \pi_2 = \frac{\mathrm{It}}{\mu}, \pi_3 = k \tag{8}$$

Применяя теорему Бакингема, получим:

$$R = \sqrt[3]{\frac{\mathrm{t}\varepsilon}{\mu}}\ \cdot \varphi\left(\frac{\mathrm{It}}{\mu}, k\right), \tag{9}$$

где φ - неопределенная функция от комплекса π_2 и k.

Далее следует исследование функции (9). Например, можно поставить эксперимент по изучению зависимости R от индекса веса человека (при фиксированном времени t = 6 мин) или измерить пройденный путь в зависимости от времени (при всех остальных постоянных величинах в (7)). Интересный вывод уже следует из соотношения (9), а именно: пройденное расстояние зависит как корень кубический из параметра толерантности . Этот вывод, конечно, требует дополнительной экспериментальной проверки.

До получения экспериментальных данных можно предположить, что в ТШХ пройденный путь обратно пропорционален индексу веса I. Гипотеза вполне разумная: чем больше индекс веса человека, тем сложнее ему двигаться и проходить большее расстояние. В этом случае функция φ в (9) примет вид:

$$\varphi\left(\frac{\mathrm{It}}{\mu}\right) = A(k) \cdot \frac{\mu}{\mathrm{It}}, \tag{10}$$

где $A(k)$ – функция, зависящая от k.

Получить зависимость $A(k)$ можно экспериментально, варьируя коэффициент трения с поверхностью.

С учетом (10) выражение (9) преобразуется к виду:

$$R = A(k) \cdot \sqrt[3]{\frac{\mu^2\varepsilon}{t^2}}\ \cdot \frac{1}{I} \tag{11}$$

Полученная зависимость (11) носит явно противоречивый характер по другим переменным. А именно: из (11) следует, что с увеличением времени процесса пройденный путь уменьшается, а с увеличением вязкости среды он увеличивается. Такой результат уже до проведения эксперимента противоречит здравому смыслу. Вывод: гипотеза (10) не справедлива.

Предположим теперь, что функция φ в (9) носит степенной характер по π_2:

$$\varphi\left(\frac{\mathrm{It}}{\mu}\right) = \ A(k) \cdot \left(\frac{\mu}{\mathrm{It}}\right)^n \tag{12}$$

Подставив (12) в (9), получим

$$R = A(k) \cdot \sqrt[3]{\frac{\mathrm{t}\varepsilon}{\mu}} \cdot \left(\frac{\mu}{\mathrm{It}}\right)^n \tag{13}$$

Собрав показатели степеней одинаковых переменных в (13), получим:

$$R = A(k) \cdot \sqrt[3]{\varepsilon} \cdot \frac{t^{\frac{1-3n}{3}} \cdot \mu^{\frac{3n-1}{3}}}{I^n} \tag{14}$$

С точки зрения физики процесса движения, ясно, что для того, чтобы функция R в выражении (14) с течением времени увеличивала пройденное расстояние, а с увеличением вязкости среды уменьшало его, необходимо, чтобы n удовлетворяло условию:

$$0 < n < \frac{1}{3} \tag{15}$$

Пусть, например, $n = 1/4$, тогда (14) будет иметь вид:

$$R = A(k) \cdot \frac{\sqrt[3]{\varepsilon}}{\sqrt[4]{I}} \sqrt[12]{\frac{t}{\mu}} \tag{16}$$

Зависимость (16) можно проверить экспериментально. Для этого нужно, например, провести испытания, в которых можно регулировать некоторые параметры модели. А именно, можно провести исследование по увеличению индекса веса человека, нагружая человека предметами известной массы. В этом случае, как показывает уравнение (16), увеличение массы человека в 2 раза приведет к уменьшению пройденного им расстояния примерно в 1,2 раза. Можно также проверить зависимость R от времени t, коэффициента трения с поверхностью k. В любом случае, если закономерность (16) не подтвердится, то следует либо поменять степенной закон в (12), либо скорректировать модель введением новых параметров процесса.

Представленный выше принцип формирования модели может дать оценку латентному параметру ε. Для этого необходимо, согласно правилу Эйнштейна [6], принять в (16) $A(k) \cdot \sqrt[12]{\frac{t}{\mu}} = 1$. Учитывая это и логарифмируя левую и правую части уравнения (16), переходим к логарифмическим масштабам вида:

$$lnR = -\frac{1}{4}\mathrm{lnI} + \frac{1}{3}\ln\varepsilon \tag{17}$$

Далее строим линейную зависимость $lnR = f(lnI)$, см. рис. 1.

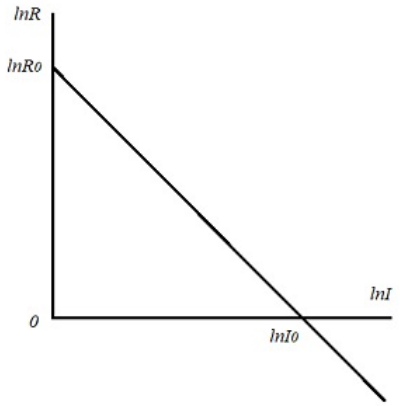

Рис. 1: Зависимость $lnR = f(lnI)$

Экстраполируя зависимость (17) на ось lnR при $lnI = 0$, получим значение, равное:

$$\frac{1}{3}\ln\varepsilon = \ln R_0 \tag{18}$$

Рассчитывая значение lnR_0 по графику, из формулы (18) находим оценку параметра ε:

$$\varepsilon \sim R_0^3 \tag{19}$$

В соответствии с (19) можно будет рассчитать этот параметр и численно сравнивать людей по уровню готовности к выполнению подобных тестовых упражнений.

Повышение этого параметра со временем может свидетельствовать об оздоровительном эффекте теста, а понижение – о том, что организм человека не приспособился к новым условиям и требуется еще более длительная адаптация к новым нагрузкам.

Как правило, в очень сложных процессах, зависящих от многих параметров, где взаимная зависимость может быть (и обычно является) относительно неясной (т. е. когда трудно с абсолютной уверенностью различать размерно независимые повторяющиеся переменные), редукция с помощью размерного анализа может не дать когнитивно значимых результатов. Такое умение исследователя, как сокращение переменных или их объединение в другие размерные величины, становится некоторым искусством, которое поддерживается его интуицией и собственным опытом.

Неэффективное сокращение числа переменных не единственный недостаток анализа размерности. Другим недостатком является отсутствие дискриминации векторных и скалярных величин, что на практике также может привести к ненужному увеличению числа новых параметров [15]. Эти недостатки размерного анализа являются причиной того, что методу часто помогают другие методы, причем статистические методы являются одними из наиболее популярных [16].

3. Заключение

1. Ввиду отсутствия формальных законов, регулирующих процесс ходьбы, был применен математический метод анализа размеренностей.

2. Анализ размерностей может найти применение в медицине, особенно при проведении исследований на больших группах людей.

3. При использовании анализа размерностей важно учитывать существенные параметры процесса, которые приводят к упрощению моделей, а именно к уменьшению числа безразмерных величин.

4. Важным результатом метода является возможность оценки некоторых латентных параметров процесса. В случае теста ТШХ – оценка параметра толерантности человека к физической нагрузке (ε)

Размерный анализ может служить аналитическим инструментом в медицинских науках, в первую очередь на этапе моделирования сложных процессов. Это позволяет исследователю извлекать важные параметры для создаваемой модели. Разработка полной аналитической модели обычно требует дополнительных экспериментов и взаимодействия с экспертами в различных областях.

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аронов Д., М., Бубнова М., Г., Барбараш О., Л., Долецкий А., А., Красницкий В., Б., Лебедева Е., В., Лямина Н., П., Репин А., Н., Свет А., В., Чумакова Г., А. Острый инфаркт миокарда с подъемом сегмента ST электрокардиограммы: реабилитация и вторичная профилактика. Российские клинические рекомендации // CardioСоматика 2014 №1. С. 5-41.

2. Arslan S. et al. Prognostic value of 6-minute walk test in stable outpatients with heart failure. // Texas Hear. Inst. J. 2007. Vol. 34, № 2. P. 166–169.

3. Curtis J.P. et al. The association of 6-minute walk performance and outcomes in stable outpatients with heart failure. // J. Card. Fail. 2004. Vol. 10, № 1. P. 9–14.

4. Enright P.L., Sherrill D.L. Reference equations for the six-minute walk in healthy adults. // Am. J. Respir. Crit. Care Med. 1998. Vol. 158, № 5 Pt 1. P. 1384–1387.

5. Troosters T., Gosselink R., Decramer M. Six minute walking distance in healthy elderly subjects. // Eur. Respir. J. 1999. Vol. 14, № 2. P. 270–274.

6. Gibbings J.C. Dimensional analysis // Dimensional Analysis. London: Springer London, 2011. 1–297 p.

7. Gibbons W.J. et al. Reference values for a multiple repetition 6-minute walk test in healthy adults older than 20 years. // J. Cardiopulm. Rehabil. Vol. 21, № 2. P. 87–93.

8. Mikhailovskaya T. V. et al. Methods of Evaluation of Tolerance yo Physical Activity Based on Six-Minute Walking Test During Outpatient Rehabilitation of Patients with Ischemic Heart Disease // Phys. Rehabil. Med. Med. Rehabil. 2021. Vol. 3, № 1. P. 4–10.

9. Langhaar H.L. Dimensional Analysis and Theory of Models. New York: John Wiley & Son Ltd, 1951. 166 p.

10. Kowalewski W. et al. Perspective of Dimensional Analysis in Medical Science // Stud. Logic, Gramm. Rhetor. 2017. Vol. 51, № 1. P. 19–37.

11. Уздин В.М. Математическое моделирование. Метод анализа размерности. Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2019. 28 p.

12. Stergiopulos N., Meister J.J., Westerhof N. Determinants of stroke volume and systolic and diastolic aortic pressure. // Am. J. Physiol. 1996. Vol. 270, № 6 Pt 2. P. H2050-9.

13. Westerhof N., Stergiopulos N., Noble M.I.M. Snapshots of Hemodynamics // Snapshots of Hemodynamics. Boston, MA: Springer US, 2010.

14. Buckingham E. On physically similar systems; Illustrations of the use of dimensional equations // Phys. Rev. 1914. Vol. 4, № 4. P. 345–376.

15. Madrid C.N., Alhama F. Discrimination: A fundamental and necessary extension of classical dimensional analysis theory // Int. Commun. Heat Mass Transf. 2006. Vol. 33, № 3. P. 287–294.

16. Rajan K., Suh C., Mendez P.F. Principal component analysis and dimensional analysis as materials informatics tools to reduce dimensionality in materials science and engineering // Stat. Anal. Data Min. ASA Data Sci. J. 2009. Vol. 1, № 6. P. 361–371.

REFERENCES

1. Аронов Д., М., Бубнова М., Г., Барбараш О., Л., Долецкий А., А., Красницкий В., Б., Лебедева Е., В., Лямина Н., П., Репин А., Н., Свет А., В., Чумакова Г., А. Острый инфаркт миокарда с подъемом сегмента ST электрокардиограммы: реабилитация и вторичная профилактика. Российские клинические рекомендации // CardioСоматика 2014 №1. С. 5-41.

2. Arslan S. et al. Prognostic value of 6-minute walk test in stable outpatients with heart failure. // Texas Hear. Inst. J. 2007. Vol. 34, № 2. P. 166–169.

3. Curtis J.P. et al. The association of 6-minute walk performance and outcomes in stable outpatients with heart failure. // J. Card. Fail. 2004. Vol. 10, № 1. P. 9–14.

4. Enright P.L., Sherrill D.L. Reference equations for the six-minute walk in healthy adults. // Am. J. Respir. Crit. Care Med. 1998. Vol. 158, № 5 Pt 1. P. 1384–1387.

5. Troosters T., Gosselink R., Decramer M. Six minute walking distance in healthy elderly subjects. // Eur. Respir. J. 1999. Vol. 14, № 2. P. 270–274.

6. Gibbings J.C. Dimensional analysis // Dimensional Analysis. London: Springer London, 2011. 1–297 p.

7. Gibbons W.J. et al. Reference values for a multiple repetition 6-minute walk test in healthy adults older than 20 years. // J. Cardiopulm. Rehabil. Vol. 21, № 2. P. 87–93.

8. Mikhailovskaya T. V. et al. Methods of Evaluation of Tolerance yo Physical Activity Based on Six-Minute Walking Test During Outpatient Rehabilitation of Patients with Ischemic Heart Disease // Phys. Rehabil. Med. Med. Rehabil. 2021. Vol. 3, № 1. P. 4–10.

9. Langhaar H.L. Dimensional Analysis and Theory of Models. New York: John Wiley & Son Ltd, 1951. 166 p.

10. Kowalewski W. et al. Perspective of Dimensional Analysis in Medical Science // Stud. Logic, Gramm. Rhetor. 2017. Vol. 51, № 1. P. 19–37.

11. Уздин В.М. Математическое моделирование. Метод анализа размерности. Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2019. 28 p.

12. Stergiopulos N., Meister J.J., Westerhof N. Determinants of stroke volume and systolic and diastolic aortic pressure. // Am. J. Physiol. 1996. Vol. 270, № 6 Pt 2. P. H2050-9.

13. Westerhof N., Stergiopulos N., Noble M.I.M. Snapshots of Hemodynamics // Snapshots of Hemodynamics. Boston, MA: Springer US, 2010.

14. Buckingham E. On physically similar systems; Illustrations of the use of dimensional equations // Phys. Rev. 1914. Vol. 4, № 4. P. 345–376.

15. Madrid C.N., Alhama F. Discrimination: A fundamental and necessary extension of classical dimensional analysis theory // Int. Commun. Heat Mass Transf. 2006. Vol. 33, № 3. P. 287–294.

16. Rajan K., Suh C., Mendez P.F. Principal component analysis and dimensional analysis as materials informatics tools to reduce dimensionality in materials science and engineering // Stat. Anal. Data Min. ASA Data Sci. J. 2009. Vol. 1, № 6. P. 361–371.

Получено: 03.10.21
Принято в печать: 8.12.2022