ЧЕБЫШЕВСКИЙ СБОРНИК

Том 20. Выпуск 2.

УДК 51.091

DOI 10.22405/2226-8383-2019-20-2-478-487

От доклассической физики к классической механике

Е. А. Зайцев

Зайцев Евгений Алексеевич — кандидат физико-математических наук, доцент, зав. сектором «Истории математики», Институт истории естествознания и техники им. С. И. Вавилова РАН (г. Москва).

e-mail: e_zaitsev@mail.ru

Аннотация

В рамках проблемы становления науки Нового времени рассмотрен вопрос о мотивах перехода от аристотелевской физики к классической механике в XVII веке. В основу различия этих двух форм естественнонаучного знания нами положено противопоставление идей: холизма, которым руководствовалось доклассическое естествознание, и редукционизма, ставшего базисом классической механики Нового времени. Отмечен редукционистский характер постулатов, лежащих в основе закона о параболической траектории брошенного тела, с открытия которого начинается научная революция XVII века. В их числе — принцип равномерного инерциального движения в горизонтальном направлении (в отсутствии влияния силы тяжести), закон свободного падения в вертикальном направлении под действием силы тяжести и закон параллелограмма сил и движений. Показано, что в доклассической физике, в силу ее ориентации на холизм, ни один из этих постулатов не мог быть выполнен. Исходя из положения, что теоретические построения в области механики движения вторичны по отношению к формам движения, реализуемым в практической механике, приведены аргументы в пользу тезиса о том, что холизм доклассической механики связан с применением в качестве «двигателей» мускульной силы человека и животных. Показано, что именно использование одушевленных двигателей, характерное для античности и средних веков, ведет к нарушению редукционистского принципа аддитивности сил, лежащего в основе классической механики. В заключение сделан вывод о том, что предпосылками идеи редукции явились новые виды движения, реализованные в практической механике XV–XVI вв. Это — подъемные устройства, использующие в качестве движущей силы силу тяжести, и кривошипно-шатунные механизмы, снабженные маховыми колесами. Устройства первого типа подводили к идее аддитивности сил, а второго — к возможности реализации равномерного движения.

Ключевые слова: физика Аристотеля, классическая механика, холизм, редукционизм, техническое движение, подъемные устройства, кривошипно-шатунный механизм.

Библиография: 15 названий.

Для цитирования:

Е. А. Зайцев. От доклассической физики к классической механике // Чебышевский сборник, 2019, т. 20, вып. 2, с. 478–487.

CHEBYSHEVSKII SBORNIK

Vol. 20. No. 2.

UDC 51.091

DOI 10.22405/2226-8383-2019-20-2-478-487

From pre-classical physics to classical mechanics

E. A. Zaytsev

Zaytsev Evgeny Alekseevich — Ph. D., Head of the Department of History of Mathematics, S. I. Vavilov Institute for the History of Science and Technology (Moscow).

e-mail: e_zaitsev@mail.ru

Abstract

In this article, within the framework of the general problem of the formation of modern science, the question of the transition from Aristotelian physics to classical mechanics in the 17th century is being considered. The distinction between these two forms of scientific approach to the study of nature is based on the opposition of ideas of holism, which guided the pre-classical natural science, and reductionism, which became the foundation of classical mechanics. The reductionist nature of the postulates underlying the law of the parabolic trajectory of the projectile, the discovery of which inaugurated the scientific revolution of the 17th century, is disclosed and emphasized. Among them - the principle of inertial motion in the horizontal direction (in the absence of gravity), the law of free fall in the vertical direction under the influence of gravity, and the law of the parallelogram of forces and motions. It is shown that none of these postulates could be fulfilled in pre-classical mechanics due to its holistic orientation. Proceeding from the hypothesis that the theoretical constructions in the field of mechanics are secondary in relation to the forms of motion realized in practical mechanics, it is established that holism is associated with the use of muscular strength of man and animals as working engines. It is shown that it is the use of animate engines (characteristic of antiquity and the Middle Ages) that underlies the violation of the principle of the additivity of forces, upon which classical mechanics is based. In conclusion, proceeding from the aforementioned hypothesis about the secondary nature of theoretical constructions, the thesis is argued that the technological prerequisites for the formation of the idea of reduction are new types of technical movement realized in practical mechanics in the 15th-16th centuries. These are lifting devices using gravity as driving force and crank-and-rod mechanisms equipped with flywheels. Devices of the first type led to the idea of additivity of forces, while of the second to the possibility of a uniform motion.

Keywords: Aristotle's physics, classical mechanics, holism, reductionism, technical movement, lifting devices, crank mechanism.

Bibliography: 15 titles.

For citation:

E. A. Zaytsev, 2019, "From pre-classical physics to classical mechanics", *Chebyshevskii sbornik*, vol. 20, no. 2, pp. 478–487.

1. Введение

В работах, посвященных становлению естествознания Нового времени, можно встретить тезис, согласно которому основное отличие доклассической физики Аристотеля (включая ее средневековые модификации) от классической механики XVII в. состоит в том, что первая

носит чисто качественный характер, тогда как вторая, напротив, использует количественные, в первую очередь, геометрические методы.

Такая точка зрения, вообще говоря, неточна, ибо в физике Аристотеля есть специальный раздел – так называемая «аристотелевская динамика», в которой движение под действием сил описывается в терминах непрерывных (геометрических) количеств, а именно, в виде закона прямой пропорциональной зависимости скорости от движущей силы и обратно-пропорциональной – от силы сопротивления. И хотя этот закон не носит, подобно законам классической механики, общезначимого характера (сам Аристотель накладывает на него существенные ограничения), сфера его применения, все же, весьма широка [1; 2]. Он описывает естественное движение тел под действием силы тяжести, т. е. их свободное падение («О небе» III 2, 300a25–301b1), и насильственное перемещение тяжелых тел под действием внешних сил («Физика» VII 5, 249b28–250a7).

Что касается средневековой натурфилософии, то в ней количественное описание движения применяется еще шире. Помимо пространственного перемещения (движения в категории «места») оно охватывает все прочие виды «движения» по Аристотелю, включая изменение свойств вещей (движение в категории «качества»), а также увеличение или уменьшение их размеров (движение в категории «количества»). Отличие от «динамики» самого Аристотеля состоит при этом в том, что движение описывается не простой (прямой или обратной пропорциональной) зависимостью скорости от движущих сил и сил сопротивления, а более сложным соотношением – так называемой «функцией Бравдвардина». В основе этой функции лежит представление о том, что скорость движения пропорциональна – говоря современным языком – логарифму отношения силы движения к силе сопротивления [3; 4].

Таким образом, отличие физики Аристотеля от классической механики не может быть сведено к указанию на качественный характер первой и количественный характер второй. Критерием различия доклассической и классической теории является их отношение к идее холизма: доклассическая механика исходит из представления о примате целого над своими частями, тогда как классическое естествознание XVII в., напротив, опирается на положение о сводимости целого к частям (о чертах холизма в средневековой натурфилософии см. [5]).

Холизм, как метафизический принцип, утверждает, что целое есть нечто принципиально отличное от своих частей и, следовательно, несводимое к ним («Метафизика» VIII 6, 1045a10). Кроме того, целое больше простой (механической) суммы своих частей, качества которых являются производными от формы этого целого. При их вхождении в состав целого части утрачивают свои собственные индивидуальные качества.

Следствием метафизического холизма является эпистемологический холизм, утверждающий, что познание целой «вещи» не сводится к познанию ее частей. Помимо знания о частях необходимо еще понимание «механизма», соединяющего их воедино [6]. В современном естествознании примером теории, обладающей характерными чертами холизма, служит химия. Так, соединение двух атомов водорода с одним атомом кислорода дает молекулу воды – вещества, обладающего свойствами, принципиально отличными от свойств составляющих его элементов, которые сами (в нормальных условиях) являются газами. Другим, еще более очевидным примером является биология, в которой механическое расчленение целого организма является недопустимым в силу того, что живой объект может при этом превратиться в мертвое тело.

В противоположность физике Аристотеля, стремящейся охватить изучаемый объект целиком, чтобы затем приступить к анализу его частей, классическая механика XVII в. начинает с вычленения самостоятельных, независимых друг от друга элементов, из которых затем будет конструироваться целое. В основе такого подхода лежит представление о том, что всякая «вещь» определяется совокупностью своих элементов и поэтому знание о ней может быть получено из знания об этих элементах. Элементы, согласно редукционизму, существуют до

целого в том же самом виде и с теми же самыми свойствами, что и в составе целого. Именно этот метафизический постулат и позволяет классической механике выделять части без соотношения с целым. Он санкционирует подход, в соответствии с которым вначале определяются свойства частей, а затем полученные результаты переносятся (по определенным правилам) на составляемый из них объект.

Таким образом, вопрос об истоках научной революции XVII в. может быть сформулирован как вопрос о мотивах отказа от холизма в пользу редукционизма в трактовке природного движения или, имея в виду механику, пространственного перемещения под действием сил.

2. Холизм доклассической механики и редукционизм классической механики

Противоположность холизма и редукционизма проявляется не только в различном отношении к неподвижной вещи, но и в различной оценке феномена движения. Все, что сказано выше о вещи, можно повторить и по отношению к движению.

В доклассической механике движение, обусловленное действием нескольких сил, рассматривается как явление *suī generis*, то есть, как целостный феномен, не допускающий сведения к элементарным перемещениям, вызываемым действием этих сил. Выделение в составе сложного движения элементарных перемещений, зная свойства которых, можно было бы составить представление о свойствах этого движения, считалось ненаучным, ибо – в соответствии с общей идеей холизма – перемещения, вызываемые частичными силами, при вхождении в состав сложного движения приобретали новые свойства, отличные от характеристик, которыми они обладали сами по себе.

В классической механике, напротив, основополагающим является представление о том, что познание составного движения осуществляется посредством его представления в виде совокупности (более точно – векторной суммы) перемещений, вызванных действием элементарных сил. Идея сведения составного движения к векторной сумме независимых перемещений, допускающих, в силу своей регулярности, описание в терминах математики, составляет методологическую основу количественного подхода к феномену движения.

Современный человек, прошедший школу классической механики, хорошо знаком с идеей редукции. Холизм, напротив, представляется ему чем-то совершенно чуждым, особенно для дисциплины, которая изучает пространственное движение. Поэтому наше изложение мы начнем с рассмотрения конкретных примеров, раскрывающих специфику аристотелевского холизма в отношении движения. После чего обсудим вопрос об исторических предпосылках идеи холизма в доклассической механике. В заключение будет проанализирован аналогичный вопрос по отношению к идее редукции в классической механике XVII века.

Методологически оправданным будет начать наше исследование с рассмотрения центрального события научной революции XVII века – с закона параболичности траектории брошенного тела, открытого Галилеем [7]. В его основе (или точнее, в основе его доказательства) лежат три постулата, каждый из которых имеет ярко выраженный редукционистский характер.

Первый постулат – это закон инерции в применении к горизонтальной компоненте движения; он говорит о том, что брошенное тело перемещается в горизонтальном направлении с постоянной скоростью (окончательно этот факт будет зафиксирован через столетия после работ Галилея в форме первого закона Ньютона). Второй постулат – это закон пропорциональной зависимости скорости от времени по отношению к вертикальной составляющей движения. Он говорит о том, что это движение сначала равномерно замедляется, а затем – после достижения высшей точки траектории, – равномерно ускоряется. Третий, и наиболее важный для идеи редукции постулат – это закон параллелограмма движений, в соответствии с которым всякое сложное перемещение в пространстве допускает разложение на независимые компо-

ненты. В применении к брошенному телу этот постулат означает, что его движение является векторной суммой двух движений, осуществляющихся, соответственно, в горизонтальном и вертикальном направлении. Первое из них происходит с постоянной скоростью, второе – с постоянным ускорением, сначала отрицательным, а затем положительным.

Редукционистский характер первых двух постулатов проявляется в принятии тезиса о принципиальной возможности выделения в составе сложного движения двух элементарных движений, осуществляющихся независимо, с одной стороны, одно от другого, а с другой – от общего результирующего движения. Основанием для этого служит представление о том, что горизонтальная компонента движения обладает абсолютно теми же свойствами, что и элементарное (прямолинейное) движение тела по горизонтали под действием начального толчка, а вертикальная – теми же свойствами, что и его свободное падение. (Что касается движения по горизонтали, то, на деле, сам Галилей имел в виду нечто иное, а именно, движение по окружности большого радиуса, центр которой находится в центре Земли; однако, этим обстоятельством можно пренебречь). Редукционистский характер третьего постулата, утверждающего, что сложное движение сводится к векторной сумме его элементарных компонент, следует из его формулировки и не требует пояснения.

В то время, как для нас эти постулаты представляются совершенно естественными, в доклассической механике дело обстоит с точностью до наоборот: ни один из них не мог претендовать на статус истинного суждения. Начнем с третьего постулата, в котором идея редукции выражена наиболее явно. Причина, по которой этот постулат не мог быть принят, состояла в том, что с точки зрения доклассического холизма элементарные движения должны были менять свои свойства при вхождении в состав сложного движения. Проиллюстрируем этот тезис конкретными примерами.

Движения, входящие в состав сложного движения, обусловленного действием нескольких сил, могут быть либо однонаправленными, либо разнонаправленными в зависимости от направления сил.

Начнем с рассмотрения случая, когда силы действуют в одном направлении. С точки зрения классической механики этот случай представляется тривиальным: в соответствии с законом сложения сил и движений результирующее движение есть сумма движений, вызываемых частичными силами (по сути, здесь идет речь об арифметической сумме обычных скалярных величин). Этот, совершенно естественный для классической механики, вывод должен был представляться для доклассической механики, по крайней мере, проблематичным. Дело в том, что в доклассической натурфилософии господствовало представление, согласно которому действие объединенных сил, направленных в одну и ту же сторону, могло возрастать непропорционально, то есть, приводить к результату, превосходящему сумму результатов, производимых каждой из этих сил в отдельности. Считалось, например, что совместное действие двух равных и одинаково направленных сил способно давать результат, больший удвоенного результата, достигаемого действием каждой из сил.

Можно выразить эту мысль еще и так: при совместном однонаправленном действии одна из движущих сил способна увеличивать действие другой.

Абсурдность такого представления, находившего свое оправдание в популярной латинской поговорке «объединенные силы растут, даже если они малы, а разрозненные убывают, даже если велики», не вызывает сомнения (с точки зрения классической механики). Ибо оно, по сути, отрицает важнейший принцип механики – положение об аддитивности физических сил и результатов их действий (примеры и подробное обсуждение этого необычного исторического феномена см. в [8; 9]).

В случае движения под действием сил, направленных в противоположные стороны, в доклассической механике действовал закон «аристотелевской динамики», в соответствии с которым скорость движения зависела от отношения силы движения к силе сопротивления. Для

рассматриваемого нами вопроса важно то, что силы при этом не считались независимыми.

Напротив, средневековые перипатетики, например, полагали, что, чем больше движущая сила и, соответственно, скорость вызываемого ею движения, тем меньше сила, которая сопротивляется движению. Они, в частности, считали, что сила, поддерживающая уже начатое телом движение, меньше силы, которая приводит это тело в движение из состояния покоя. Иными словами, в случае противоположно направленных сил одна из них могла ослабить действие другой.

Сходное представление распространялось и на случай движения под действием сил, направленных под углом; под него подпадает движение брошенного тела, на которое действует сила броска, с одной стороны (считалось, что действие этой силы продолжается в процессе движения), и сила тяжести, с другой. Доклассические теоретики полагали, что в случае сил, направленных под углом, одна из них способна ослабить действие другой.

Подобная точка зрения была распространена вплоть до конца XVI века. Так, непосредственный предшественник Галилея, итальянский физик Дж. Бенедетти (1530-1590) полагал, что импульс или «вложенная сила», которой обладает горизонтально брошенное тело, уменьшает действие силы тяжести, приводя к замедлению вертикального падения. Вот что он писал о движении брошенного мяча: «Чем быстрее движется мяч насильственным движением, тем большей склонностью к движению по прямой линии он обладает и поэтому тем меньше он стремится к центру мира и от этого становится легче» [10, р. 285].

Абсурдность такого представления с точки зрения классической механики совершенно очевидна: из него, например, следует, что из двух тел, имеющих одинаковый вес и находящихся на одной и той же высоте, брошенное в горизонтальном направлении упадет на землю позднее, нежели падающее свободно.

Обратимся теперь к идее инерциального движения и отношению к ней доклассической механики. В основе этой идеи лежит представление о существовании равномерного прямолинейного движения, осуществляющегося в отсутствии движущей силы. С точки зрения аристотелевского холизма такого движения в природе просто не могло существовать. Прежде всего, всякое движение в подлунном мире предполагает наличие движущего, находящегося в постоянном и непосредственном контакте с движимым. Иными словами, движимое и движущее составляют в движении единое целое. Во-вторых, в земных условиях в принципе невозможно движение тел по прямой линии, что связано с неустранимостью возникающих при этом акцидентальных воздействий. Так, Аристотель полагал, что в реальном физическом пространстве даже свободное падение под действием силы тяжести, направленной к центру Земли, не является строго прямолинейным (вертикальным) – в противном случае тяжелые тела распределялись бы равномерно по поверхности Земли, которая – случись такое – стала бы идеальной сферой, без впадин и возвышенностей. Что касается движения с постоянной скоростью, то оно считалось невозможным из-за того, что силы в физике Аристотеля (и, особенно, в ее средневековых модификациях) носили «одушевленный» характер, то есть трактовались по аналогии с животными силами [8; 9; 11, S. 57]. Движение под действием таких сил, подверженных естественной усталости, стремлению к покою, а также к объединению с себе подобными, должно было неизбежно протекать с нарушением регулярности и, значит, неравномерно. Сам Аристотель, в частности, утверждал, что в зависимости от вида движения максимум его скорости наступает либо в начале, либо в конце, либо в середине движения. В начале – когда тело бросают вертикально вверх, в конце – когда оно свободно падает вниз, и в середине – когда брошено под углом («О небе» II, 6; 288a17-24).

Второй постулат (закон свободного падения) также носит редукционистский характер: он предполагает возможность выделения в чистом виде движения с постоянным ускорением. С точки зрения доклассической физики такое движение представлялось проблематичным, ибо оно предполагало наличие постоянно и равномерно увеличивавшейся движущей силы. Обыч-

ная практика средневековых перипатетиков состояла в том, что они относили простейшие регулярные движения – равномерные, равноускоренные и равнозамедленные – не к природной, а виртуальной реальности, определяемой «абсолютным могуществом Бога» (*potentia Dei absoluta*) или, говоря философским языком, к разряду «логически возможного» (*possibile logicum*) [12]. Характерно, что когда гипотеза о равноускоренном характере падения была впервые сформулирована (это произошло в середине XVI в. в работе испанского схоласта Доминго де Сото), на нее просто не обратили внимания. Галилей, не знакомый с трудами де Сото, по сути, заново высказал эту гипотезу и, что еще более важно, обосновал ее.

3. Технологические предпосылки отказа от холизма и перехода к редукционизму

В заключение сформулируем ответ на вопрос о том, каковы причины того, что доклассическая механика следовала идее холизма, а классическая – редукционизма.

На протяжении веков теоретические представления о природном движении формировались, исходя из образов и понятий, которые возникали у человека в процессе целенаправленного преобразования природы или, конкретнее, при реализации им самим созданных, не встречающихся в природе технических движений. Именно в ходе практического преобразования естественных движений природы в искусственные движения машин и механизмов сначала подспудно, а затем все более осознанно шло формирование теоретических представлений о природном движении. Сказанное означает, что идеализации, которыми пользовалась теоретическая механика доклассического периода, так или иначе были связаны с теми формами технического движения, которые удалось практически реализовать в эту эпоху.

Какие из этих форм или характеристик технического движения были определяющими для идеи холизма? Важнейшей характеристикой технических движений, реализованных в античности, являлся тот факт, что источником этих движений была почти исключительно одушевленная сила, то есть, мускульное усилие людей или тягловых животных. Именно это обстоятельство стало ключевым фактором формирования идеализаций античной механики.

Средневековые не внесли существенных изменений в структуру этих идеализаций. Хотя в этот период и началось активное применение неодушевленных природных сил (воды и ветра), радикального перелома во взглядах на движение все же не произошло. Дело в том, что средневековые перипатетики распространяли на эти силы привычные анималистические представления, иными словами, неорганические силы природы они трактовали по аналогии с ее животными силами. Анимализм в этот период распространялся даже на такую чисто механическую силу, как сила тяжести, в действии которой позднеантичные и средневековые натурфилософы «находили» те же нерегулярности и нарушения аддитивности, что и при действии одушевленных сил. В основе представления о неаддитивности сил лежал вполне реальный факт из механической практики того времени: совместное человеческое усилие, прилагаемое к «машине-двигателю» (термин Маркса), действительно, могло давать результат, который превосходил механическую сумму результатов индивидуальных усилий [8; 9; 13; 14].

Изменить такое положение вещей могло, во-первых, использование в качестве двигателей не одушевленных, а чисто механических сил, и, во-вторых, применение регулирующих устройств, способных устранить нерегулярности движения, вызванные одушевленными силами (в тех случаях, когда не представлялось возможным заменить одушевленные силы на механические).

Именно это и произошло в XV-XVI вв. В этот период были впервые реализованы новые виды технического движения, ставшие практической основой идеи редукции.

Прежде всего, это – движения, осуществляемые механизмами, в которых в качестве машины-двигателя использовалась сила тяжести. Среди этих механизмов – подъемные устрой-

ства с противовесом, роль которого состояла в уравнивании груза перед его перемещением.

Во-вторых, это – сложные движения, реализуемые в кривошипно-шатунных механизмах с целью преобразования возвратно-поступательного движения во вращательное и наоборот. Важнейшим техническим элементом этих механизмов служило маховое колесо, демпфирующее неравномерности вращения (в средние века использовались почти исключительно маховые грузы, которые были не так эффективны).

Значение подъемных устройств, снабженных противовесом, широкое использование которых начинается с XV в. (оно связано со строительством городов и портов морской торговли), определяется тем, что в них в качестве двигателя применялась не мускульная, а механическая сила – сила тяжести или вес. В отличие от одушевленных сил, совокупное действие которых не поддается количественной оценке, вес обладает свойством аддитивности, что и позволяет применять количественный анализ для описания вызываемых им движений.

Есть еще одно важное обстоятельство, связанное с заменой мускульной силы на силу тяжести. В подъемных устройствах античности и средневековья сила движения (человеческое усилие) и сила сопротивления (вес поднимаемого груза) были неоднородными, что служило принципиальным препятствием для определения количественных соотношений между самими силами и параметрами вызываемых этими силами движений. С появлением подъемных устройств, снабжаемых противовесом, это препятствие, веками тормозившее использование количественных методов, было, наконец, устранено. Приведение силы движения и силы сопротивления к «общему знаменателю», в роли которого выступила сила тяжести, сделало возможным количественное сравнение двух – теперь ставших однородными – факторов движения. Выйдя на авансцену технического движения, сила тяжести стала впоследствии считаться силой *par excellence* и в теоретической механике. Со временем на свойства этой силы стали ориентироваться при описании всех прочих механических сил (эта традиция сохраняется и в современных учебниках классической механики).

Еще одним важным фактором становления идей классической механики явилось то обстоятельство, что в устройствах, снабжаемых противовесом, перемещение груза (после его предварительного уравнивания) осуществлялось посредством минимальной силы, значительно меньшей самого груза. Теоретически эта сила вообще могла быть «бесконечно малой». Практическая реализация движения, вызываемого «бесконечно малой» силой, ставила под сомнение традиционный тезис Аристотеля «все, что движется, движется чем-то другим» и, одновременно, подводила к идее инерциального движения [8; 9].

Что касается кривошипно-шатунных механизмов с маховым колесом, широкое использование которых также началось в XVI–XVII вв., то их теоретическое значение состояло в том, что маховое колесо демпфировало естественные неравномерности вращения и тем самым подводило к мысли о принципиальной возможности движения с постоянной скоростью [13; 14]. Кроме того, преобразование нерегулярного возвратно-поступательного движения в равномерное и непрерывное вращение, реализуемое в этих механизмах, дало наглядный пример нарушения еще одного постулата аристотелевской физики – тезиса о том, что между двумя фазами возвратно-поступательного движения обязательно наступает так называемый «промежуточный покой» (*quies media*) [15].

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hussey E. Aristotle's Mathematical Physics. In: Aristotle's Physics: a Collection of Essays (ed. L. Judson). – Oxford: Clarendon Press, 1991, 213–242.
2. Gregory A. Aristotle, Dynamics and Proportionality // Early Science and Medicine. 2001. Vol. 6, 1–21.

3. Bradwardine Th. *Tractatus de Proportionibus*, Its Significance for the Development of Mathematical Physics (ed. H. L. Crosby). – Madison: University of Wisconsin Press, 1955.
4. Murdoch G. E., Sylla E. D. The Science of Motion. In: *Science in the Middle Ages* (ed. D. Lindberg). – Chicago: University of Chicago Press, 1978, 206–264.
5. Molland G. The Oresmian Style: Semi-Mathematical, Semi-Holistic. In: Molland G. *Mathematics and Medieval Ancestry of Physics*. – Aldershot: Variorum reprints, 1995, 13–30.
6. Зайцев Е. А. Категория количества в физике Аристотеля, средневековой натурфилософии и немецкой классической философии. В кн.: *Математика и реальность. Труды Московского семинара по философии математики* (Под ред. В. А. Бажанова и др.). – М.: Изд-во МГУ, 2014, 348–375.
7. Koyre A. *Etudes galileennes*. – Paris: Hermann, 1966.
8. Зайцев Е. А. Технологические предпосылки научной революции XVII в. В кн.: Э. В. Ильенков и проблема человека в революционную эпоху. Материалы XIX Межд. конф. «Ильенковские чтения». М., 2017, 266–274.
9. Зайцев Е. А. Всеобщее содержание природы в зеркале развития практической механики // *Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия «Философия. Социология. Право»*. 2017. Вып. 41, 12–19.
10. Benedetti G. B. *Diversarum speculationum mathematicarum et physicarum liber*. – Taurini, 1585.
11. Maier A. *Die Vorläufer Galileis im 14. Jahrhundert*. – Roma: Edizioni di storia e letteratura, 1949.
12. Зайцев Е. А. У истоков теоретической механики: история превращения технического искусства в научную дисциплину // *Институт истории естествознания и техники им. С. И. Вавилова РАН. Годичная научная конференция 2015. Т. 1*. М., 2015, 132–141.
13. Зайцев Е. А. Искусственное и природное: концепция идеального Ильенкова и история механики. В кн.: *Философия Э. В. Ильенкова и современность. Материалы XVIII Межд. конф. «Ильенковские чтения»*. Белгород, 2016, 42–46.
14. Зайцев Е. А. Идеальное движение // *Научный результат. Социальные и гуманитарные исследования*. 2016. Т. 2, № 2(8), 34–42.
15. Зайцев Е. А. Предпосылки открытия параболической траектории движения брошенного тела (вопрос о «промежуточном покое») // *Историко-математические исследования. Вторая серия*. 2018. Вып. 16 (51), 282–299.

REFERENCES

1. Hussey E. 1991, “Aristotle’s Mathematical Physics”, *Aristotle’s Physics: A Collection of Essays* (ed. L. Judson). Clarendon Press, Oxford, 213–242.
2. Gregory A. 2001, “Aristotle, Dynamics and Proportionality”, *Early Science and Medicine*. Vol. 6, 1–21.
3. Bradwardine Th. 1955, *Tractatus de Proportionibus*, Its Significance for the Development of Mathematical Physics (ed. H. L. Crosby). Univ. of Wisconsin Press, Madison.

4. Murdoch G. E., Sylla E. D. 1978, "The Science of Motion", Science in the Middle Ages (ed. D. Lindberg). University of Chicago Press, Chicago, 206–264.
5. Molland G. 1995, "The Oresmian Style: Semi-Mathematical, Semi-Holistic", Molland G., Mathematics and Medieval Ancestry of Physics. Variorum reprints, Aldershot, 13–30.
6. Zaytsev E. A. 2014, "The Category of Quantity in the Physics of Aristotle, Medieval Natural Philosophy and Classical German Philosophy", Matematika i realnost. Trudy Moskovskogo seminara po filosofii matematiki (Mathematics and Reality. Proc. of the Moscow Seminar on the Philosophy of Mathematics). Moscow State University, Moscow, 348–375.
7. Koyre A. 1966, Etudes galileennes. Hermann, Paris.
8. Zaytsev E. A. 2017a, "Technological Prerequisites for the Scientific Revolution of the 17th C.", E. V. Ilyenkov I problema cheloveka v revoliutsionnuu epokhu. Materialy XIX Mezhdunarodnoy konferentsii "Ilyenkovskie chteniya" (E. V. Ilyenkov and the Problem of Man in the Epoch of Revolution. Proc. 19th Int. Conf. "Ilyenkov's Readings"). Moscow, 2017, 266–274.
9. Zaytsev E. A. 2017b, "The Universal Content of Nature in the Mirror of Practical Mechanics", Nauchnye Vedomosti Belgorodskogo Gos. Univ., Ser. "Filosofiya, Sotsiologiya, Pravo", Issue 41, 12–19.
10. Benedetti G. B. 1585, "Diversarum speculationum mathematicarum et physicarum liber", Taurini.
11. Maier A. 1949, "Die Vorläufer Galileis im 14. Jahrhundert", Edizioni di storia e letteratura, Roma.
12. Zaytsev E. A. 2015, "The Origins of Theoretical Mechanics: a History of the Transformation of the Technical Art in a Scientific Discipline", Institut istorii estestvoznaniya i tekhniki im. Vavilova RAN. Godichnaya nauchnaya konferentsiya 2015. Vol. 1. Moscow, 132–141.
13. Zaytsev E. A. 2016a, "Artificial and Natural: the Concept of the Ideality by Ilyenkov and History of Mechanics", Filosofiya E. V. Ilyenkova i sovremennost. Materialy XVIII Mezhdunarodnoy konferentsiy «Ilyenkovskie chteniya» (The Philosophy of E. V. Ilyenkov and Modernity. Proc. 18th Int. Conf. "Ilyenkov's Readings"). Belgorod, 2016, 42–46.
14. Zaytsev E. A. 2016b, "The Ideal Movement", Nauchnyy rezultat. Sotsialnye i gumanitarnye issledovaniya. Vol. 2. № 2(8), 34–42.
15. Zaytsev E. A. 2018, "The Prerequisites for the Discovery of the Parabolic Shape of Projectile Motion (the Problem of "Intermediate Rest")", Istoriko-matematicheskie issledovaniya. 2nd Series. Issue 16 (51), 282–299.

Получено 18.03.2017 г.

Принято в печать 12.07.2019 г.