

# Евразийский Союз Ученых. Серия: технические и физико-математические науки

Ежемесячный научный журнал  
№ 6 (131)/2025 Том 1

## ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

**Макаровский Денис Анатольевич**

AuthorID: 559173

Заведующий кафедрой организационного управления Института прикладного анализа поведения и психолого-социальных технологий, практикующий психолог, специалист в сфере управления образованием.

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

- **Штерензон Вера Анатольевна**

AuthorID: 660374

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Институт новых материалов и технологий (Екатеринбург), кандидат технических наук

- **Синьковский Антон Владимирович**

AuthorID: 806157

Московский государственный технологический университет "Станкин", кафедра информационной безопасности (Москва), кандидат технических наук

- **Штерензон Владимир Александрович**

AuthorID: 762704

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Институт фундаментального образования, Кафедра теоретической механики (Екатеринбург), кандидат технических наук

- **Зыков Сергей Арленович**

AuthorID: 9574

Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Отдел теоретической и математической физики, Лаборатория теории нелинейных явлений (Екатеринбург), кандидат физ-мат. наук

- **Дронсейко Виталий Витальевич**

AuthorID: 1051220

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Кафедра "Организация и безопасность движения" (Москва), кандидат технических наук

Статьи, поступающие в редакцию, рецензируются. За достоверность сведений, изложенных в статьях, ответственность несут авторы. Мнение редакции может не совпадать с мнением авторов материалов. При перепечатке ссылка на журнал обязательна. Материалы публикуются в авторской редакции.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.

Художник: Валегин Арсений Петрович  
Верстка: Курпатова Ирина Александровна

Адрес редакции:  
198320, Санкт-Петербург, Город Красное Село, ул. Геологическая, д. 44, к. 1, литера А  
E-mail: [info@euroasia-science.ru](mailto:info@euroasia-science.ru) ;  
[www.euroasia-science.ru](http://www.euroasia-science.ru)

Учредитель и издатель ООО «Логика+»  
Тираж 1000 экз.

# **СОДЕРЖАНИЕ**

## **ФИЗИЧЕСКИЕ НАУКИ**

*Мороков Ю.Н.*

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ В ОБЩЕЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ ..... 3

## **ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ**

*Вялкова Н.С.*

МАЛОЭТАЖНЫЕ ЗДАНИЯ. ВОПРОСЫ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ..... 11

*Костюничев Д.Н., Отделкин Н.С.*

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЫЛЕОБРАЗОВАНИЯ ПРИ ПЕРЕГРУЗКЕ СЫПУЧИХ ГРУЗОВ  
КОНВЕЙЕРНЫМИ И ПНЕВМОТРАНСПОРТНЫМИ УСТАНОВКАМИ ..... 15

*Худолева М. С., Красноштанова А. А.*

ИССЛЕДОВАНИЕ АНТИОКСИДАНТНЫХ И ПРООКСИДАНТНЫХ СВОЙСТВ БЕЛКОВЫХ ГИДРОЛИЗАТОВ  
РЖАНОЙ, НУТОВОЙ И ЛЮПИНОВОЙ МУКИ ..... 20

# ФИЗИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 530.122

## ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ В ОБЩЕЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

**Мороков Ю.Н.**

Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий,  
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 6;  
Новосибирский государственный университет, Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1

### ADDITIONAL CONDITIONS IN GENERAL RELATIVITY

**Yuri N. Morokov**

Federal Research Center for Information and Computational Technologies,  
Novosibirsk, Academician M.A. Lavrentiev avenue, 6, 630090, Novosibirsk, Russia;  
Novosibirsk State University Novosibirsk, Pirogova str., 1, Novosibirsk, 630090, Russia  
DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2025.1.131.2212

#### АННОТАЦИЯ

В общей теории относительности (ОТО) уравнения Эйнштейна-Гильберта позволяют определить только 6 из 10 независимых компонент метрического тензора для физического пространства-времени, а оставшиеся 4 компоненты должны определяться из дополнительных, так называемых координатных условий. Проблема иллюстрируется на примере задачи Шварцшильда - нахождения центрально-симметричного статического гравитационного поля, для которой уравнения Эйнштейна-Гильберта дают метрику, зависящую от двух произвольных функций  $a(r)$  и  $w(r)$ . Произвол в выборе этих функций не связан с выбором координатной системы, поскольку система пространственных координат изначально фиксируется в виде сферической системы координат в гелиоцентрической системе отсчета. Наблюдательным данным соответствует выбор этих функций в виде  $a(r) = 0$  и  $w(r) = r$ , однако, физика, стоящая за выбором природой именно этого варианта метрики, остается неизвестной.

#### ABSTRACT

In the general theory of relativity, the Einstein-Hilbert equations allow one to determine only 6 of the 10 independent components of the metric tensor for physical space-time, while the remaining 4 components must be determined from additional, so-called coordinate conditions. The problem is illustrated by the example of finding a centrally symmetric static gravitational field in a vacuum, for which the Einstein-Hilbert equations give a metric that depends on two arbitrary functions  $a(r)$  and  $w(r)$ . The arbitrariness in the choice of these functions is not related to the choice of the coordinate system, since the spatial coordinate system is initially fixed in the form of a spherical coordinate system in a heliocentric reference system. The observational data correspond to the choice of these functions in the form  $a(r) = 0$  and  $w(r) = r$ . However, the physics behind nature's choice of this variant of the metric remains unknown.

**Ключевые слова:** ОТО, координатные условия, метрика Шварцшильда

**Keywords:** General Relativity, Coordinate Conditions, Schwarzschild metric

#### Введение

В общей теории относительности (ОТО) физическое пространство-время рассматривается как четырехмерное связное многообразие с псевдоримановой метрикой и невырожденным в каждой точке метрическим тензором с сигнатурой  $(+, -, -, -)$ . Физическое пространство-время арифметизуемо, и каждой точке физического пространства-времени можно поставить в соответствие уникальный набор из значений четырех координат  $(x^0, x^1, x^2, x^3)$  в четырехмерном псевдоевклидовом пространстве  $E^4$ , где временная координата  $x^0 = ct$ , а  $c$  - скорость света.

Далее мы фиксируем такое псевдоевклидово пространство  $E^4$  с выбранной нами координатной системой  $(x^0, x^1, x^2, x^3)$  и будем называть это пространство фоновым пространством-временем. Задачи ОТО мы будем рассматривать в этом фоновым пространстве-времени. ОТО не

запрещает нам это делать. Более того, это фоновое пространство-время мы будем ассоциировать с тем плоским пространством-временем Минковского, которое мы используем в повседневной жизни, и которое используется в астрономии, в том числе и при тестировании ОТО в солнечной системе [1; 2, с. 185].

Таким образом, мы можем считать, что в нашей Вселенной сосуществуют два разных пространства-времени - фоновое и физическое. Причем физическое пространство-время вложено в фоновое пространство-время. На рис. 1 символически иллюстрируется связь между этими пространствами. Множеству всех точек внутри куба соответствует континуальное евклидово пространство  $\Phi_0$ , а физическому пространству  $\Phi_1$  соответствует дискретная сетка, состоящая из точечных узлов и связей между соседними узлами.

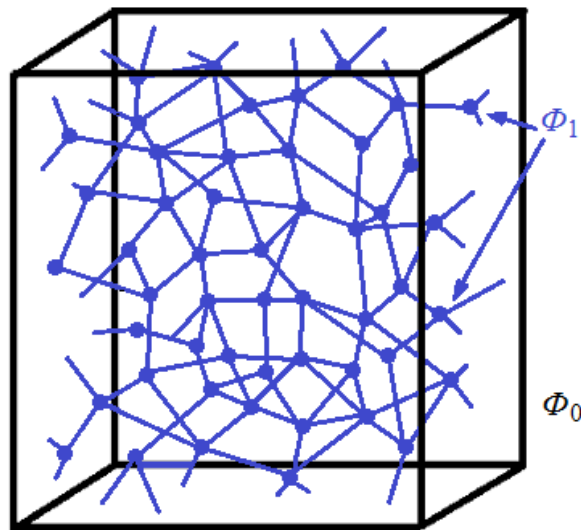


Рис. 1. Дискретная сетка физического пространства  $\Phi_1$  в непрерывном фоновом пространстве  $\Phi_0$ .

Если мы предпочитаем оставаться в рамках ОТО, то оба эти пространства должны быть непрерывными. В этом случае дискретную сетку  $\Phi_1$  на рис. 1 надо рассматривать всего лишь как дискретную аппроксимацию непрерывного физического пространства, сделанную исключительно в иллюстративных целях. На наш взгляд, именно в этой аппроксимации на рис. 1 наиболее наглядно представляется различие между фоновым и физическим пространствами.

Геометрия в физическом пространстве-времени задается в ОТО выражением для квадрата расстояния  $ds^2$  между двумя близкими точками

$$ds^2 = \sum_{i,j=0}^3 g_{ij} dx^i dx^j. \quad (1)$$

Здесь  $x^i$  - координаты точек физического пространства-времени в пространстве  $E^4$ , а  $g_{ij}(x)$  - компоненты ковариантного симметричного метрического тензора в точке  $x = (x^0, x^1, x^2, x^3)$ . В силу симметрии метрического тензора только 10 функций  $g_{ij}(x)$  являются независимыми.

Пробные тела в ОТО движутся по геодезическим линиям [3, с. 330].

Метрика физического пространства-времени в ОТО меняется со временем в соответствии с системой дифференциальных уравнений второго порядка Эйнштейна-Гильберта [3, с. 372]

$$G_{ij} \equiv R_{ij} - \frac{1}{2} g_{ij} R = \frac{8\pi G}{c^4} T_{ij}, \quad (2)$$

где  $G_{ij}$  - компоненты тензора Эйнштейна,  $R_{ij}$  - компоненты тензора Риччи, которые получаются сверткой тензора кривизны Римана  $R_{kij}$  по индексам  $k$  и  $l$ ,  $R$  - скалярная кривизна, которая получается сверткой тензора Риччи. Эти величины определяются через компоненты метрического тензора  $g_{ij}(x)$  и их первые и вторые производные по координатам фонового пространства-времени, причем вторые производные входят в эти

уравнения линейно. В правой части (2) присутствует гравитационная постоянная  $G$ , скорость света  $c$ , а также  $T_{ij}(x)$  - компоненты симметричного тензора энергии-импульса материи.

Уравнения Эйнштейна-Гильберта (2) являются вариационными уравнениями, которые получаются из принципа наименьшего действия [3, с. 370]:  $\delta(S_g + S_m) = 0$ , где  $S_g$  и  $S_m$  - действия для гравитационного поля и для материи, причем

$$S_g = -\frac{c^3}{16\pi G} \int R \sqrt{-g} d\Omega.$$

Здесь  $g = \det g_{ij}$ , и интеграл берется по рассматриваемой области фонового пространства-времени. Варьирование осуществляется по компонентам метрического тензора  $g_{ij}$ . Ключевую роль здесь играет скалярная кривизна  $R$  физического пространства-времени.

Тензорная запись уравнений Эйнштейна-Гильберта (2) соответствует предположению ОТО о том, что динамика физического пространства-времени и материи определяются именно метрикой (1), но не выбором системы координат.

Далее мы ограничимся уравнениями Эйнштейна-Гильберта (2) с нулевой правой частью,  $T_{ij} = 0$ , то есть, случаем нахождения функций  $g_{ij}(x)$  в вакууме, за пределами материальных объектов. Для задачи, решаемой в данной работе, этого достаточно.

#### Неизвестная физика, связанная с координатными условиями

Для 10 неизвестных функций  $g_{ij}(x)$  записываются 10 уравнений Эйнштейна-Гильберта (2), но на самом деле независимыми являются только 6 из этих уравнений [3, с. 374; 5, р. 170]. Поэтому уравнения Эйнштейна-Гильберта позволяют определить только 6 из 10 компонент метрического тензора. Оставшиеся 4 компоненты остаются неизвестными, и для их определения необходимо задать 4 дополнительных, так называемых «координатных условий».

Поскольку мы традиционно описываем весь окружающий нас мир именно в плоском фоновом пространстве-времени, то в первую очередь нас интересует получение метрического тензора в фоновой системе отсчета.

Таким образом, мы изначально решаем проблему выбора координатной системы, фиксируя координатную систему в плоском фоновом пространстве-времени.

По сути, мы постулируем существование фонового пространства-времени как дополнительного объекта к ОТО. Тем не менее, это не приводит к нарушению ОТО. Поскольку уравнения Эйнштейна-Гильберта ковариантны относительно произвольных преобразований координат, то выбирая систему координат, связанную с нашим конкретным фоновым пространством-временем, мы гарантированно имеем правильную систему уравнений Эйнштейна-Гильберта (2). В этих уравнениях все производные берутся по координатам фонового пространства-времени.

Рассматривая фоновое пространство-время Минковского, мы, по сути, реализуем идею релятивистской теории гравитации (РТГ) Логунова А. А. [2] о том, что мы живем в плоском пространстве-времени Минковского. Но в отличие от РТГ мы не рассматриваем гравитацию как физическое поле в духе Фарадея-Максвелла, оставляя ее как нечто, описываемое уравнениями ОТО.

Решая систему уравнений Эйнштейна-Гильберта (2), мы получаем множество решений. Разным решениям из этого множества соответствуют разные физические пространства-времена. Наша задача состоит в выборе из получаемого множества решений такого

единственного решения, которое согласуется с наблюдениями и экспериментами, проводимыми в фоновом пространстве-времени. Поскольку неизвестными являются 10 компонент симметричного метрического тензора  $g_{ij}$ , а уравнения Эйнштейна-Гильберта позволяют найти только 6 из них, то можно говорить, что уравнения Эйнштейна-Гильберта обеспечивают только 60% решения задачи ОТО. Остальные 40% должна дать физика, скрывающаяся за так называемыми "координатными условиями". Для природы все компоненты метрического тензора одинаково важны, поэтому физика, связанная с координатными условиями, является столь же важной, что и физика, связанная с уравнениями Эйнштейна-Гильберта. Однако, общее понимание физики, стоящей за выбором координатных условий, отсутствует.

Сказанное выше можно проиллюстрировать на примере решения задачи нахождения статического центрально-симметричного гравитационного поля, создаваемого точечной массой (далее будем называть эту задачу задачей Шварцшильда). Это решение необходимо, например, для тестирования ОТО на масштабах солнечной системы [1].

**Общее решение для задачи Шварцшильда**

Требуется найти компоненты метрического тензора  $g_{ij}(x)$ , описывающего статическое центрально-симметричное гравитационное поле неподвижной точечной массы. При поиске решения предполагается, что гравитационное поле сферически симметрично. Это условие симметрии является физическим и позволяет существенно сократить число неизвестных функций. При этом искомым метрический тензор можно записать в сферической системе координат  $(r, \theta, \varphi)$  в виде [2, с. 90]

$$g_{ij} = \begin{pmatrix} u(r) & -a(r) & 0 & 0 \\ -a(r) & -\left(v(r) - \frac{a^2(r)}{u(r)}\right) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -w^2(r) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -w^2(r) \sin^2 \theta \end{pmatrix} \tag{3}$$

Таким образом, наложение условия сферической симметрии позволило снизить число неизвестных функций с 10 до 4, причем эти функции,  $u(r), v(r)$ ,

$w(r), a(r)$ , в силу статичности задачи зависят только от координаты  $r$ .

Тензор Эйнштейна для метрики (3) можно записать в виде

$$G_{ij} = \begin{pmatrix} \Phi_1 & -a\Phi_1 & 0 & 0 \\ -a\Phi_1 & \frac{a^2}{u}\Phi_1 + \Phi_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\Phi_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\Phi_3 \sin^2 \theta \end{pmatrix}, \Phi_1 = \frac{u}{w^2 v^2} \left[ 2 \frac{d^2 w}{dr^2} w v + \left( \frac{dw}{dr} \right)^2 v - \frac{dw}{dr} \frac{dv}{dr} w - v^2 \right],$$

$$\Phi_2 = \frac{v}{w^2} - \frac{1}{w^2} \left( \frac{dw}{dr} \right)^2 - \frac{1}{uw} \frac{du}{dr} \frac{dw}{dr},$$

$$\Phi_3 = \frac{w}{2v^2} \left[ 2 \frac{d^2 w}{dr^2} v - \frac{dw}{dr} \frac{dv}{dr} \right] + \frac{w}{4u^2 v^2} \left[ 2 \frac{dw}{dr} \frac{du}{dr} u v - \frac{dv}{dr} \frac{du}{dr} w u - \left( \frac{du}{dr} \right)^2 w v + 2 \frac{d^2 u}{dr^2} w u v \right].$$

Для вакуума система дифференциальных уравнений Эйнштейна-Гильберта (2) принимает вид

$$G_{ij} = 0. \quad (4)$$

Эта система уравнений удовлетворяется, если функции  $u(r)$  и  $v(r)$  выражаются через  $w(r)$  следующим образом [2, с. 96]:

$$u(r) = 1 - \frac{r_g}{w(r)}, \quad v(r) = \frac{1}{1 - \frac{r_g}{w(r)}} \left( \frac{dw(r)}{dr} \right)^2. \quad (5)$$

Выражение для  $v(r)$  получается из уравнения  $\Phi_1 = 0$ , и константа интегрирования  $r_g$  определяется

$$ds^2 = \left(1 - \frac{r_g}{w}\right) c^2 dt^2 - acdtdr - \frac{1}{\left(1 - \frac{r_g}{w}\right)} \left[ \left(\frac{dw}{dr}\right)^2 - a^2 \right] dr^2 - w^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2). \quad (6)$$

Это общее решение представлено в 1921 году в работе [6].

#### Произвол в выборе функций $a(r)$ и $w(r)$ не связан с выбором координат

В данной работе для нас наиболее существенно то, что все семейство метрик (6) соответствует одной и той же фиксированной системе сферических пространственных координат в гелиоцентрической фоновой системе отсчета.

По этой причине для нас возможность изменения функций  $a(r)$  и  $w(r)$  не связана с изменением системы координат, которые у нас не меняются. Изменение функций  $a(r)$  и  $w(r)$  ведет к изменению метрики физического пространства-времени, и мы можем ассоциировать это изменение с некоторой деформацией физического пространства-времени. Это вопрос обсуждался также в [2, с. 96].

в ньютоновском пределе и полагается равной гравитационному радиусу центрального тела, порождающего гравитационное поле [3, с. 405],

$$r_g = \frac{2GM}{c^2},$$

где  $M$  - масса центрального тела. Для Солнца  $r_g = 3$  км.

Итак, система уравнений Эйнштейна-Гильберта позволяет определить две функции  $u(r)$  и  $v(r)$ , выражаемые через функцию  $w(r)$  соотношениями (5). Оставшиеся две функции  $a(r)$  и  $w(r)$  должны определяться из координатных условий.

Метрика этой задачи имеет вид

Таким образом, ОТО позволяет путем изменения функций  $a(r)$  и  $w(r)$  деформировать физическое пространство-время. Данные наблюдений, вообще говоря, должны привести к единственной метрике для статического гравитационного поля Солнца и, соответственно, к вполне конкретным выражениям для функций  $a(r)$  и  $w(r)$ . Этой единственной метрике соответствует некоторая физика, которая не прописана в уравнениях Эйнштейна-Гильберта.

Таким образом, произвол в выборе функций  $a(r)$  и  $w(r)$  не является произволом в выборе координат, а является произволом, допускаемым ОТО в отношении пока еще неизвестной нам части физики физического пространства-времени.

#### Метрика Шварцшильда

При выборе функции  $w(r)$  в простом виде

$$w(r) = r, \quad (7)$$

выражение (6) принимает вид

$$ds^2 = \left(1 - \frac{r_g}{r}\right) c^2 dt^2 - acdtdr - \frac{1}{\left(1 - \frac{r_g}{r}\right)} (1 - a^2) dr^2 - r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2) \quad (8)$$

Если здесь положить

$$a(r) = 0, \quad w(r) = r, \quad (9)$$

то мы получаем метрику Шварцшильда, которая считается наилучшим образом

соответствующей статическому гравитационному полю Солнца при тестировании ОТО в солнечной системе,

$$ds^2 = \left(1 - \frac{r_g}{r}\right) c^2 dt^2 - \frac{1}{\left(1 - \frac{r_g}{r}\right)} dr^2 - r^2 d\theta^2 - r^2 \sin^2 \theta d\varphi^2. \quad (10)$$

#### Переход между метриками путем формального изменения координат

Все семейство метрик (6) строится путем произвольного изменения функций  $a(r)$  и  $w(r)$  при фиксированной системе координат.

В то же время все эти метрики можно получить из обобщенно метрики Шварцшильда (8) формальным путем изменения координат. Для

этого заменим в (8) переменную  $r$  на переменную  $\rho$  с помощью преобразований

$$r = w(\rho), a'(\rho) = a(r(\rho)). \quad (11)$$

Тогда мы получаем метрику

$$ds^2 = \left(1 - \frac{r_g}{w(\rho)}\right) c^2 dt^2 - a' c dt d\rho \frac{1}{\left(1 - \frac{r_g}{w(\rho)}\right)} \left[\left(\frac{dw}{d\rho}\right)^2 - a'^2\right] d\rho^2 - w^2 d\theta^2 - w^2 \sin^2 \theta d\varphi^2,$$

которая после простой замены обозначений

$$\rho \rightarrow r, \quad a' \rightarrow a, \quad (12)$$

совпадает с общей метрикой (6), содержащей две произвольные функции  $a(r)$  и  $w(r)$ .

Здесь принципиально важным является переход (12), который "все портит" в координатном преобразовании (11). У нас вначале была метрика (8), выражаемая через  $r$  и  $a(r)$ . После перехода (12) мы получаем физически совершенно другую метрику для той же самой координатной системы. Поэтому переход от метрики (8) к метрике (6) с помощью (11) и (12) уже не является правильным координатным преобразованием, а является результатом некоторой допустимой в ОТО деформации физического пространства-времени, соответствующей изменению физики, которая закладывается неявно в метрику.

Наблюдения свидетельствуют о том, что природа предпочла выбор для функций  $a(r)$  и  $w(r)$  в виде (7, 9). В то же время, какое-либо разумное объяснение выбора этих функций в виде (7, 9) в литературе отсутствует.

### Физическое пространство-время как деформируемая среда

Мы рассматриваем физическое пространство-время как некоторый субстрат (среду), каждый элемент (точка) которой имеет свой уникальный набор значений координат  $(x^0, x^1, x^2, x^3)$  в фоновом пространстве-времени. К тому же этот элемент снабжен 16 компонентами симметричного метрического тензора  $g_{ij}$ , из которых в силу симметрии независимыми являются только 10 компонент.

Каждую симметричную матрицу  $g_{ij}$  размерности  $4 \times 4$  можно привести к диагональному виду путем 6 ортогональных вращений на соответствующие углы  $\alpha_{ij}$  в соответствующих ортогональных плоскостях  $(ij)$ . Это соответствует приведению тензора  $g_{ij}$  к главным осям. Далее, проведя масштабирование вдоль каждой из главной осей с помощью масштабных множителей  $\lambda_i$ , можно этот тензор свести к метрическому тензору Минковского с

диагональными элементами (1, -1, -1, -1). С помощью тех же обратных 10 операций можно из тензора Минковского получить любой метрический тензор  $g_{ij}$ .

Десять параметров  $(\alpha_{ij}, \lambda_i)$  относятся к каждой точке  $x$  физического пространства-времени, поэтому с помощью 10 функций  $(\alpha_{ij}(x), \lambda_i(x))$  можно в любой области фонового пространства-времени для физического пространства-времени также установить метрику плоского пространства-времени Минковского.

В ОТО все уравнения ковариантны относительно произвольных невырожденных преобразований четырех координат  $x^i = x^i(\xi)$ . Соответствующее преобразование метрического тензора сводится к умножению на две матрицы Якоби

$$g'_{kl}(\xi) = g_{ij}(x) \frac{\partial x^i}{\partial \xi^k} \frac{\partial x^j}{\partial \xi^l}. \quad (13)$$

Из того, что матрицы Якоби определяются только четырьмя функциями, а не десятью, следует, что никакими преобразованиями координат нельзя произвольное физическое пространство-время сделать плоским в какой-либо области пространства-времени.

Метрический тензор  $g_{ij}$  аналогичен тензору деформации в механике сплошных сред.

Тензор диэлектрической проницаемости  $\epsilon_{ij}$ , используется при описании анизотропных диэлектрических сред. В этом случае он, в частности, определяет анизотропию скорости распространения света в каждой точке среды. Метрический тензор  $g_{ij}(x)$  также однозначно определяет анизотропию координатной скорости распространения света в каждой пространственной точке.

Запишем выражение для интервала (1) в более компактном виде для случая распространения света вдоль пространственной декартовой координатой оси  $x$ .

$$ds^2 = g_{00}(cdt)^2 - g_{0i}(cdt)dx_i - g_{ii}dx_i^2.$$

Движение фотона в ОТО описывается уравнением  $ds = 0$ . Поэтому для (координатной)

скорости фотона вдоль этого направления получаем выражение

$$\frac{dx_i}{dt} = \frac{c}{2g_{ii}} \left( -g_{0i} \pm \sqrt{g_{0i}^2 + 4g_{00}g_{ii}} \right), \quad (14)$$

где знак  $\pm$  соответствует движению фотона вперед и назад.

Уже из этого выражения понятно, что измерение локальной анизотропии координатной скорости света позволяет определить все компоненты метрического тензора  $g_{ij}(x)$  при условии независимого определения элемента  $g_{00}(x)$ , определяющего замедление времени в точке  $x$ .

#### Какая физика может стоять за условием $a(r) = 0$ ?

Рассмотрим частный вопрос о координатной скорости фотона, движущегося в радиальном направлении в задаче Шварцшильда. Воспользуемся выражением (14), заменив в нем  $g_{0j}$  на  $a$ ,

$$\frac{dx_i}{dt} = \frac{c}{2g_{ii}} \left( -a \pm \sqrt{a^2 + 4g_{00}g_{ii}} \right), \quad (15)$$

В случае  $a \neq 0$  из этой формулы следует, что координатные скорости фотона в противоположных направлениях являются разными по величине. Это различие мы можем ассоциировать с локальным движением субстрата (который мы называем физическим пространством-временем) относительно нашей фоновой системы отсчета.

Уравнение (15) напоминает обычное преобразование Галилея для скоростей, если первое слагаемое ассоциировать со скоростью субстрата относительно фоновой системы отсчета. Однако второе слагаемое трудно ассоциировать с локальной скоростью света относительно субстрата, ввиду его зависимости от величины  $a$ . К тому же ОТО не дает ограничений на величину  $a$ . Какой-то смысл этому выражению можно придать лишь при очень малых значениях  $a$ . Возможно (15) имеет смысл рассматривать как приближение к некоторой более точной модели.

Таким образом, с одной стороны уравнения Эйнштейна-Гильберта допускают движение физического пространства-временем

относительно фонового пространства-времени. Произвол в  $a(r)$  означает, что локальные скорости такого относительного движения могут быть любыми. С другой стороны наблюдения предпочитают случай  $a(r) = 0$ .

Это факт можно объяснить тем, что в случае солнечной системы движение физического пространства-времени относительно Солнца отсутствует. Это в свою очередь мы можем связать с наличием в природе эффектов релаксации движения физического пространства-времени относительно Солнца. Эти эффекты релаксации отсутствуют в уравнениях Эйнштейна-Гильберта и должны быть как-то добавлены в теорию ОТО.

Если  $a \neq 0$ , то решение является стационарным, а не статичным [5, p. 180]. Мы это связываем с движением рассматриваемого субстрата.

В классическом учебнике [3, с. 402] вопрос с выбором функций  $a(r)$  и  $w(r)$  решен совсем просто. Предложено без излишних дискуссий просто «воспользовавшись произвольностью в выборе системы отсчета в общей теории относительности», положить  $a(r) = 0$  и  $w(r) = r$ . В результате, естественно, получается метрика Шварцшильда (10).

Аналогично в [4, с. 271] полагается  $a(r) = 0$ , поскольку утверждается, что «обычно члены, содержащие произведения  $dxdt$ , не играют роли», поэтому их можно отбросить. В [5, p. 183] полагается  $a(r) = 0$ , просто накладыванием на метрику (6) условия независимости от изменения знака времени ( $dt \rightarrow -dt$ ). Этот же «аргумент» еще ранее приводился в работе [6], как постулируемая независимость законов движения от замены знака времени. Однако этот аргумент нельзя признать физическим аргументом, поскольку, по сути, он просто фиксирует факт  $a(r) = 0$ , не объясняя его.

#### Какая физика может стоять за выбором природой функции $w(r)$ ?

Еще одним примером простой метрики, соответствующей формуле (6), является изотропная метрика [3, с. 409]

$$ds^2 = \left( \frac{1 - \frac{r_g}{4r}}{1 + \frac{r_g}{4r}} \right)^2 c^2 dt^2 - \left( 1 + \frac{r_g}{4r} \right)^4 (dr^2 + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\varphi^2). \quad (16)$$

которая получается из общей формулы (6) при

$$a(r) = 0, \quad w(r) = r \left( 1 + \frac{r_g}{4r} \right)^2.$$

Также хорошо известным примером выбора координатных условий является использование гармонических координат. В работе [4, с. 259] к уравнениям Эйнштейна-Гильберта добавляются четыре дифференциальных уравнения

$$\frac{\partial}{\partial x^j}(\sqrt{-g}g^{ij}) = 0, \tag{17}$$

где  $g = \det g_{ij}$ . «Гармоническая калибровка» (17) напоминает необязательную лоренцовскую

$$ds^2 = \frac{1 - \frac{r_g}{2r}}{1 + \frac{r_g}{2r}} c^2 dt^2 - \frac{1 + \frac{r_g}{2r}}{1 - \frac{r_g}{2r}} dr^2 - \left(1 + \frac{r_g}{2r}\right)^2 r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2). \tag{18}$$

В релятивистской теории гравитации [2] также используются для эффективной метрики уравнения (17), которые получаются путем постулирования дополнительных свойств физических гравитационного поля в духе Фарадея-Максвелла, хотя такое поле отсутствует в ОТО. При этом получается эффективная метрика (18) [2, с. 103]. Однако утверждается [2, с. 61, 64], что уравнения (17) представляют из себя уравнения

калибровку  $\partial_j A^j = 0$  для 4-потенциала в электромагнетизме.

Полная система уравнений, состоящая из уравнений (2) и (17), позволяет найти уже все 10 компонент метрического тензора. Одновременно уравнения (17) фиксируют так называемую гармоническую систему координат и, соответственно, дают гармоническую метрику в качестве решения задачи Шварцшильда [4, с. 285]

гравитационного поля и не имеют никакого отношения к выбору системы координат. Тот факт, что использование гармонических координат упрощает математические вычисления [4, с. 509] нельзя признать физическим аргументом в пользу уравнений (17).

Гармоническую метрику (18) можно переписать в виде

$$ds^2 = \frac{1 - \frac{r_g}{2r}}{1 + \frac{r_g}{2r}} c^2 dt^2 - \left(1 + \frac{r_g}{2r}\right)^2 \left( \frac{1}{1 - \left(\frac{r_g}{2r}\right)^2} dr^2 - r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2) \right).$$

Отсюда видно, что в первом приближении по малому параметру  $r_g/r$  гармоническую метрику можно считать изотропной. Пространственная анизотропия появляется только во втором порядке по этому параметру.

Изотропная метрика (16) выглядит очень привлекательной именно из-за того, что ей соответствует простая, понятная и достаточно фундаментальная физика. К этой метрике могут вести какие-то пока еще скрытые от нас релаксационные процессы в динамике физического пространства-времени, не фиксируемые в уравнениях Эйнштейна-Гильберта.

Однако существование таких процессов релаксации должно проявляться и в общих несимметричных случаях. При этом, после того как в какой-то области пространства-времени процессы релаксации отработают, метрический тензор в декартовой системе координат будет содержать только две независимые функции, подлежащие определению -  $g_{00}(x)$  и  $g_{11}(x) = g_{22}(x) = g_{33}(x)$ . Это условие существенно ограничивает область допустимых решений уравнений Эйнштейна-Гильберта.

В отличие от метрик (16) и (18) метрика Шварцшильда (10) уже в первом порядке по малому параметру  $r_g/r$  является анизотропной.

Однако до сих пор эта возможная пространственная анизотропия остается экспериментально непроверенной. Проверка этого

эффекта первого порядка является крайне важной, поскольку она затрагивает вопрос о наличии возможной локальной пространственной изотропии, которая могла бы физически обоснованным способом снять проблему произвола в выборе координатных условий в ОТО.

#### Заключение

В литературе отсутствуют физически обоснованные критерии выбора координатных условий в ОТО [2, с. 98, 220]. Поскольку для природы все компоненты метрического тензора одинаково важны, то отсутствию понимания происхождения 40% компонент метрического тензора в ОТО является серьезной проблемой и требует своего решения. В данной работе мы фиксируем тот факт, что все реальные наблюдения и эксперименты проводятся в плоском фоновом пространстве-времени Минковского. Для объяснения этих наблюдений и экспериментов мы должны записывать уравнения Эйнштейна-Гильберта в координатах, связанных с этим фоновым пространством-временем. Это позволяет рассматривать физическое пространство-время как некоторый субстрат, помещенный в фоновое пространство-время. Решения уравнений Эйнштейна-Гильберта содержат 4 произвольные функции. Этот произвол можно рассматривать как произвол в выборе допустимых в ОТО деформаций физического пространства-времени. В природе этот произвол снимается наличием каких-то пока

неизвестных нам физических процессов, которые не учитываются в записи уравнений Эйнштейна-Гильберта, и которые необходимо добавить к нынешней ОТО.

#### Библиографический список

1. Турышев В. Г. Экспериментальные проверки общей теории относительности: недавние успехи и будущие направления исследований // Успехи физических наук. 2009. Т. 179, № 1. С. 3-34.
2. Логунов А. А., Мествиришвили М. А. Релятивистская теория гравитации. М.: Наука, 1989. 304 с.
3. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория поля. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 536 с.
4. Фок В. А. Теория пространства, времени и тяготения. М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1961. 564 с.
5. D'Inverno, Ray. Introducing Einstein's Relativity. Oxford: Clarendon Press, 1992. 383 p.
6. Painlevé P. La gravitation dans la mécanique de Newton et dans la mécanique d'Einstein. C.R.A.S. Note. 2021. vol. 173. no. 20. P. 873-887.

**ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ**

УДК 697.3

**МАЛОЭТАЖНЫЕ ЗДАНИЯ. ВОПРОСЫ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ***Вялкова Наталия Сергеевна**Канд. техн. наук, Тульский государственный университет,  
Тула, Россия***LOW-STOREY BUILDINGS. HEATING ISSUES***Vyalkova Nataliya Sergeevna**Candidate of Technical Sciences, Tula State University  
Tula, Russia*

DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2025.1.131.2213

**АННОТАЦИЯ**

В статье рассмотрены вопросы, связанные со способом функционирования системы теплоснабжения малоэтажных зданий, позволяющей поддерживать нормируемые параметры микроклимата, используя периодическое отопление в течение суток и сезонное регулирование пределов комфортных условий. Для выдерживания расчетного режима работу системы теплоснабжения необходимо автоматизировать с программным управлением. При использовании инженерного оборудования совместно с отлаженной автоматикой регулирования и надёжной изоляционной оболочкой ограждающих конструкций здания возможно использовать в холодный период года взаимосвязь работы водяного и воздушного отопления для поддержания нормируемых параметров микроклимата, при этом в теплый период система воздушного отопления выполняет роль вентиляции.

**ABSTRACT**

The article discusses issues related to the functioning of the heating system for low-rise buildings, which allows for the maintenance of regulated microclimate parameters using periodic heating throughout the day and seasonal regulation of comfortable conditions. To maintain the designed mode, the heating system must be automated with program control. By using engineering equipment in conjunction with well-established automation and regulation systems, as well as a reliable insulation shell for the building's envelope, it is possible to utilize the interconnection between water and air heating during the cold season to maintain regulated microclimate parameters, while the air heating system serves as ventilation during the warm season.

**Ключевые слова:** теплоснабжение, микроклимат, режимы работы системы, система регулирования.  
**Keywords:** heat supply, microclimate, system operation modes, regulation system.

**Введение**

Системы теплоснабжения городов закономерно являются важнейшим элементом энергетического комплекса страны. Прогноз потребления тепловой энергии основан на прогнозировании развития города, в первую очередь его градостроительной деятельности, определённой генеральным планом. Решение проблемы начинается на стадии разработки генеральных планов в самом общем виде совместно с другими вопросами городской инфраструктуры. Тепловые сети старейших городов России в основном эксплуатируются более пятидесяти лет и находятся в изношенном состоянии. Устаревшее котельное оборудование необходимо заменить современным оборудованием с автоматикой, большим КПД, что даст значительную экономию средств на его эксплуатацию. Ликвидация подвальных котельных с установкой автоматизированных модульных приведет к повышению КПД теплофикационного оборудования, что в свою очередь ведет к снижению потребления газа, а также позволит вывести обслуживающий персонал с данных объектов. Ряд источников тепла являются

убыточными, т. е. их себестоимость выработки тепловой энергии значительно (в десятки раз) превышает утвержденный тариф. Так в г. Тула на протяжении пяти последних лет, в соответствии с требованиями Ростехнадзора, выполнено большое количество экспертиз промышленной безопасности зданий и сооружений котельных и тепловых пунктов. Экспертными организациями, проводившими обследования объектов, были выданы предписания, зарегистрированные в органах Ростехнадзора. Результаты этих заключений подтверждают, что износ основного оборудования и зданий котельных составляет более 65 %. Концепция здоровых зданий интегрирует различные решения при проектировании, строительстве и эксплуатации объектов.

Актуальным является поиск комплексного подхода как к новому строительству, так и к модернизации существующих объектов в области устойчивого развития систем теплоснабжения [1,2].

**Цель исследования**

Целью исследований является совершенствование работы системы теплоснабжения малоэтажных зданий с наиболее

эффективным использованием энергоресурсов путем применения разнообразных инновационных решений, которые могут быть технически осуществимы, экономически обоснованы, обеспечивают визуальный и тепловой комфорт людей при минимальном количестве потребляемой энергии.

### Материалы

Разрабатывая проект малоэтажного здания, приоритет в принятых энергосберегающих технологиях должен отдаваться техническим решениям, которые одновременно будут способствовать улучшению микроклимата помещений и благоприятно воздействовать на окружающую среду [3,5].

Инженерные системы являются важнейшим аспектом жизнеобеспечения любого объекта. Структура энергопотребления здания подразумевает включение следующих направлений: отопление; горячее водоснабжение; подогрев и охлаждение вентиляционного воздуха; насосное оборудование и вентиляторы; освещение; бытовое электрооборудование. Каждое из них несет определенные энергетические затраты. Однако порядка 70% от общих энергозатрат относится к системам климатизации.

Работа систем формирования внутреннего микроклимата в зданиях оказывает большое влияние на использование энергии. Значительный эффект на уменьшение потребления ее в здании могут оказать такие альтернативные меры, как периодическое отопление в течение суток и сезонное регулирование пределов комфортных условий. Экономия теплоты при периодических перерывах в отоплении также связывается и с

режимом работы системы. Задача - правильно выбрать режимы работы системы в условиях эксплуатации здания.

### Результаты

Применение предложенной системы теплоснабжения может решить поставленную задачу. На рисунке 1 представлена разработанная конструктивная схема и способ функционирования системы.

Данный способ функционирования позволяет совместить систему для рабочего периода времени, для нерабочего периода (дежурная) и систему вентиляции [4].

В холодный период года взаимосвязана работа водяного и воздушного отопления для поддержания нормируемых параметров микроклимата, а в теплый период система воздушного отопления выполняет роль вентиляции.

В холодный период года воздушное отопление используется в качестве догревающей части системы. В этом случае система должна функционировать в двух режимах: в режиме нагрева и в рабочем режиме, с полным отключением в нерабочий период. В режиме нагрева система воздушного отопления работает как полностью рециркуляционная. В рабочий период времени система воздушного отопления работает как приточная. Возможно ее полное использование в случае выхода из строя водяной системы.

В результате, используя для воздушного отопления существующие воздуховоды, предлагаемая система отопления обеспечит улучшение распределения воздуха.

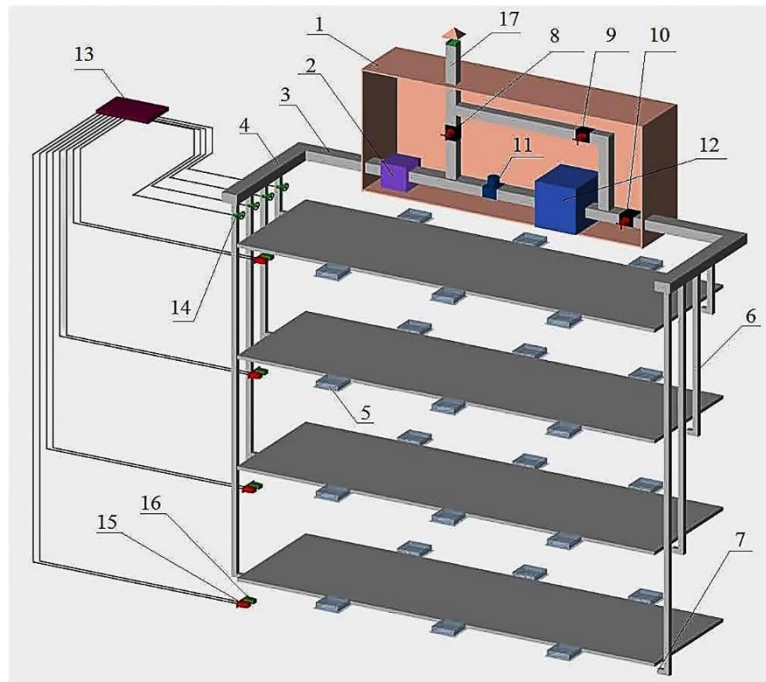


Рисунок 1. Конструктивная схема системы отопления

1 – вентиляторная камера; 2 – вентилятор; 3 - магистральный воздуховод приточного воздуха; 4 - распределительный канал для подачи входного потока воздуха в разные промежуточные уровни здания; 5 – воздухораспределители, установленные в обслуживаемых помещениях; 6 - рециркуляционные каналы; 7 - рециркуляционные решетки;

8, 9, 10 – шиберы; 11 - обратный клапан; 12 - калорифер;  
 13 - блок управления; 14 - регулирующие клапаны;  
 15, 16 - датчики температуры и содержания углекислого газа;  
 17- вентиляционная шахта.

В качестве управляющего закона в системе автоматического регулирования системы была использована корреляционная зависимость продолжительности нагревов перед каждым рабочим днем недели от температуры наружного воздуха. Рассмотрен недельный разрез при различной температуре наружного воздуха (через 5 °С) в течение отопительного сезона (режим работы здания принят 6 дней в неделю с 8 до 18 часов). Эта

корреляционная зависимость имеет линейный характер.

Как видно из рисунка 2, длительность нагревов первых двух дней недель значительно отличается от соответствующих значений для последующих дней [5,6], что объясняется тепловой инерционностью массива наружных и внутренних ограждений после длительного перерыва отопления в выходной день.

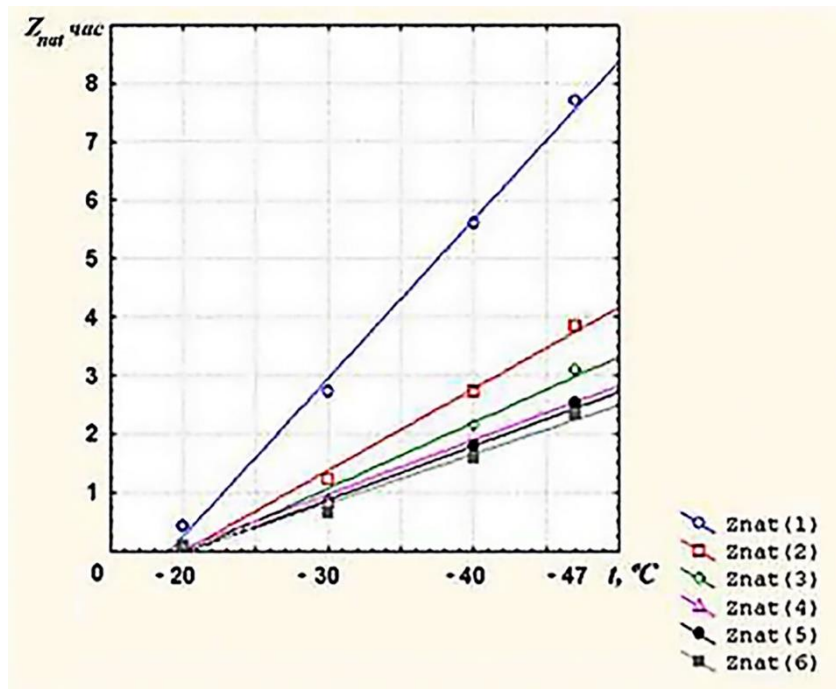


Рисунок 2. Зависимость требуемой продолжительности нагревов от температуры наружного воздуха

При работе такой системы отопления целесообразно применять автоматизацию местных тепловых пунктов [6]. Система автоматизации предназначена для поддержания требуемой температуры воздуха в помещениях при периодической работе системы водяного отопления и требуемых параметров теплоносителя в подающем и обратном трубопроводах системы. Для решения поставленных задач необходимо предусмотреть установку независимых узлов регулирования системы отопления.

Основным звеном в контуре регулирования является электронный регулятор температуры. Помимо погодного регулирования, электронный регулятор позволяет осуществлять регулирование по расписанию, например, снижая температуру в ночные часы. Регулирование по датчикам является приоритетным. Кроме того, электронный регулятор предотвращает залипание штока клапана регулятора теплового потока и вала насоса в неотопительный период, периодически включая их на короткий промежуток времени (один раз в трое суток на одну минуту). Эти функции являются

дополнительными решениями и, в случае необходимости, реализуются за счет программирования электронного регулятора.

Работает система регулирования следующим образом: регулятор температуры – погодный компенсатор получает информацию о температуре от датчиков (наружного и внутреннего воздуха, подающая и обратная магистраль) и на основании заложенного температурного графика определяет необходимую степень открытия клапана.

Изменение расхода теплоносителя, который поступает в систему отопления из тепловой сети, происходит при изменении степени открытия клапана. При этом происходит изменение подмешивания охлажденного теплоносителя к поступившему из теплосети. Регулятор ограничивает минимальную и максимальную температуру теплоносителя в подающем и обратном трубопроводах.

Однако, для насосного оборудования важна не столько цена, сколько стоимость жизненного цикла (СЖЦ), который может исчисляться десятилетиями. Так для стандартного

циркуляционного насоса даже без учета роста тарифов большую часть цикла будет составлять энергопотребление. На втором месте — стоимость обслуживания, а инвестиционная составляющая (цена покупки) не превышает 10% СЖЦ.

При реконструкции муниципального здания в г. Тула (отопительный сезон составляет 4824 часа) с максимальным напором 7 м, а максимальным расходом 7 м<sup>3</sup>/ч можно двумя способами установить циркуляционный насос (позиция 8 рис.3). В первом случае рассматривается установка нерегулируемого циркуляционного насоса с «мокрым» ротором. Во втором — аналогичный агрегат, но с частотной регулировкой.

В первой системе с циркуляционным насосом Ридан серии RWS 32-80S, мощностью двигателя — 0,245 кВт расчет энергопотребления показывает, что этот насос малой мощности потребляет более 1 тыс. кВт/ч в год. Во второй - выбран регулируемый насос Ридан серии RWE 25-80S с мощностью электродвигателя — 0,5 кВт, работающий по принципу пропорционального регулирования. Предусмотрена возможность доступа к параметрам системы. Расчет показывает, что более мощный насос позволяет добиться реальной экономии — энергопотребление составит всего 600 кВт/ч в год.

Вторая система оказывается экономичнее на 40%. Если принять цену первой системы за 1, вторая будет стоить 1,5. Поскольку разрыв в энергопотреблении между двумя вариантами значителен, второй окупится уже в течение первого года. Опыт эксплуатации современного оборудования в подобных зданиях показал, что его применение не только позволяет снизить расходы на треть; но и помогает оптимизировать отопление.

#### **Выводы**

При использовании инженерного оборудования совместно с отлаженной автоматикой регулирования и надёжной изоляционной оболочкой ограждающих конструкций здания возможно использовать в холодный период года взаимосвязь работы

водяного и воздушного отопления для поддержания нормируемых параметров микроклимата, при этом в тёплый период система воздушного отопления выполняет роль вентиляции.

Выявлена корреляционная зависимость продолжительности нагревов перед каждым рабочим днем недели от температуры наружного воздуха.

Предлагаемые конструктивная схема и способ функционирования системы, установка современного энергоэффективного оборудования в местном тепловом пункте позволят обеспечить визуальный и тепловой комфорт людей при минимальном количестве потребляемой энергии.

#### **Список литературы:**

1. Бадьин Г. М. Строительство и реконструкция малоэтажного энергоэффективного дома / Г.М. Бадьин. - СПб.: БХВ-Петербург, 2011.- 432 с.
2. Голубцов, Н.В. Энергетическая эффективность зданий и сооружений в аспекте управления их жизненным циклом / Н.В. Голубцов, Л.Г. Ефремов, Р.Г. Исмятуллин // Вестник Чувашского университета. – 2013. – № 11. – С. 247–255.
3. Матросов, Ю.А. Повышение энергоэффективности жилых зданий // Бюллетень ЦЭНЭФ. – 2002. – № 35. – С.23-24.
4. Соколов Э.М., Степанов В.М., Вялкова Н.С., Солодков С.А. Система вентиляции и отопления//Патент РФ на полезную модель, МПК7, F 24 F 7/06, 03 №36042. 2004.Бюл.№5.-3с.
5. Табунщиков Ю.А. Строительные концепции зданий XXI века в области теплоснабжения и климатизации // АВОК.- 2005 г. - № 4.- С. 4–8.
6. Чистович С.А. Автоматизированные системы теплоснабжения и отопления / С.А. Чистович, В.К. Аверьянов, Ю.В. Темпель, С.И.Быков. – Л.: Стройиздат, 1987. – 247с.

УДК 629.12.001.2: 656.66

---

**ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЫЛЕОБРАЗОВАНИЯ ПРИ ПЕРЕГРУЗКЕ СЫПУЧИХ ГРУЗОВ КОНВЕЙЕРНЫМИ И ПНЕВМОТРАНСПОРТНЫМИ УСТАНОВКАМИ**

---

*Костюничев Д.Н.*

*ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта»,  
Россия, 603950, ул. Нестерова, 5*

*Отделкин Н.С.*

*ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта»,  
Россия, 603950, ул. Нестерова, 5*

*D. N. Kostyunichev*

*Volzhsky State University of Water Transport,  
603950, N. Novgorod, 5 Nesterova Str., Russia*

*N.S. Otdelkin*

*Volzhsky State University of Water Transport,  
603950, N. Novgorod, 5 Nesterova Str., Russia*

*DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2025.1.131.2214*

**АННОТАЦИЯ**

В статье рассмотрены вопросы моделирования процессов пылеобразования и приведены результаты и методика проведения экспериментальных исследований при перегрузке сыпучих грузов машинами непрерывного транспорта.

**ABSTRACT**

The article deals with the issues of modeling the processes of dust formation and presents the results and methods of experimental studies in the handling of bulk cargo by continuous transport machines.

**Ключевые слова:** сыпучий груз, критерии подобия, модели процессов, конвейер, пневмоустановка, масштабный коэффициент.

**Keywords:** bulk cargo, similarity criteria, process models, conveyor, pneumatic installation, scale factor.

**Введение.** Основным очагом пылеобразования при перегрузке сыпучих грузов конвейерными и пневмотранспортными установками является свободное падение струи сыпучего груза и ее соударение с преградой (удар падающего груза о дно трюма судна, пол вагона, о слой ранее насыпанного груза в транспортные средства, штабель склада и т.д.) [1, 2, 3]. При этом максимальное пыление имеет место при погрузке различных транспортных средств, так как трассы перемещения груза ленточными конвейерами и пневмоустановками герметично закрыты [3].

Для снижения пыления при погрузке судов и вагонов с помощью конвейерных и пневмотранспортных установок применяют вертикальные или круто наклонные трубы, через которые проходит струя падающего груза [1, 2].

**Цель исследования.** Создание физических моделей процессов пылеобразования при

перегрузке сыпучих грузов конвейерными и пневмотранспортными установками в морских и речных портах.

**Методы исследования.** Для достижения поставленной цели использовались методы физического моделирования, планирования эксперимента, статистическая обработка результатов экспериментов.

**Результаты исследования и их обсуждение.** Учитывая вышеизложенные, рассмотрим следующие процессы пылеобразования: процесс падения сыпучего груза с грузовой ветви конвейерных установок и истечения сыпучего груза из вертикальной или круто наклонной труб конвейерных и пневматических установок.

Совокупность определяющих параметров, характеризующих процесс падения сыпучего груза с грузовой ветви конвейерных установок, представлена в табл. 1.

Таблица 1

**Совокупность определяющих параметров, характеризующих процесс падения сыпучего груза с грузовой ветви конвейерных установок**

Наименование параметров	Обозначение	Единица измерения	Формула размерности	Обозначение масштабов подобия
Высота падения материала от грузовой ветви конвейера до преграды	$H$	м	$L$	$k_H$
Поперечное сечение груза на грузовой ветви конвейера	$S_0$	М <sup>2</sup>	$L^2$	$k_S$
Время работы конвейера	$t$	с	$T$	$k_t$
Скорость струи материала на выходе с грузовой ветви конвейера	$\vartheta_0$	м/с	$LT^{-1}$	$k_{\vartheta_0}$
Конечная скорость струи материала	$\vartheta_k$	м/с	$LT^{-1}$	$k_{\vartheta_k}$
Дисперсность материала	$d$	м	$L$	$k_d$
Ускорение свободного падения	$g$	м/с <sup>2</sup>	$LT^{-2}$	$k_g$

Процесс падения сыпучего материала с грузовой ветви конвейерных установок можно описать уравнением

$$f(H, S_0, t, \vartheta_0, \vartheta_k, d, g) = 0.$$

Для данного процесса количество критериев подобия будет равно  $n - r = 7 - 2 = 5$ , где  $n$  обозначает общее количество параметров процесса, а за величины с основными независимыми размерностями приняты  $S$  (м), и  $t$  (с), для которых  $A \neq 0$  [5, 6].

Критерии подобия исследуемого процесса будут иметь вид:

$$П_1^k = \frac{\vartheta_0^2}{g\sqrt{S_0}} = inv, П_2^k = \frac{H}{\sqrt{S_0}} = inv, П_3^k = \frac{d}{\sqrt{S_0}} = inv,$$

$$П_4^k = \frac{gt^2}{\sqrt{S_0}} = inv, П_5^k = \frac{\vartheta_0}{\vartheta_k} = inv$$

Критерий  $П_1^k$  есть не что иное, как критерий Фруда, который является основным критерием при моделировании процессов, в которых преобладают силы тяжести [5]. Критерии  $П_2^k$  и  $П_3^k$  характеризуют геометрическое подобие систем, а критерии  $П_1^k$ ,  $П_4^k$  и  $П_5^k$  - физическое подобие процессов падения струи материала и взвешивание частиц пыли.

На основе полученных критериев подобия можно составить критериальное уравнение процесса падения сыпучего груза с грузовой ветви конвейерных установок

$$\frac{\vartheta_0^2}{g\sqrt{S_0}} = f\left(\frac{H}{\sqrt{S_0}}, \frac{d}{\sqrt{S_0}}, \frac{gt^2}{\sqrt{S_0}}, \frac{\vartheta_0}{\vartheta_k}\right)$$

и соответствующие индикаторы подобия:

$$I_1^k = \frac{k_{\vartheta_0}^2}{k_g k_S^{0,5}} = 1, I_2^k = \frac{k_H}{k_S^{0,5}} = 1, I_3^k = \frac{k_d}{k_S^{0,5}} = 1, I_4^k = \frac{k_g k_t^2}{k_S^{0,5}} = 1, I_5^k = \frac{\vartheta_0}{\vartheta_k} = 1.$$

Для построения модели примем отношение модели к натуре, равным линейному масштабному коэффициенту  $k_l$ . При использовании в модельных исследованиях натурального сыпучего груза масштабы подобия  $k_d = k_g = 1$ , тогда процессы падения груза с грузовой ветви конвейерных установок в модели и натуре будут подобны при следующих значениях масштабных коэффициентов [7]:

$$k_H = k_l, k_t = k_l, k_{\vartheta_0} = k_{\vartheta_k} = k_l^{0,5}.$$

Чтобы процессы удара сыпучего груза о преграду и взвешивания частиц пыли в натуре и модели были подобны необходимо соблюсти равенство отношений начальных и конечных скоростей струи груза, то есть должно быть выполнено условие

$$\frac{\vartheta_0^H}{\vartheta_k^H} = \frac{\vartheta_0^M}{\vartheta_k^M} = k_l^{0,5}.$$

Формулы перехода от природы к модели по ряду параметров процесса падения сыпучего груза с грузовой ветви конвейерных установок представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Формулы перехода от природы к модели по ряду параметров процесса падения сыпучего груза с грузовой ветви конвейеров**

Параметры процесса	Формулы перехода	
	от природы к модели	от модели к природе
Высота $H$ падения материала	$H_M = H_H k_l^{-1}$	$H_H = H_M k_l$
Поперечное сечение $S_o$ груза на грузовой ветви конвейера	$S_M = S_H k_l^{-2}$	$S_H = S_M k_l^2$
Время $t$ работы конвейера	$t_M = t_H k_l^{-1}$	$t_H = t_M k_l$
Скорость $V_o$ струи материала на выходе с грузовой ветви	$\vartheta_o^M = \vartheta_o^H k_l^{-0,5}$	$\vartheta_o^H = \vartheta_o^M k_l^{0,5}$
Конечная скорость $V_k$ струи материала	$\vartheta_k^M = \vartheta_k^H k_l^{-0,5}$	$\vartheta_k^H = \vartheta_k^M k_l^{0,5}$
Дисперсность $d$ материала	$d_M = d_H$	$d_H = d_M$

Совокупность определяющих параметров, характеризующих процесс истечения сыпучего груза из вертикальных или круто наклонных труб конвейерных и пневматических установок, представлена в табл. 3 [7].

Процесс истечения сыпучего груза из вертикальной или круто наклонной трубы можно описать уравнением

$$f(H, S_o, t, \vartheta_o, \vartheta_c, D, \alpha_r, d, g).$$

Для данного процесса количество критериев подобия будет равно  $n - r = 9 - 2 = 7$ , где за величины с основными независимыми размерностями приняты  $S_o$  (м), и  $t$  (с), для которых  $\Delta \neq 0$  [6].

Таблица 3

**Совокупность определяющих параметров, характеризующих процесс истечения сыпучего груза из труб конвейерных установок**

Наименование параметров	Обозначение	Единица измерения	Формула размерности	Обозначение масштабов подобия
Высота падения материала от нижней части трубы до преграды	$H$	м	$L$	$k_H$
Поперечное сечение груза на грузовой ветви конвейера	$S_o$	м <sup>2</sup>	$L^2$	$k_S$
Время работы конвейера	$t$	с	$T$	$k_t$
Скорость струи материала на выходе с грузовой ветви	$\vartheta_o$	м/с	$LT^{-1}$	$k_{\vartheta_o}$
Скорость струи материала на выходе из трубы	$\vartheta_c$	м/с	$LT^{-1}$	$k_{\vartheta_c}$
Диаметр трубы	$D$	м	$L$	$k_D$
Угол наклона трубы к вертикали	$\alpha_m$	рад.	-	$k_{\alpha_m}$
Дисперсность материала	$d$	м	$L$	$k_d$
Ускорение свободного падения	$g$	м/с <sup>2</sup>	$LT^{-2}$	$k_g$

Критерии подобия исследуемого процесса будут иметь вид:

$$P_1^{к.т} = \frac{\vartheta_o^2}{g\sqrt{S_o}} = inv, P_2^{к.т} = \frac{H}{\sqrt{S_o}} = inv, P_3^{к.т} = \frac{d}{\sqrt{S_o}} = inv,$$

$$P_4^{к.т} = \frac{gt^2}{\sqrt{S_o}} = inv, P_5^{к.т} = \frac{\vartheta_o}{\vartheta_c} = inv, P_6^{к.т} = \frac{D}{\sqrt{S_o}} = inv, P_7^{к.т} = \alpha_r = inv.$$

Критерии  $P_2^{к.м}$ ,  $P_3^{к.м}$  и  $P_6^{к.т}$  характеризуют геометрическое подобие систем, а критерии  $P_1^{к.м}$ ,  $P_4^{к.м}$  и  $P_5^{к.м}$  - физическое подобие процессов истечения струи материала из вертикальной или круто наклонной трубы и взвешивание частиц пыли.

На основе полученных критериев подобия можно составить критериальное уравнение

процесса истечения сыпучего материала из вертикальной или круто наклонной трубы

$$\frac{\vartheta_o^2}{g\sqrt{S_o}} = f\left(\frac{H}{\sqrt{S_o}}, \frac{d}{\sqrt{S_o}}, \frac{gt^2}{\sqrt{S_o}}, \frac{\vartheta_o}{\vartheta_c}, \frac{D}{\sqrt{S_o}}, \alpha_r\right).$$

и соответствующие индикаторы подобия:

$$I_1^{к.т} = \frac{k_{\vartheta_o}^2}{k_g k_S^{0,5}} = 1, I_2^{к.т} = \frac{k_H}{k_S^{0,5}} = 1, I_3^{к.т} = \frac{k_d}{k_S^{0,5}} = 1, I_4^{к.т} = \frac{k_g k_t^2}{k_S^{0,5}} = 1,$$

$$I_5^{к.т} = \frac{k_{\vartheta_o}}{k_{\vartheta_o}} = 1, I_6^{к.т} = \frac{k_D}{k_S^{0,5}} = 1, I_7^{к.т} = k_{\alpha_r} = 1.$$

Для построения модели рассматриваемых процессов примем отношение модели к природе, равным линейному масштабному коэффициенту  $k_l$ , тогда процессы истечения груза из вертикальной

или круто наклонной трубы в модели и натуре будут подобны при следующих значениях масштабных коэффициентов:

$$k_H = k_D = k_l, k_t = k_l, k_{\vartheta_0} = k_{\vartheta_c} = k_l^{0,5}, k_{\alpha_T} = 1.$$

Чтобы процессы удара сыпучего груза о преграду и взвешивания частиц пыли в натуре и модели были подобны необходимо соблюсти определенное соотношение скоростей струи материала на выходе с грузовой ветви конвейера и

на входе из трубы, то есть должно быть выполнено условие

$$\frac{\vartheta_0^H}{\vartheta_c^H} = \frac{\vartheta_0^M}{\vartheta_c^M} = k_l^{0,5}.$$

Формулы перехода от натуре к модели по ряду параметров процесса истечения сыпучего груза из вертикальной трубы представлены в табл. 4.

Величина  $k_l$ , при которой модель будет адекватна натуре, определяется экспериментальным путем.

Таблица 4

**Формулы перехода от натуре к модели по ряду параметров процесса истечения сыпучего груза из вертикальной трубы**

Параметры процесса	Формулы перехода	
	от натуре к модели	от модели к натуре
Высота $H$ падения материала	$H_M = H_H k_l^{-1}$	$H_H = H_M k_l$
Поперечное сечение $S_0$ груза на грузовой ветви	$S_M = S_H k_l^{-2}$	$S_H = S_M k_l^2$
Время $t$ работы конвейера	$t_M = t_H k_l^{-1}$	$t_H = t_M k_l$
Диаметр $D$ трубы	$D_M = D_H k_l^{-1}$	$D_H = D_M k_l$
Угол $\alpha_m$ наклона трубы к вертикали	$\alpha_m^M = \alpha_m^H$	$\alpha_m^H = \alpha_m^M$
Скорость $\vartheta_0$ струи материала на выходе с грузовой ветви	$\vartheta_0^M = \vartheta_0^H k_l^{-0,5}$	$\vartheta_0^H = \vartheta_0^M k_l^{0,5}$
Скорость $\vartheta_c$ материала на выходе из трубы	$\vartheta_0^M = \vartheta_0^H k_l^{0,5}$	$\vartheta_c^H = \vartheta_c^M k_l^{0,5}$
Дисперсность $d$ материала	$d_M = d_H$	$d_H = d_M$

Экспериментальные исследования по определению величины  $k_l$  проводились на моделях конвейерных установок с вертикальными трубами, которые были выполнены в масштабе 1:5, 1:10 и 1:20, то есть значения линейного масштабного коэффициента были приняты  $k_l = 5; 10; 20$ .

В качестве груза использовался уголь марки АШ с влажностью 0,5...1%.

На рис. 1 представлена схема точек отбора проб воздуха на запыленность при работе конвейерной установки с вертикальной трубой, а на рис. 2 - оборудование для исследования данного процесса.

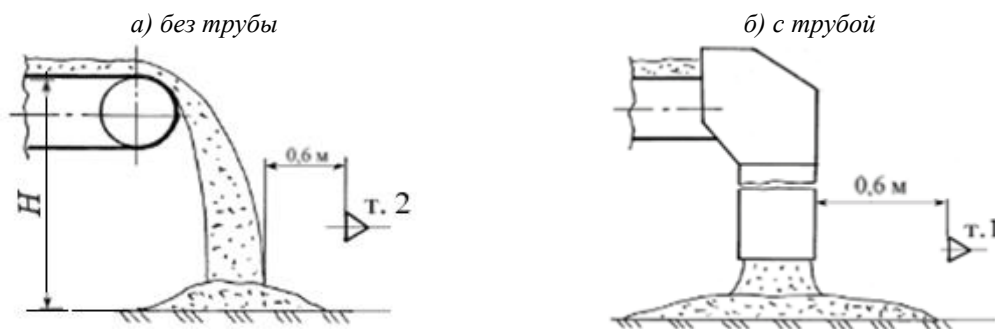


Рис. 1. Схема точек отбора проб воздуха на запыленность при работе модельного ленточного конвейера.

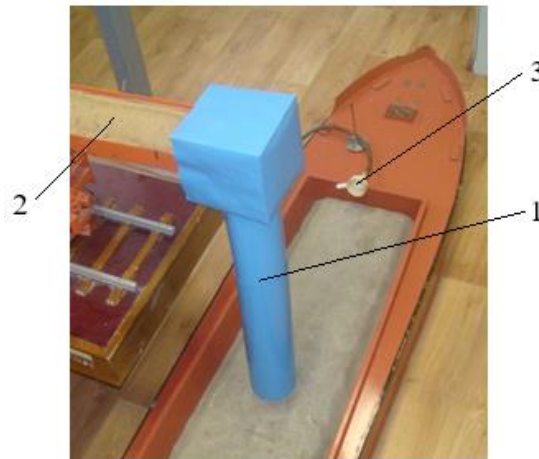


Рис. 2. Оборудование для исследования запыленности воздуха при работе конвейерной установки с вертикальной трубой: 1 – модель вертикальной трубы; 2 – модель ленточного конвейера; 3 – фильтр.

Замеры запыленности воздуха определялись весовым методом с помощью аспиратор марки В-822 и фильтров АФА-В-10.

Значения параметров процесса истечения груза из вертикальной трубы, принятые для

модельных исследований, представлены в табл. 5. Значения указанных параметров определены по формулам перехода от природы к модели (см. табл. 2 и табл. 4).

Таблица 5

**Значения параметров процесса истечения угля из вертикальной трубы, принятые для модельных исследований**

Наименование Параметра	Значение параметра для определенной величины $k_l$		
	$k_l = 5$	$k_l = 10$	$k_l = 20$
Поперечное сечение $S$ груза на грузовой ветви конвейера, м <sup>2</sup>	0,005	0,0012	0,0003
Диаметр $D$ трубы, м	0,2	0,1	0,05
Скорость $v_0$ струи материала на выходе с грузовой ветви конвейера, м/с	1,4	2,5	3,5
Высота $H$ падения груза, м	1,7	0,85	0,425

Результаты исследований процесса пылеобразования при работе модельных конвейерных установок с вертикальными трубами приведены в табл. 6.

Таблица 6

**Результаты исследований процесса пылеобразования при работе модельных конвейерных установок с вертикальными трубами**

Точка отбора проб	Запыленность воздуха, мг/м <sup>3</sup>			$\frac{q_n}{q_m} = k_l^{2,5}$			
	в натуре	в моделях					
			$k_l = 5$	$k_l = 10$	$k_l = 20$		
1	23	0,42	0,075	0,04	56	316	1799
2	90	1,58	0,280	0,12	57	320	750

Из данных табл. 6 следует, что:

- при значениях масштабного коэффициента  $k_l$ , равных 5 и 10, величины отношений запыленности воздуха в натуре и модели близки к расчетным значениям, что доказывает правильность теоретических предпосылок метода исследования процессов пылеобразования и принятых критериев подобия;

- при  $k_l = 20$  значения запыленности воздуха, полученные на модели, отличаются от натуральных значений на 32...42%.

При моделировании процессов пылеобразования при работе конвейерных

установок с вертикальными трубами для адекватности модели и природы значение масштабного фактора не должно превышать 10, то есть величина  $k_l \leq 10$ .

**Выводы.** Таким образом, основные положения метода исследования на моделях рассматриваемых процессов пылеобразования при работе пневматических и конвейерных установок можно сформулировать так:

- выполнять модель геометрически подобной натурному объекту, а значение масштабного фактора не должно превышать 10, то есть величина  $k_l \leq 10$  ;

- использовать при модельных исследованиях натуральный сыпучий груз;
- соблюдать условия подобия падения сыпучего груза с грузовой ветви конвейерных установок в модели и натуре;
- соблюдать условия подобия истечения груза из вертикальной или круто наклонной трубы в модели и натуре;
- соблюдать условия подобия удара сыпучего груза о преграду и взвешивания частиц пыли в натуре и модели;
- соблюдать одинаковыми в модели и натуре скорости ветровых потоков.

#### Список литературы

1. Суколенов А. Е., Зильдман В. Я. Установки для перегрузки навалочных грузов в морских портах. – М.: Транспорт, 1986. – 240 с.
2. Павлова, Е. И. Экология транспорта. - М.: Транспорт, 2000. – 248 с. - ISBN 5-277-02181-7.

УДК 577.1

---

### ИССЛЕДОВАНИЕ АНТИОКСИДАНТНЫХ И ПРООКСИДАНТНЫХ СВОЙСТВ БЕЛКОВЫХ ГИДРОЛИЗАТОВ РЖАНОЙ, НУТОВОЙ И ЛЮПИНОВОЙ МУКИ

---

*Худолева М. С., Красноштанова А. А.  
РХТУ им. Д. И. Менделеева, г. Москва*

*M. S. Khudoleeva, A. A. Krasnoshtanova  
MUCTR named after D. I. Mendeleev, Moscow*

В современном мире все более популярно становится потребление растительного белка и пищевых продуктов на его основе. Для получения качественного продукта необходимо установить, обладает ли сырье какими-либо негативными эффектами. В ходе данной работы было проведено изучение антиоксидантной активности белковых фракций, полученных из ржаной, люпиновой и нутовой муки, которая положительно сказывается на качестве продукта, и изучение прооксидантной активности, которая может оказывать негативное влияние на организм при попадании такого продукта внутрь. Установлено, что ни одна белковая фракция не обладает ярко выраженными прооксидантными свойствами. Результаты свидетельствуют о возможности использования белковых гидролизатов из ржаной, нутовой и люпиновой муки в качестве компонентов пищевых продуктов.

In the modern world, the consumption of plant-based protein and food products based on it is becoming increasingly popular. In order to obtain a high-quality product, it is necessary to determine whether the raw material has any negative effects. In this study, we examined the antioxidant activity of protein fractions obtained from rye, lupine, and chickpea flour, which has a positive impact on the quality of the product, and the pro-oxidant activity, which can have a negative effect on the body if the product is consumed. We found that none of the protein fractions has pronounced pro-oxidant properties. The results indicate that protein hydrolysates from rye, chickpea, and lupine flour can be used as components of food products.

**Ключевые слова:** белок, антиоксидантная активность, прооксидантная активность, рожь, люпин, нут  
**Keywords:** protein, antioxidant activity, pro-oxidant activity, rye, lupine, chickpeas

Белок выполняет в пищевых продуктах две основные функции: пищевую, или питательную, которая характеризует его биологическую ценность, и структурную. Последняя обеспечивает необходимую структуру, а также комплекс реологических и других физико-химических свойств перерабатываемых пищевых систем готовых продуктов [1-2].

Продукты питания, имеющие высокую антиоксидантную активность, повышают резистентность клеточных мембран, снижают действие стрессового фактора и могут обеспечить

3. Отделкин Н. С., Сикарев С. Н. Состояние воздушной среды при различных технологических схемах погрузки в суда пылящих грузов машинами непрерывного транспорта // Научные труды // Волжская гос. академия водн. трансп. – 2000. – вып. 293. – С. 172-175.

4. Бобровников, Н. А. Защита окружающей среды от пыли на транспорте. – М.: Транспорт, 1984. – 72 с.

5. Гухман, А. А. Введение в теорию подобия. - М.: Высшая школа, 1983. - 192 с.

6. Бусленко, Н. П. Моделирование сложных систем. –М.: Наука, 1976.- 146 с.

7. Отделкин, Н. С. Физическая модель процесса пылеобразования и подходы к моделированию пылевых выбросов при работе машин непрерывного транспорта с пылящими материалами // Материалы 1-ой Всероссийской научно-практической конференции «Морские и речные порты». – Москва, 2002, С. 28 – 34.

защиту организма при действии неблагоприятных факторов среды. Мембраны клеток наиболее чувствительны к действию различных агентов, и метаболические изменения в них могут быть использованы как объективный критерий для оценки функционального состояния организма. Антиоксидантную активность могут проявлять некоторые пептиды, содержащие в углеродной цепи от 5 до 16 аминокислотных остатков [3-4].

Прооксидантная активность белков заключается в их способности усиливать окислительный стресс за счёт генерации активных

форм кислорода. Прооксидант — это химическое вещество, которое вызывает окислительный стресс посредством генерации активных форм кислорода или блокировки антиоксидантных систем. Это наносит ущерб клеткам и тканям.

Поэтому при выборе сырья для приготовления продуктов питания следует особое внимание уделять тем белковым изолятам и гидролизатам, которые проявляют высокую антиоксидантную активность и низкую прооксидантную активность [5].

Таким образом, целью данной работы является изучение антиоксидантной и прооксидантной активности белковых фракций ржаной, люпиновой и нутовой муки.

#### Объекты и методы

В качестве объектов исследования использовали:

- Ржаную муку марки «Макфа» сорта обдирная с содержанием сырого протеина 10.6%;
- Нутовую муку производства ООО «Агрокомбинат Тамбовкрахмал», с содержанием сырого протеина 15.4%;
- Люпиновую муку производства ООО «Компаньон сити» с содержанием сырого протеина 42.2%.

Для извлечения белков из растительного сырья использовали метод экстракции. Для получения проламиновой фракции из ржаной муки в качестве растворителя использовался 70% этанол с гидромодулем мука:спирт 1:8. Альбуминовая и глобулиновая фракции экстрагировались совместно 1% раствором NaCl с гидромодулем 15 и последующем разделением. Из люпиновой муки альбумины и глобулины экстрагировались тем же растворителем, но с соотношением мука:раствор NaCl 1:8. Гидромодуль для экстракции альбумина и глобулина из нутовой муки составил 9.

Далее полученные экстракты подвергались ультрафильтрационному разделению по размеру молекул: 10кДа, 20кДа, 50кДа.

Содержание белка в экстрактах и фильтрах проверялось микробиуретовым метом.

Определение антиоксидантной активности проводили спектрофотометрическим методом с использованием реактива DPPH (1,1-дифенил-2-пикрилгидразил) в качестве донора свободных радикалов.

Аналитическую пробу с реактивом DPPH выдерживали 30 минут при комнатной

температуре, после чего измеряли оптическую плотность при длине волны 517 нм [6].

Антиоксидантную активность (АА, %) рассчитывали по формуле:

$$AA = \left( \frac{A_{\text{контроль}} - A_{\text{образец}}}{A_{\text{контроль}}} \right) * 100\%$$

где  $A_{\text{контроль}}$  – оптическая плотность раствора DPPH;  $A_{\text{образец}}$  – оптическая плотность образца после добавления DPPH.

Определение прооксидантной активности проводили спектрофотометрическим методом с использованием 0,25%-го раствора тиобарбитуровой кислоты (ТБК). Аналитическую пробу с реактивом (1%-й раствор Твина-80) выдерживали в термостате при 40°C в течение 48 часов.

После истечения времени инкубации добавляли для остановки реакции по 1 мл ТХУ и оставляли при комнатной температуре на 60 мин. Далее пробы центрифугировали при 8000 об/мин в течение 15 мин, 2 мл супернатанта смешивали с 2 мл ТБК и нагревали на водяной бане в течение 15 мин. При этом ТБК реагирует с малоновым диальдегидом (МДА) с образованием химического соединения, имеющего розовую окраску. Пробы охлаждали и измеряли оптическую плотность в кювете с толщиной поглощающего слоя 1 см при длине волны 532 нм [7].

Расчет прооксидантной активности (ПОА, %) производят по формуле:

$$ПОА = \left( \frac{E_{\text{оп}} - E_{\text{контроль}}}{E_{\text{оп}}} \right) * 100\%$$

где  $E_{\text{оп}}$  – экстинкция опытной пробы;  $E_{\text{контроль}}$  – экстинкция контрольной пробы.

#### Результаты и обсуждение

Антиоксидантная активность характеризуется способностью молекул нейтрализовать активные радикалы, которые приводят к быстрому окислению биомолекул. Показателем, который отражает антиоксидантную активность, является EC50 – концентрация образца, при которой происходит 50 % ингибирование радикалов DPPH. Результаты эксперимента представлены на рисунке 1.

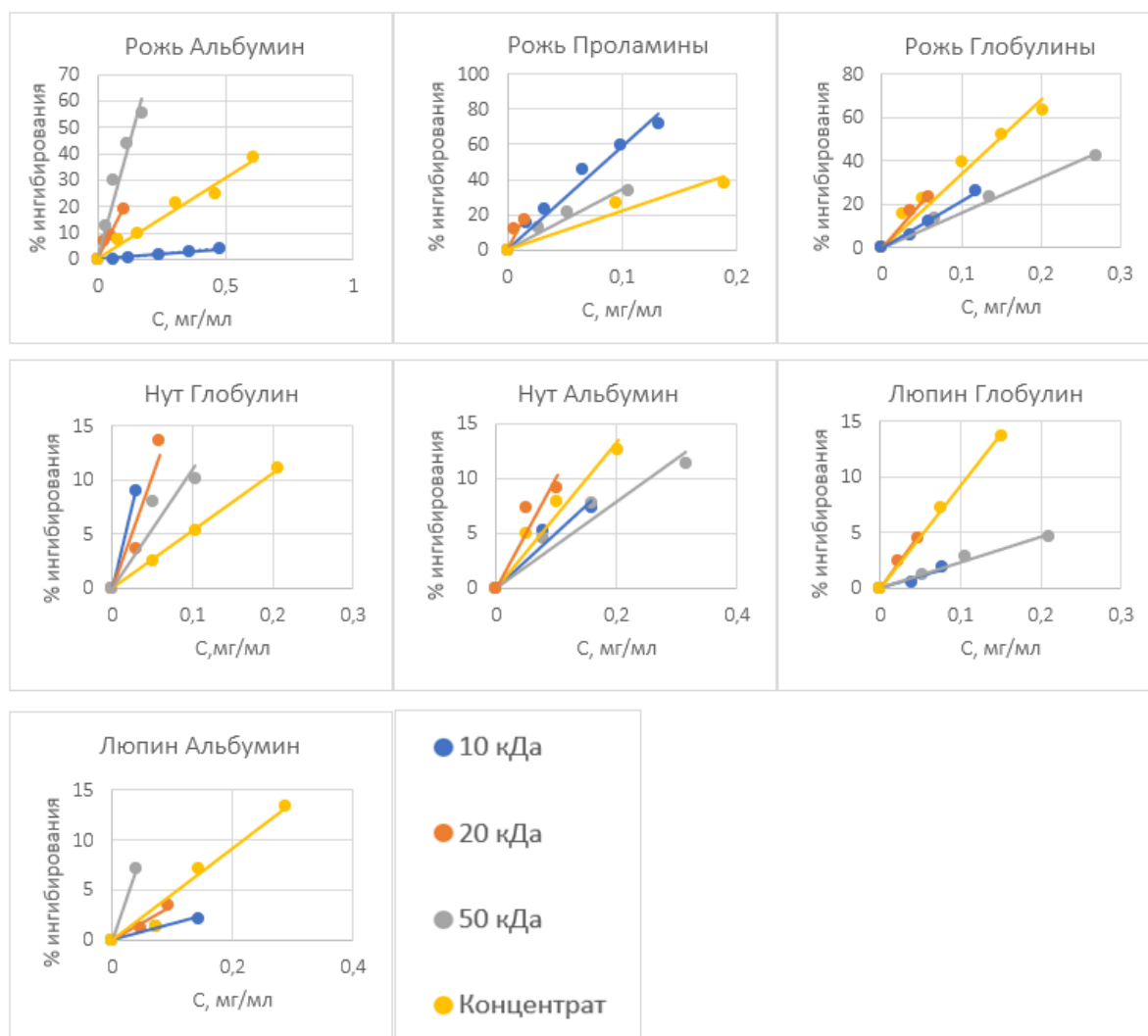


Рисунок 1 - Кривые определения антиоксидантной активности белковых гидролизатов.

Проведённый анализ позволил сравнить антиоксидантную активность исследуемых образцов с аскорбиновой кислотой (стандарт) на

основе значений EC50. В табл. 1 представлена информация об эквивалентах аскорбиновой кислоты на мг образца.

Таблица 1

Сравнения антиоксидантной активности

Образец	EC50, мг/мл	АОА, % от аскорбиновой кислоты
Аскорбиновая кислота	0.031	100
Проламины Ржи 10 кДа	0.085	36.47
Альбумины Ржи 50 кДа	0.142	21.83
Глобулины Ржи Концентрат	0.147	21.09

На основе полученных данных можно сделать вывод, что все фракции исследуемых белковых гидролизатов обладают низкой антиоксидантной активностью по сравнению с аскорбиновой кислотой: проламины ржи с массой 10 кДа (36.47%), альбумины ржи 50 кДа (21.83%) и концентрат глобулинов ржи (21.09%); или вообще не проявляют выраженной антиоксидантной активности, не достигая значения EC50.

Согласно литературным данным, пептиды, имеющие в своем составе такие аминокислоты, как

триптофан, тирозин, метионин, цистеин, гистидин, фенилаланин и пролин, проявляют антиоксидантные свойства [8]. В аминокислотном составе полученных белковых фракции, вероятно, имеется повышенное содержание данных аминокислот.

Далее все образцы были исследованы на наличие прооксидантной активности. Результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2

**Сравнение прооксидантной активности белковых гидролизатов.**

Образец	ПОА, %
Проламины Ржи 10 кДа	16.23
Проламины Ржи 20 кДа	14.29
Проламины Ржи 50 кДа	18.92
Проламины Ржи Концентрат	20.42
Альбумины Ржи 10 кДа	3.23
Альбумины Ржи 20 кДа	0.33
Альбумины Ржи 50 кДа	9.09
Альбумины Ржи Концентрат	0.66
Глобулины Ржи 10 кДа	6.25
Глобулины Ржи 20 кДа	9.09
Глобулины Ржи 50 кДа	6.25
Глобулины Ржи Концентрат	0.00
Альбумины Нута 10 кДа	11.76
Альбумины Нута 20 кДа	18.92
Альбумины Нута 50 кДа	19.57
Альбумины Нута Концентрат	14.29
Глобулины Нута 10 кДа	3.23
Глобулины Нута 20 кДа	21.05
Глобулины Нута 50 кДа	9.09
Глобулины Нута Концентрат	23.08
Альбумины Люпина 10 кДа	9.37
Альбумины Люпина 20 кДа	17.13
Альбумины Люпина 50 кДа	13.79
Альбумины Люпина Концентрат	3.85
Глобулины Люпина 10 кДа	0.00
Глобулины Люпина 20 кДа	9.09
Глобулины Люпина 50 кДа	11.76
Глобулины Люпина Концентрат	3.23

Результаты эксперимента показали, что ни один из образцов не обладает высокой прооксидантной активностью при концентрации 2 г/л.

**Заключение**

Таким образом, было проведено исследование наличия антиоксидантных и прооксидантных свойств у изолятов различных фракций белковых изолятов ржаной, нутовой и люпиновой муки. Определена антиоксидантная активность проламинов ржи с массой 10 кДа, альбуминов ржи 50 кДа и концентрата глобулинов ржи и установлено, что остальные фракции не обладают данным свойством. Так же установлено, что все образцы лишены прооксидантных свойств или они выражены слабо.

Несмотря на слабовыраженные антиоксидантные свойства это дает возможность использования изолятов белка ржи, нута и люпина в пищевой промышленности и для улучшения качества и питательности пищи.

**Список использованных источников**

1. Степанова А. А., Асякина Л. К. Мировое потребление белка и калорий: взаимосвязь с рационом и продукты для устранения дефицита // Пищевые системы. – 2025. – С. 180.
2. Степуро М. В., Лобанов В. Г. Роль функциональных свойств белков в пищевой промышленности // Известия вузов. Пищевая технология. 2007. №5-6. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rol-funktsionalnyh-svoystv-belkov-v-pischevoy-promyshlennosti> (дата обращения: 19.11.2025).
3. Набиева Ж. С., Кизатова М. Ж., Витавская А. В. Антиоксидантная активность растительного сырья как показатель потребительских свойств продуктов питания нового поколения // Технические науки – от теории к практике. – 2012. – №. 9. – С. 101-106.
4. Мельникова Е. И., Богданова Е. В., Корнеева Я. А. Антиоксидантная активность гидролизата сывороточных белков // Вестник ВГУИТ. 2020. №4 (86). URL:

<https://cyberleninka.ru/article/n/antioksidantnaya-aktivnost-gidrolizata-syvorotochnyh-belkov> (дата обращения: 19.11.2025).

5. Корнейчик, Т. В. Прооксидантная активность дереворазрушающих базидиомицетов в условиях твердофазного культивирования / Т. В. Корнейчик, А. Г. Мицкевич, А. Н. Капич // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия биологических наук. – 2010. – № 3. – С. 94-98. – EDN SWNZAW.

6. Сагпаева Ж. Б. и др. Антирадикальная и антимикробная активность тиосемикарбазидных и 1, 2, 4-триазольных производных гидроксибензойной кислоты //Биоорганическая химия. – 2020. – Т. 46. – №. 4. – С. 404-409.

7. Патент № 2146053 С1 Российская Федерация, МПК G01N 33/53, G01N 33/49, G01N 33/84. Способ определения прооксидантной активности биологического материала: № 97101937/14 : заявл. 10.02.1997 : опубл. 27.02.2000 / А. В. Молчанов, Л. П. Галактионова; заявитель Алтайский государственный медицинский университет. – EDN ZMPCPR.

8. Udenigwe C. C., Aluko R. E. Chemometric Analysis of the Amino Acid Requirements of Antioxidant Food Protein Hydrolysates // Int J Mol Sci. 2011. Т. 12, № 5. С. 3148–3161.

# Евразийский Союз Ученых.

## Серия: технические и физико-математические науки

Ежемесячный научный журнал

№ 6 (131)/2025 Том 1

### ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

**Макаровский Денис Анатольевич**

AuthorID: 559173

Заведующий кафедрой организационного управления Института прикладного анализа поведения и психолого-социальных технологий, практикующий психолог, специалист в сфере управления образованием.

### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

**Штерензон Вера Анатольевна**

AuthorID: 660374

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Институт новых материалов и технологий (Екатеринбург), кандидат технических наук

**Синьковский Антон Владимирович**

AuthorID: 806157

Московский государственный технологический университет "Станкин", кафедра информационной безопасности (Москва), кандидат технических наук

**Штерензон Владимир Александрович**

AuthorID: 762704

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Институт фундаментального образования, Кафедра теоретической механики (Екатеринбург), кандидат технических наук

**Зыков Сергей Арленович**

AuthorID: 9574

Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Отдел теоретической и математической физики, Лаборатория теории нелинейных явлений (Екатеринбург), кандидат физ-мат. наук

**Дронсейко Виталий Витальевич**

AuthorID: 1051220

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Кафедра "Организация и безопасность движения" (Москва), кандидат технических наук

Статьи, поступающие в редакцию, рецензируются. За достоверность сведений, изложенных в статьях, ответственность несут авторы. Мнение редакции может не совпадать с мнением авторов материалов. При перепечатке ссылка на журнал обязательна. Материалы публикуются в авторской редакции.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.

Художник: Валегин Арсений Петрович  
Верстка: Курпатова Ирина Александровна

Адрес редакции:  
198320, Санкт-Петербург, Город Красное Село, ул. Геологическая, д. 44, к. 1, литера А  
E-mail: [info@euroasia-science.ru](mailto:info@euroasia-science.ru) ;  
[www.euroasia-science.ru](http://www.euroasia-science.ru)

Учредитель и издатель ООО «Логика+»  
Тираж 1000 экз.