ИННОВАЦИИ И ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРОИТЕЛЬНОЙ НАУКИ И ПРОИЗВОДСТВА

УДК [001:69]:93

DOI: 10.22227/2305-5502.2020.1.1

Истоки зарождения строительной науки с древних времен

Е.В. Сысоева

*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
(НИИВ МГСУ); г. Москва, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Многовековое постепенное создание строительной науки основано на многочисленных открытиях, ошибках и законах философов, математиков, инженеров, архитекторов и ученых других областей. Предмет исследования — история трансформации строительной науки с древних времен и ее зависимость от исторических событий, территориальности, открытий. Цель — детальный анализ истории строительной науки для определения перспективных направлений в ее развитии.

Материалы и методы. Используются систематизация, метод сопоставления, теоретического обобщения полученных в литературных источниках данных.

Результаты. Проведен анализ исторических литературных источников отечественных и зарубежных авторов, посвященных вопросам становления и эволюции строительной науки, начиная с работ древних мыслителей и философов и заканчивая работами современных ученых. Представлены четыре этапа создания и развития теории расчета и конструирования отдельных строительных конструкций и зданий в целом, которые привели к разработке механизма проектирования зданий и сооружений на современном уровне. Дана подробная информация о древних ученых, начиная со II тысячелетия до н.э., их вкладе в создание теории проектирования. Отмечены важнейшие труды древних философов и математиков всего мира, которые повлияли на развитие теории проектирования. Показаны примеры и фотографии сохранившихся уникальных зданий и сооружений, построенных в каждый период. Каждый этап развития инженерной науки иллюстрируется примерами реальных зданий с их конструктивным описанием. Рассмотрены основные достижения специалистов в области строительной механики и проектирования зданий в пределах каждого этапа. Прослежен путь зарождения и становления строительной науки с момента появления письменности.

Выводы. Приведены перспективы развития строительной инженерной науки с учетом последних докладов Российской академии архитектуры и строительных наук.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: строительная наука, математика, прикладная наука, строительная механика, здания и сооружения, проектирование, древнее время

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Сысоева Е.В. Истоки зарождения строительной науки с древних времен // Строительство: наука и образование. 2020. Т. 10. Вып. 1. Ст. 1. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2020.1.1

Tracking the origin of civil engineering as a science since ancient times

Elena V. Sysoeva

*Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. The gradual progressive evolvement of civil engineering as a science was nurtured by numerous discoveries, errors and regularities contributed by philosophers, mathematicians, engineers, architects, and researchers focused on versatile areas of knowledge. The author analyzes the transformation of civil engineering as a science since ancient times, as well as its dependence on historical events, territoriality, and discoveries. The objective of the research, covered by the article, consists in the detailed analysis of the history of civil engineering and the prognostication of its future development pattern.

Materials and methods. The author employed systematization, benchmarking, and theoretical generalization of the information collected from literary sources.

Results. The author has analyzed a number of Russian and foreign literary sources covering the formation and evolution of the civil engineering science, beginning with the works of ancient thinkers and philosophers and ending with the works of contemporary researchers. The author breaks down the history of analysis/design of buildings/structures into four development phases that have evolved into the present-day design procedure. The author also provides detailed information on ancient scholars, starting from those who lived in the second millennium B.C., and their contribution into the theory of building design. She highlights the most important works written by ancient philosophers and mathematicians all over the world, particularly those who influenced the development of the design theory. The author provides examples and photos of still-standing unique buildings and structures that date back to each development phase. Every step of civil engineering development is illustrated by buildings and descriptions of their constructions. The author also analyzes the most prominent

attainments made in the field of structural mechanics and design of buildings at each development stage. She has tracked the evolvement of civil engineering since the inception of written language.

Conclusions. The author analyzes the prospects for the development of the civil engineering science with account for the most recent reports issued by the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences.

KEYWORDS: civil engineering science, mathematics, applied science, structural mechanics, buildings and structures, design, ancient times

FOR CITATION: Sysoeva E.V. Tracking the origin of civil engineering as a science since ancient times. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2020; 10(1):1. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2020.1.1 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Путь появления и совершенствования строительной науки состоял из многих ступеней, включающих появление новых орудий труда, создание промышленности, рост населения в городах, необходимость в новых строительных материалах и многое другое.

Зарождение строительной науки тесно связано с возникновением не только математики и умения измерять, но и письменности, изменениями и трансформацией технических приспособлений для калькуляции.

Появление письменности и системы счисления дало возможность первым философам, математикам и мыслителям делать элементарные калькуляции, записывать свои мысли и создавать аналитические формулы зависимости физических, геометрических, химических и других величин.

Прогресс строительной науки зависел от исторических событий, происходящих в мире, климатических условий территорий, на которых происходило то или иное открытие. Поэтому в разных частях планеты открытия не могли осуществляться синхронно, а отсутствие передачи информации долгое время не давало возможности развиваться науке с желаемой для ученых скоростью.

Для понимания очередного открытия проходили десятилетия, а иногда и столетия.

Только появление быстрой передачи информации между странами и континентами, между учеными разных стран сделало возможным анализировать имеющиеся открытия, совершенствовать их, модифицировать для нужд своей страны, климата, территории.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для изучения этапов развития строительной науки, выяснения причин замедления или ускорения прогресса на исторических ступенях строительной науки был проведен аналитический анализ исторических документов — начиная с трудов Ямвлиха¹ [1–4], Порфирия [5] и трактата Диогена

Лаэртского (книга VIII) до проекта Стратегии развития строительной отрасли Российской Федерации до 2030 года.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Первые математические тексты, которые историки относят ко II тысячелетию до н.э., египтяне писали на папирусе (рис. 1).

После формирования системы счисления человек начинает мыслить категориями чисел, т. е. старается все мысли о строительстве привести к определенному числу. Понятия «ширина», «толщина», «глубина» получают математический смысл. Например, мерой длины на Руси в различные исторические периоды были верста, сажень, локоть, аршин, фут, пядь, вершок, дюйм, линия и их производные. Но только через одиннадцать веков, в 1960 г., на Генеральной конференции по мерам и весам была принята Международная система единиц. С 1963 г. этой системой пользуются во всех областях науки, в том числе и в строительстве.

Для понимания истоков современной теории расчета при проектировании сооружений необходимо обратиться к древним временам и разобраться, какие события, изобретения и открытия повлияли на современную науку строительного проектирования.

В современном мире строительная наука использует такие составляющие, как сопротивление материалов, теоретическая механика, теория упругости, пластичности и ползучести, строительная механика, динамика сооружений, материаловедение, и многие другие.

Вместе с эмпирическими расчетами древних архитекторов и ученых началось зарождение науки математики.

Главными трудами древних ученых, мыслителей и математиков в течение пятнадцати веков (с VI в. до н.э. до IX в. н.э.) были Пифагор (596–500 гг. до н.э.), Евдокс (408–355 гг. до н.э.), Аристотель (384–322 г. до н.э.), Архимед (287–212 гг. до н.э.), Евклид (III в. до н.э.), Герон (I в. н.э.), Клавдий Птолемей (II в.), Иоанн Филопон (VI в. н.э.), Лев Математик (IX в.) и др.

Наука развивалась на опыте строительства уникальных объектов — храмов, колоколен, церквей,

¹ Ямвлих. О Пифагоровой жизни. М.: Алетея, 2002. 76 с. URL: https://royallib.com/book/yamvliih/o_pifagorovoy_gizni.html

Рис. 1. Первый папирус Ринда с изображением 84 математических задач из Среднего царства культуры (2040 и 1640 г. до н.э.)

а также за счет необходимости фортификации городов, строительства крепостных стен, крепостей, мостов и гидротехнических сооружений. В этот огромный исторический период строительная наука искала свои начала в математике, физике, химии.

Создание Пифагором первой школы в г. Кротоне (Италия) разрушило древнее мифологическое мировоззрение античного человека и создало базу для университетов. Заслугой Пифагора было не только основание математики как науки, но и появление большого количества его учеников и последователей. В век полного отсутствия возможности передавать информацию это было не менее важно, чем сами открытия.

Пифагор впервые после предположения Фалеса (624–547 гг. до н.э.) ввел в математику «доказательство», которое следует за «предположением» [6]. Еще одно важное открытие для создания строительной науки Пифагора связано с важностью того, что целых чисел 1, 2, 3... недостаточно для математических построений.

Аристотель написал дошедший до нас трактат, посвященный механике «Механические задачи» [7, 8], изучая понятие «сила», которое было в дальнейшем изменено и доработано² [9, 10].

Архимед смог преодолеть множество препятствий, противоречия философам своего времени и использовав все достижения математиков за предыдущие двадцать пять столетий. Он применил свой метод определения центров тяжести тел для конструирования различных подъемных механизмов при строительстве зданий.

Евдокс³ создал теорию геометрических величин⁴, которая была неоднократно пересмотрена и доработана математиками будущего.

В своей итоговой работе «Начала» Евклид смог подытожить труды своих предшественников, подробно изложив многие математические вопросы, в том числе стереометрию и некоторые вопросы теории чисел, что повлияло на дальнейшее создание не только математики как чистой науки, но и прикладной, в том числе для строительного проектирования [11].

В этот исторический период интенсивно строились такие капитальные каменные здания и фортификационные сооружения, как мечети и минареты, крепостные стены и дворцы, театры и амфитеатры, используемые для массовых мероприятий: мечеть Аль-Акса (Иерусалим, Израиль, 967–963 гг. до н.э.), мечеть Омейядов (Дамаск, Сирия, 715 г.), театр Бальба⁵ (Рим, Италия [14] 13 г. до н.э.), театр в Аре-

² Aristotle-Werner Jaeger: Aristotle: Fundamentals of the History of his Development. Translated with the author's corrections and additions by Richard Robinson. Pp. 475. Oxford: Clarendon Press, 1948. Cloth, 21s. net. URL: <https://www.cambridge.org/core/journals/classical-review/article/aristotle-werner-jaeger-aristotle-fundamentals-of-the-history-of-his-development-translated-with-the-authors-corrections-and-additions-by-richard-robinson-pp-475-oxford-clarendon-press-1948-cloth-21s-net/91E9A2D3070244306E7A4EE2A10F173B>

³ Зайцев А.И. Роль Евдокса Книдского в становлении астрономической науки в Древней Греции // Некоторые проблемы истории античной науки: сб. науч. тр. / отв. ред. А.И. Зайцев, Б.И. Козлов. Л.: Главная астрономическая обсерватория, 1989. С. 116–120.

⁴ Boyer Carl B. A history of mathematics. 2nd ed. John Wiley & Sons, 1991. P. 92.

⁵ Широков В.С. Галилей и средневековая математика // Историко-математические исследования. М., 1979. № 24. С. 88–103.

лате (Арль, Франция, 30–15 гг. до н.э.), Римский театр (Кадис, Испания, I в. до н.э.), театр Марцелла (Рим, Италия, I в. до н.э.), Колизей (Рим, Италия, 72–80 гг. до н.э.), Одеон (Эфес, Турция, II в. н.э.) и многие другие. Все они имели вместимость от 1,5 до 50 тыс. человек.

Яркий пример такого здания, сохранившегося до настоящего времени, — амфитеатр Босра в Сирии, построенный во II в. н.э. Вместимость зала составляет 15 тыс. человек. Длина сцены — 45 м, глубина — 8 м. Материал — натуральный камень, который не позволял перекрывать большие безопорные пространства. В здании театра выступали цирковые и драматические артисты, проходили бои гладиаторов. По данным древних летописей, театр покрывали шелковой тканью, которая предохраняла зрителей от зноя и дождей (рис. 2).

Театр Бальбы, построенный в 13 г. до н.э., имел вместимость 11 тыс. 510 человек и сцену $D = 90$ м. Впервые был предусмотрен туалет и место для ожидания во время непогоды (рис. 3).

Рис. 2. Амфитеатр Босра (Босра, Сирия, II в. н.э.)

К VII в. н.э. введены геометрические построения при помощи циркуля, начали разрабатываться метрические понятия (рис. 4).

После четырех векового затишья в XI в. появляются первые университеты в Салерно и Болонье. Видными математиками Средневековья, чьи труды оказали влияние в дальнейшем на строительную науку, были Леонардо Пизанский (XIII в.); философы и математики Роберт Гроссетест и Роджер Бэкон, продвигавшие идею необходимости экспериментальных исследований для науки; Иоганн Мюллер, развивавший тригонометрию (XV в.). Все эти ученые повлияли на создание университетов во многих крупных городах мира: Прага, Краков, Вена, Гейдельберг, Лейпциг, Базель и др. [15, 16].

В XI в. впервые введен первый кодекс требований к строительству зданий в Киевской Руси, направленный в основном на противопожарные меры.

Весь период до Средних веков можно назвать подготовительным периодом в создании строительной науки.

Рис. 3. Макет театра Бальба и крипты (диаметр сцены 90 м, вместимость 11 тыс. 510 чел., 13 г. до н.э.)

Рис. 4. Этапы подготовительного периода создания строительной науки со II тысячелетия до н.э. до VII в. н.э. (длительность периода 2700 лет)

Здания в древний период и в Средневековье строились интуитивно, на основании лишь эмпирических данных. Толщина кирпичных стен крупных зданий составляла 2,5–5,5 м (рис. 4). Жилые здания возводились из древесины.

Древние египтяне назначали размеры зданий в результате изучения эмпирического опыта построенных и разрушенных зданий. Греки и римляне получили возможность делать простые математические расчеты в результате создания теоретической статистики. Но изучение напряженно-деформированного состояния началось только через несколько веков⁶ [17].

В X в. строители Древней Руси впервые узнали о кирпиче, секрет которого привезли мастера, священники и ученые из Византии.

Кроме того, опыт греков и римлян в Средние века был утрачен из-за отсутствия возможности передачи информации и частых войн. Снова интерес к науке появился в эпоху Возрождения (XIII–XVI вв.), что стало поворотным этапом в истории проектирования и строительства.

Леонардо да Винчи (1452–1519), больше известный как художник и скульптор, чем как архитектор, занимался экспериментальным изучением прочности строительных материалов и некоторых частей зданий, создал макет многоуровневого города, важного для ликвидации источника неизлечимых в тот исторический период времени заразных болезней [18].

Галилео Галилей в своем трактате «Беседы и математические доказательства, касающиеся двух новых отраслей науки, относящихся к механике и местному движению» (1638) изложил основы кинематики и сопротивления материалов, сформулировал законы падения [19]. Его достижения стали фундаментом для создания и развития динамики как науки в проектировании зданий и дальнейшей разработки основ проектирования.

Галилей писал: «Мы создаем новую науку, предмет которой является чрезвычайно старым. В природе нет ничего древнее движения, но именно относительно него философами написано весьма мало значительного».

Итальянские математики Сципион дель Ферро, Тарталья и Феррари смогли дать решение уравнения III и IV степени — задачу, которую много веков до этого не могли решить величайшие математики; Франсуа Виет сформулировал буквенную алгебру⁷; невозможно переоценить открытие логарифмов Джона Непера [20]. Роль математики постоянно возрастает в различных областях науки — военном деле, архитектуре и строительстве. Создаются основы не просто счета, но расчета отдельных элементов здания для определения их прочности и устойчивости.

XVII в. ознаменован такими серьезными открытиями для проектирования и расчетов, как появление системы координат Рене Декарта, которая описана в его трактате «Геометрия» (1637); Пьер Ферма, Христиан Гюйгенс и Якоб Бернулли создали новый раздел математики, которому было определено большое будущее — создана теория вероятностей.

В конце XVII в., помимо издания трудов различных ученых и уже действующих нескольких университетов, появилась новая возможность распространения информации — периодическое научное издание «Acta Eruditorum», в переводе с латинского eruditorium — обучающая, acta — газета (1682 г., Лейпциг, Германия), выходившее на латинском языке; и «Memoires», в переводе с французского memoires — воспоминания (1699 г., Париж, Франция). Оба издания выходили нерегулярно, на латыни, но стали первыми лучами света в мире неграмотности и связи между учеными, жившими на разных территориях и не имевшими возможности общения.

В 1660 г. Роберт Гук доказал утверждение, согласно которому деформация в упругом теле пропорциональна силе, которая приложена к этому телу (закон Гука), что стало основой для создания математической теории упругости.

Англичанин Исаак Ньютон (трактат «Начала», 1684–1686 гг.) изложил базовые понятия механики, в том числе понятия массы и внешней силы, сформулировал три закона механики⁸ [21]; итальянец Винченцо де Риккати создал теорию гиперболических функций; швейцарский математик Леонард Эйлер [22] выпустил монографию «О телах, поверхность которых можно развернуть на плоскость» (1771), что в дальнейшем стало основой строительного черчения [23], занимался исследованием изгиба балок, стержней и определением критической нагрузки при сжатии упругого стержня. Но все эти исследования были в основном теоретическими и не находили практического прикладного применения в проектировании зданий, так как отсутствовала техническая база для создания технического устройства для расчета.

В 1623 г. немецкий ученый Вильгельм Шиккард создал первый прототип вычислительной машины, это изобретение стало началом для развития компьютерной техники и использования ее во всех областях науки, в том числе в строительном проектировании.

В период XVI–XVII вв. началось развитие законов на территории Русского царства (Соборное уложение 1649 года — свод законов Московской Руси),

⁶ Тимошенко С.П. История науки о сопротивлении материалов. 2-е изд. М.: URSS, 2006. 536 с.

⁷ Viète Fr. Introduction a l'art analytique. Bollettino di bibliografia e storia delle scienze matematiche e fisiche. 1868. Vol. I.

⁸ Кэджори Ф. История элементарной математики с указаниями на методы преподавания / пер. И.Ю. Тимченко. 2-е изд., испр. Одесса: Mathesis, 1917.

регулирующих самые разнообразные сферы жизни. Они были разрозненны, часто противоречили один другому.

Основными строительными материалами этого периода являлись все еще используемая сплошная древесина и кирпич (московская церковь Рождества Богородицы в Путинках) (рис. 5, *a, b*). XVII в. стал началом широкого использования кирпича как основного строительного материала для соборов, церквей, храмов и др. Конструктивной системой по-прежнему остается стеновая (с продольными и поперечными несущими стенами) для жилых зданий и колонная — для общественных зданий.

Рис. 5. Московская церковь Рождества Богородицы, Путинки (начало строительства 1625 г.): *a* — модель церкви; *b* — план церкви

Рис. 6. Эволюция математики, повлиявшей на дальнейшее развитие науки проектирования и расчета зданий (длительность периода 600 лет)

Рис. 7. Арифмометр Лейбница (источник: <https://tehnikaland.ru/krupnaya-byitovaya-tehnika/istoriya-kompyutera.html>)

и поверхностей, начертательную геометрию Монжа и проективную геометрию инженера Л. Карно⁹. Впервые при Екатерине II появились так называемые типовые (повторяющиеся) проекты жилых зданий. Толщина стен общественных зданий уменьшилась до $5,6 \text{ м}^{10}$.

Французский математик и механик Д'Аламбер¹¹ предложил теорию дифференциальных уравнений второго порядка в частных производных для поперечных колебаний струны (т.е. волнового уравнения)¹² [24].

Немецкий математик Иоганн Андреас фон Зегнер создал графический метод решения алгебраических уравнений высокого порядка, изложив свои выводы во «Введении в анализ бесконечно малых» (1748)¹³ и «Курсе математики» (1756)¹⁴ [25].

Швейцарский математик и механик Иоганн Самуэль Кёниг доказал теорему о кинетической энергии движения абсолютно твердого тела (1751).

Большой вклад в дальнейшее создание строительной науки внесли французские ученые Алексис Клод Клеро (решение дифференциальных уравнений первого порядка в 1736 г.) и Пьер-Симон, маркиз де Лаплас (занимался проблемами акустики); немецкий ученый Готфрид Вильгельм Лейбниц (создал первую модель математического арифмометра) [26] (рис. 7).

В 1822 г., почти через столетие после изобретения Лейбница, английский изобретатель математик Чарльз Бэббидж сконструировал первый в мире аппарат для автоматизации вычислений, что исключало возможность ошибки в расчетах. Этот аппарат уже мог решать простые уравнения, что давало возможность альтернативных расчетов при проектировании и изучении нескольких вариантов размеров здания (рис. 8).

Рис. 8. Машина Чарльза Бэббиджа (источник: <https://ru.wikipedia.org/wiki/>)

В середине XIX в. началось строительство мостов, т.е. сооружений большого пролета без промежуточных опор, что привело к необходимости развития более сложных теоретических расчетов. Французский инженер А. Навье уже в начале XIX в. начал изучать работу сооружений под нагрузкой, что стало основой для расчета конструкций по рабочему состоянию. Поскольку именно А. Навье ввел понятие модуля упругости как характеристику строительного материала, его стали считать основателем теории упругости [27, 28].

⁹ Хартсхорн Р. Основы проективной геометрии / пер. с англ. Е.Б. Шабат; под ред. И.М. Яглома. М.: Мир, 1970. 161 с.

¹⁰ Тюлина И.А. История и методология механики. М.: Изд-во МГУ, 1979.

¹¹ История механики в России / отв. ред. А.Н. Боголюбов, И.З. Штокало. Киев: Наукова думка, 1987. С. 65–66.

¹² Веселовский И.Н. Очерки по истории теоретической механики. М.: Высшая школа, 1974. 287 с.

¹³ История математики с древнейших времен до начала нового времени / под ред. А.П. Юшкевича. М.: Наука, 1970. 352 с.

¹⁴ Лаплас П.С. Изложение системы мира. М.: Наука, 1982. С. 309.

В 1737 г. в России был издан строительный кодекс «Должность архитектурной экспедиции», регламентирующий не только нормы строительства и проектирования, но и должностные обязанности архитектора, применение строительных материалов и др.

К 1843 г. вторично изданы «Урочное положение» и «Строительный указ», в которых впервые на законодательном уровне поднят вопрос об испытании материалов и конструкций.

В период с 1842 по 1855 г. по указу императора Николая I был написан и издан Свод законов Российской империи, включавший в том числе часть законов по строительству — главы 2 и 3, в которых были подробно расписаны требования к факту решения строительства различных типов зданий (религиозных, общественных, жилых, инженерные сооружения и др.) и об отведении места для них, к строительным материалам, полезному объему здания с учетом количества проживающих в этой местности людей. Основой для строительства здания служил «образцовый рисунок и описание». Регламентировалось и строительство деревянных частных строений на «маломерных участках»¹⁵.

В 1956 г. нормативные документы по проектированию зданий получили наименование «Строительные нормы и правила» (СНиП), в дальнейшем они постепенно преобразовались в Своды правил (СП) по каждому типу зданий в зависимости от их назначения и строительного материала [29].

¹⁵ Свод законов Российской империи, повелением государя императора Николая Павловича составленный : издание 1842 года. В 15 т. Санкт-Петербург : Типография Второго отделения Собственной Его Императорского Величества канцелярии, 1842–1855.

Все еще небольшая скорость передачи новой информации (радио было изобретено только в конце XIX в. в США, России, Германии, Франции и других странах почти одновременно), только начавшие развиваться технологии передачи на расстояние картинок и развитие телевидения приводили к медленному развитию науки во всех ее областях, в том числе в строительстве. Аналитическая и экспериментальная части науки не имели взаимодействия и влияния друг на друга. Многие изобретения и открытия пролежали в столах десятилетия до их использования в прикладной науке (рис. 9).

XX в. — век развития и создания стройной системы проектирования зданий, теории расчета отдельных частей и всего здания в целом, создания универсальных методов расчета на ЭВМ во всех областях строительства; развития компьютерной техники от вычислительной машины компании IBM и распространения персональных компьютеров по всему миру.

Если первая ЭВМ на электронных лампах, созданная в США в 1946 г., имела вес 30 т, то сейчас она помещается на одной монете. В нашей стране первый компьютер МЭСМ (малая электронная счетная машина) был создан в 1951 г. Ее конструктором стал А.С. Лебедев.

Пройдя путь от компьютеров на электронных лампах (МЭСМ, 1951 г.), транзисторах (БЭСМ-6, 1965 г.), использования магнитного диска (PDP-8, 1965 г.), создания микропроцессоров (Intel-4004, 1971 г.; Intel-8008, 1975 г.) до появления первого персонального компьютера (Альтаир-8800, 1975 г.), IBM PC, 1981 г., строительная наука вышла на другой уровень возможностей в расчете и конструировании.

Рис. 9. Эволюция развития науки в проектировании и расчете строительных конструкций с XVIII по XX в. (длительность периода 300 лет)

вании зданий и их отдельных частей. Но базовыми знаниями по-прежнему остаются достижения ученых предыдущих веков.

Появление нормативных документов повлияло на создание стройной системы расчета здания и отдельных конструкций на основе ранее разработанного математического аппарата и новейших компьютерных технологий.

Появление нового строительного материала — железобетона — повлекло за собой введение новых нормативных документов в области монолитного строительства, необходимости экспериментальных исследований.

В 1908 г. в Москве был построен универсальный магазин «Мюр и Мерилиз», где в переходных мостиках был использован железобетон (рис. 10).

Помимо технического оснащения, в помощь инженерам и архитекторам пришли новые методы расчета и расчетные многофункциональные программные комплексы для проектирования и расчета строительных конструкций. Основным методом расчета является появившийся в середине прошлого столетия метод конечных элементов (МКЭ), который благодаря всеобщей компьютеризации дает возможность сделать полный анализ здания и его отдельных частей.

Огромный вклад в строительную науку проектирования и расчета конструкций XX в. внесли И.Г. Бубнов, Б.Г. Галеркин, В.З. Власов, А.А. Гвоздев, Н.М. Герсеванов, Ю.А. Дыховичный, Д.И. Журавский, В.И. Мурашов, И.П. Прокофьев, Л.Д. Проскуряков, И.М. Рабинович, А.Р. Ржаницын, Н.С. Стрелецкий, С.П. Тимошенко, В.А. Флорин, Н.А. Цытович, В.Г. Шухов и другие выдающиеся ученые.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

XXI в. дает новые технические возможности инженерам и архитекторам в отношении усовершенствования технической оснащенности компьютеров, их памяти, новых комплексных программ по расчету и графическим возможностям, создание 3D-моделирования и возможность виртуального исследования проектируемого здания как экспериментально, так и теоретически. Пролет здания за два тысячелетия увеличился более чем в 150 раз, появились новые строительные конструкционные материалы, позволяющие воспринимать большие усилия от конструкций и воздействий природного действия. Находятся в процессе разработки и исследования новые искусственные строительные материалы (например, сополимер этилена и тетрафторэтилена — ЭТФЭ-пленка), обладающие малым весом, высоким уровнем теплоизоляции и уровнем восприятия внешних воздействий, изменилась толщина стен и покрытий, появились трансформируемые части зданий, позволяющие менять планировку и конструкцию в зависимости от быстро меняющегося прогресса и для различных погодных условий.

ВЫВОДЫ

В последних документах Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН) «Прогноз развития фундаментальных исследований в области архитектуры, градостроительства и строительных наук до 2030 года» и в проекте к общему собранию членов РААСН 2018 г. «Предложения Российской академии архитектуры и строительных

Рис. 10. ЦУМ, бывший универсальный магазин «Мюр и Мерилиз», г. Москва, ул. Петровка, д. 2. Архитектор Р. Клейн, 1908–1910

наук по приоритетным направлениям развития исследований в сфере архитектуры, градостроительства и строительных наук» (г. Москва) была отмечена необходимость возобновления экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния строительных конструкций, разработки научных основ для проектирования зданий и сооружений нового типа — энергоэффективных, безопасных и комфортных. Все эти задачи требуют не только создания математических моделей и ме-

тодов расчета, но и проведения экспериментальных исследований по многим направлениям строительной науки, что предполагает крупные вложения и поддержку государства. Увеличивающиеся темпы технического прогресса приводят к необходимости соединения процесса образования с реальным проектированием и научными исследованиями, которые могут проводиться как в период предпроектной подготовки, так и в процессе эксплуатации, что подтвердит аналитические выводы ученых.

ЛИТЕРАТУРА

1. Маркос Хазн Санчес. Тайна за тремя стенами. Пифагор. Теорема Пифагора. Серия: Наука. Величайшие теории. М. : Де Агостини, 2015. Вып. № 27. 168 с.
2. Ямвлих Х. Жизнь Пифагора. М. : Издательство Новый Акрополь, 2014. 180 с. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24058932>
3. Гаспаров М.Л. Диоген Лаэртский. О жизни, учениях и изречениях знаменитых философов. Сер. Историческая библиотека / пер. с древнегреч. М. Гаспарова. М. : Издательство АСТ, 2011. 576 с.
4. Волжип А.С. История развития науки о движении земли. Часть 1. Развитие науки о движении земли в эпоху геоцентризма. М. : Научтехлитиздат, 2012. № 11. С. 55–56.
5. Hägg T., Rousseau P., Högel Ch. Greek Biography and Panegyric in Late Antiquity. Berkeley and Los Angeles, University of California Press, 2000. 283 p.
6. Жмудь Л.Я. Пифагор и ранние пифагорейцы. М., 2012. 445 с.
7. Лебедев А.В. Перипатетическая школа. Новая философская энциклопедия в 4-х т. / Ин-т философии РАН; Нац. обществ.-науч. фонд; Предс. научно-ред. совета В. С. Степин. 2-е изд., испр. и доп. М. : Мысль, 2010.
8. Орлов Е.В. Философский язык Аристотеля: мон. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2011. 317 с.
9. Лосев А.Ф. Диоген Лаэртский. О жизни, учениях и изречениях знаменитых философов / пер. М.Л. Гаспарова. М. : Издательство АСТ, 2020. 800 с.
10. Аристотель. Физика. М. : Изд.-во URSS, 2010. 236 с.
11. Начала Евклида / пер., коммент. Д.Д. Мордухай-Болтовского. М., 1948–1950. Т. 1–3.
12. История математики с древнейших времен до начала XIX столетия. М., 1970. Т. 1.
13. Наука. Величайшие теории. № 9: Природа описывается формулами. Галилей. Научный метод / пер. с итал. М. : Де Агостини, 2015. 160 с.
14. Кувалдина Т.Б. Трактат Луки Пачоли как памятник истории и культуры счетоведения и счетоводства // Сибирская финансовая школа. 2014. № 4 (105). С. 59–61.
15. Зейферт М.Г., Сагатдинова А.М. Особенности архитектурного формирования первых университетов в Западной Европе и России // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2010. № 1 (13). С. 16–22.
16. Евлахова Е.Ю., Железняков В.А., Поляков А.Д., Мелихов Д.Н. Краткий исторический обзор истории развития «Сопротивления материалов» как науки // Наука и инновации — современные концепции: сб. науч. ст. по итогам работы Междунар. науч. форума / отв. ред. Д.Р. Хисматуллин. 2019. С. 89–94.
17. Журавлева М.А. Культура в эпоху возрождения // Фундаментальные основы инновационного развития науки и образования: сб. ст. VI Междунар. науч.-практ. конф. в 3-х ч. 2019. С. 14–16.
18. Гиндикин С.Г. Рассказы о физиках и математиках: мон. М. : Издательство МЦНМО, 2013. 448 с.
19. Синкевич Г.И. Ранний этап развития historia matheseos. Историография истории математики. История науки и техники. М. : Научтехлитиздат, 2017. № 1. С. 3–17.
20. Коешов А.Н., Балатханова Э.М. «Начала» механики Ньютона // Строительные конструкции: состояние и перспективы развития: мат. Всероссийской науч.-технич. конф., посвященной 100-летию В.А. Карташова. Саранск : Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, 2019. С. 18–25.
21. Цейтен И.Г. История математики в древности и в средние века / пер. с фр. П.С. Юшкевича / под ред. А.П. Юшкевича. 3-е изд. Сер. Физико-математическое наследие: математика (история математики). М. : URSS, 2010. 231 с.
22. Яковлев В.И. Первые математики и механики ППШ и института Франции // Вестник Пермского университета. Серия: Математика. Механика. Информатика. 2019. № 1 (44). С. 90–109.
23. История и математика: социально-экономические аспекты истории и современности. Ежегодник / ответ. ред. Л.Е. Гринин, А.В. Коротаев. Волгоград : Учитель, 2018. С. 5–12.

24. Энциклопедия Колера. 2000. С. 1–22.
25. *Wilson C.* Predictive astronomy in the century after Kepler // *Planetary Astronomy from the Renaissance to the Rise of Astrophysics. Part A: Tycho Brahe to Newton. The General History of Astronomy.* 1989. Vol. 2. P. 171.
26. *Назаренкова Е.В., Яковлев В.И.* О вкладе в механику Алекси Клеро // *Математика и междисциплинарные исследования : сб. тр. Всероссийской науч.-практ. конф. молодых ученых с междунар. участием.* Пермь, 2018. С. 337–338.
27. *Мкртычян Д.А.* Состояние механики и практической механики в России до середины XIX в. // *Теория механизмов и машин.* 2016. Т. 14. № 4 (32). С. 229–234. DOI: 10.5862/TMM.32.7
28. *Allen D.H.* How Mechanics Shaped the Modern World. Springer, 2014. Pp. 17–24.
29. *Лезина Е.П.* Генезис архитектурно-строительных регламентаций в России // *Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты: сб. мат. XIII Междунар. науч.-практ. конф. / под общ. ред. С.С. Чернова.* Новосибирск : Издательство ЦРНС, 2014. С. 11–15.

Поступила в редакцию 14 января 2020 г.

Принята в доработанном виде 5 февраля 2020 г.

Одобрена для публикации 26 февраля 2020 г.

ОБ АВТОРЕ: **Елена Владимировна Сысоева** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры проектирования зданий и сооружений Института строительства и архитектуры; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 755880, Scopus: 57192373360, ORCID: 0000-0001-7250-3190; SysoevaEV@mgsu.ru.

INTRODUCTION

The history of the civil engineering science has numerous stages that encompass the emergence of new tools of trade, industrial development, urban population growth, novel construction materials and many other milestones.

Civil engineering is closely related to mathematics, measurements, written languages and transformations of calculation devices.

A written language and a numerical system enabled pioneers in philosophy and mathematics to make elementary calculations, write down their ideas and generate analytical formulas describing dependencies between physical, geometrical, chemical and other values.

The progress of civil engineering relied on the historical events and climatic conditions in the areas that accommodated particular discoveries. Therefore, discoveries could not be made simultaneously in different parts of the world, and the unavailability of information distribution channels prevented the science from developing at a pace the scholars would have preferred.

The process of understanding a discovery took dozens, if not hundreds of years.

It was the emergence of fast communication channels between countries, continents and researchers based in different parts of the world that enabled the humankind to analyze, improve and customize the discoveries so that they could meet the needs of their homelands, climates and localities.

MATERIALS AND METHODS

The analysis of historical documents, starting from the works of Iamblichus¹⁶ [1–4], Porphyrius [5], the treatise written by Diogenes Laertius (Book VIII) and ending with the draft RF construction industry development strategy through 2030, was performed to study the construction science and its development phases and to identify the reasons for its deceleration and acceleration at different development stages.

RESULTS OF THE STUDY

The first mathematical texts, attributed to the 2nd millennium B.C., were written by ancient Egyptians on papyrus (Fig. 1).

Following the emergence of a numerical system, the man started thinking in numbers, in other words, he did his best to represent his civil engineering ideas in numbers. The notions of “width, thickness, depth” were used in the mathematical sense. For example, in ancient Rus, measures of length included a verst, or a milestone, a sazhen, or a fathom, an elbow, an arshin, a foot, a foot sole, a vershok, an inch, a ligne and their derivatives used in different historical periods. However, the international decimal system of weights and measures was adopted by the 11th General Conference on Weights and Measures eleven centuries later in 1960. Since 1963,

¹⁶ Iamblichus. On the Pythagorean way of life. Aleteya Publ., 2002. 76p. URL: https://royallib.com/book/yamvliho_pifagorovoy_gizni.html

Fig. 1. The first Rhind papyrus depicted 84 mathematical problems that date back to the Middle Kingdom (2040 and 1640 B.C.)

this system has been used in all areas of research, including civil engineering.

One should refer to the antiquity and find out what events, inventions and discoveries shaped up the contemporary structural design and to have a better understanding of the origin of the present-day theory of design and analysis of structures.

In the present-day world, civil engineering takes advantage of such areas of knowledge as resistance of materials, theoretical mechanics, theory of elasticity, plasticity and creep, structural mechanics, structural dynamics, material engineering, etc.

The inception of mathematics as a science dates back to the same days as the empirical calculations made by ancient architects.

In the 6th century B.C. — 9th century A.D., the most prominent ancient scholars, thinkers and mathematicians were Pythagor (596–500 B.C.), Eudoxus (408–355 B.C.), Aristotle (384–322 B.C.), Archimedes (287–212 B.C.), Euclid (3d century B.C.), Heron (1st century B.C.), Claudius Ptolemaeus (2nd century A.D.), John Philoponus (6th century A.D.), Leo the Mathematician (9th century A.D.), etc.

The construction of unique facilities, namely, temples, bell towers, churches, fortification of cities, fortress walls, fortresses, bridges and hydraulic engineering structures boosted the development of civil engineering. The civil engineering science applied to mathematics, physics and chemistry to lay the groundwork for its theory during this extensive period of time.

The first school, established by Pythagor in Croton, Italy, destroyed the myth-oriented human mindset and paved the way for the establishment of universities. Pythagor was not only the founder of mathematics as a science, he also had numerous disciples and followers. This fact is not less important than the discoveries

themselves in the age when no information distribution channels were available.

In compliance with the Thales' idea (624–547 B.C.), Pythagor introduced the notion of “the proof” that follows “the hypothesis” in mathematics [6]. Another Pythagor's discovery, which was vitally important for the civil engineering science, dealt with the insufficiency of whole numbers for mathematical constructions.

Aristotle authored the treatise focused on mechanics and entitled it “Mechanical problems” [7, 8]. He studied the notion of “the force” which was reconsidered and revised later¹⁷ [9, 10].

Aristotle succeeded in overcoming numerous obstacles when he came into antagonism with the philosophers of his time and took advantage of all the achievements made by the mathematicians in the course of preceding twenty-five centuries. He applied his centre of gravity identification method to design different hoisting devices used in the construction process.

Eudoxus¹⁸ authored the theory of geometric variables¹⁹, which was later repeatedly revised and updated by mathematicians.

¹⁷ Aristotle — Werner Jaeger: Aristotle: Fundamentals of the history of his development. Translated with the author's corrections and additions by Richard Robinson. Pp. 475. Oxford: Clarendon Press, 1948. Cloth, 21s. net. URL: <https://www.cambridge.org/core/journals/classical-review/article/aristotle-werner-jaeger-aristotle-fundamentals-of-the-history-of-his-development-translated-with-the-authors-corrections-and-additions-by-richard-robinson-p-475-oxford-clarendon-press-1948-cloth-21s-net/91E9A2D3070244306E7A4EE2A10F173B>

¹⁸ Zaitsev A.I. The role of Eudoxus of Cnidus in the formation of astronomy as a science in Ancient Greece. Some problems in the history of ancient science, collected works. Edited by A.I. Zaitsev, B.I. Kozlov. Leningrad, The main astronomical observatory, 1989, pp. 116–120.

¹⁹ Boyer Carl B. A History of Mathematics. 2nd ed. John

In his final book entitled “Elements”, Euclid summarized the works of his predecessors; he provided a detailed overview of numerous problems in mathematics, including solid geometry and the theory of numbers, which influenced further development of mathematics both as an independent science of numbers and as an applied science, used in structural engineering [11].

This period witnessed the intensive construction of major masonry and fortified structures, including mosques and prayer towers, fortification walls and palaces, theatres and amphitheatres that accommodated public events: the Al Aqsa mosque (Jerusalem, Israel, 967–963 B.C.), the Omeyyad mosque (Damascus, Syria, 715 A.D.), the Balboa theatre²⁰ (Rome, Italy [14], 13 century B.C.), the Arelate theatre (Arles, France, 30–15 B.C.), the Roman theatre (Cadiz, Spain, 1st century B.C.), the theatre of Marcellus (Rome, Italy, 1st century B.C.), Colosseum (Rome, Italy, 72–80 B.C.), Odeon (Ephesus, Turkey, 2nd century A.D.) and many others. Their capacity reached 1,500–50,000 spectators.

One of these structures is the Bosra amphitheatre in Syria, built in the 2nd century A.D. Its hall accommodates 15 thousand spectators. The stage length is 45 m; the stage depth is 8 m. The stage is made of natural stone, and its extensive dimensions would not let it be roofed due to the absence of supports. The theatre hosted circus shows and dramas, let alone Roman holidays. According to the ancient records, its amphitheatre was covered with a silk cloth which prevented raindrops from falling on the heads of spectators and protected them from heat (Fig. 2).

The Balboa Theatre, built in the 13th century B.C., accommodated 11,510 spectators, and the diameter of its stage was equal to 90 m. It was the first facility that boasted a toilet and a waiting area that could accommodate spectators in bad weather (Fig. 3).

Wiley & Sons, 1991. P. 92.

²⁰ Shirokov B.S. Galilei and medieval mathematics. Historical and mathematical researches. Moscow, 1979; 24:88-103.

Fig. 2. The Bosra amphitheatre (Bosra, Syria, 2nd century A.D.)

By the 7th century a mathematical compass enabled ancient engineers to draw geometrical constructions; it also marked the development of measurement notions (Fig. 4).

Following four centuries of stagnation, first universities were founded in Salerno and Bologna in the 11th century A.D. Leonardo of Pisa (13th century), philosophers and mathematicians Robert Grosseteste and Roger Bacon, who promoted the idea of experimental research; John Muller, who developed trigonometry (15th century) were on the list of prominent medieval mathematicians, whose works had a meaningful effect on the civil engineering science. Each of them facilitated the establishment of universities in major cities of the world, including Prague, Krakow, Vienna, Heidelberg, Leipzig, Basel, etc. [15, 16].

The first code of construction was introduced in the Kyivan Rus in the 11th century. It was mainly focused on fire prevention precautions.

The period preceding Middle Ages can be characterized as a preparatory period in the history of the civil engineering science.

In ancient times or later, in Middle Ages, the construction process was driven by intuition and empirical evidence. The thickness of brick walls in major buildings reached 2.5–5.5 m (Fig. 4). Residential buildings were made of timber.

Ancient Egyptians set the dimensions of future buildings in reliance upon the empirical evidence collected from earlier built or destroyed structures. Greeks and Romans obtained an opportunity to make simple mathematical calculations due to the access to theoretical statistics. However, the study of the stress-strain state was initiated several centuries later²¹ [17].

In the 10th century, builders of Ancient Rus first learned about the brick. Its secrets were brought by bricklayers, priests and scholars from Byzantium.

²¹ Timoshenko S.P. The history of resistance of materials as a science. Moscow, URSS Publ., 2006; 536.

Fig. 3. A model of the Balboa theatre and crypts (stage diameter — 90 m, capacity — 11,510 spectators; 13 B.C.)

Fig. 4. Stages, comprising the preparatory period preceding the inception of civil engineering as a science, that lasted from the 2nd millennium B.C. to the 7th century A.D. (2,700 years)

Moreover, the experience, accumulated by Greeks and Romans in the Middle Ages, could not be transmitted due to the absence of communication channels and frequent wars. Interest in science and research aroused in the days of Enlightenment (13–16 centuries), and this period was a turning point in the history of design and civil engineering.

Leonardo da Vinci (1452–1519), better known as an artist and sculptor than an architect, performed experimental research into the strength of construction materials and elements of buildings. He made a model of a multi-level city which was important for the liquidation of a source of then-incurable and viral diseases [18].

In his work “Discourses and mathematical demonstrations relating to two new sciences” (1638), Galileo Galilei described the fundamentals of cinematics and resistance of materials and formulated the law of free fall [19]. His attainments served as the basis for the establishment and development of dynamics as a science applied in the design of buildings and in further development of fundamentals of design.

Galileo wrote: “We establish a new science whose subject is extremely old. There is nothing older than motion in nature, but very few substantial works have been focused on it”.

Italian mathematicians Scipione del Ferro, Niccolo Tartaglia and Lodovico Ferrari succeeded in solving equations of third and fourth degrees. This was the problem that remained unresolved by the greatest mathematicians of the past; Francois Viète was the founder of symbolic algebra²²; it’s impossible to overestimate the discovery of logarithms by John Neper [20]. Mathematics turns more

significant in versatile areas of research, including military science, architecture and civil engineering. Fundamentals of calculus and analysis of building elements are developed and applied to identify their strength and stability.

The 17th century was marked by such substantial discoveries, which were vital for design and analysis, as the emergence of the Cartesian coordinate system, described in his work “Geometry” (1637). Pierre Fermat, Christiaan Huygens and Jacob Bernoulli founded a new branch of mathematics, which had a prominent future, it served as the basis for the theory of probability.

In the late 17th century, besides the publication of works written by versatile scholars and the operation of several universities, there emerged a new information distribution channel: that was the “Acta Eruditorum” periodical. Its title could be translated from Latin as “the teaching newspaper” (1682, Leipzig, Germany); the periodical was published in Latin. Another scientific periodical was entitled “Memoires”, or “Recollections” (1699, Paris, France). Both editions were irregularly published in Latin, however, they turned to be the first “slivers of light” in the world of illiteracy and a means of communication between scholars who lived in different areas and did not have any other chance to interact.

In 1660, Robert Hooke proved the assumption stating that any deformation of an elastic body was proportionate to the force applied to it (the Hooke’s law), which served as the basis for the theory of elasticity.

Isaak Newton, a British scholar (*Philosophiae naturalis principia mathematica*, 1684–1686) set for the principal notions of mechanics, including the notion of mass and applied force, and formulated the three laws of mechanics²³ [21]; Viorenzo de Riccati, an Ital-

²² Viète Fr. Introduction a l’art analytique. Bollettino di bibliografia e storia delle scienze matematiche e phisiche. 1868; I.

²³ Cajori F. A history of elementary mathematics. Odessa, Mathesis Publ., 1917.

ian scholar, developed the theory of hyperbolical functions; Swiss mathematician Leonhard Euler (1771) [22] published a monograph entitled “On the representation of spherical surfaces on a plane surface”, which later served as the basis for constructional drawings [23]; he studied beam and rod bending and worked at identifying critical load values for an elastic rod under compression. However, each of these studies was mostly theoretical, they found no practical application in the design of buildings, as there was no technical base for the development of a calculation device.

In 1623, Wilhelm Schickard, a German scholar, made the first prototype of a computing machine. This invention marked the inception and further development of computer devices and their application is all areas of research, including structural design.

In the 16th–17th centuries, the law system was introduced in the Russian Tzardom (the 1649 Council Code of the Moscow Rus); it regulated versatile areas of life. The laws were uncoordinated; they often contradicted one another.

Most widely used construction materials included timber and bricks (Moscow Church of the Nativity of Virgin in Putinki) (Fig. 5, *a*, *b*). The 17th century marked the widespread use of bricks as the main construction material for cathedrals, churches, temples, etc. The structural design remained the same: residential buildings had lateral and transversal walls; public buildings had columns.

In the 15th–17th centuries, the wall thickness varied from 1.000 to 1.500 mm, which is 6–5 times less than the thickness of first public buildings that date back to the 1st–10th centuries (Pantheon, Colosseum). The maximal span went up 2–3.5 — fold thanks to new construction technologies and shapes of roofs (Fig. 6).

The 18th century can be called analytical, as new areas of research, that could be called “applied research” emerged; they included mathematical physics, Lagrangian analytical mechanics, potential theory co-developed by Lagrange, Laplace and Legendre. Geometry was split into differential geometry of curves and surfaces, Gaspard Monge’s descriptive geometry, and Lazare Carnot’s projective geometry²⁴. During the reign of Catherine the 2nd, first standard (repetitive) designs of residential houses were developed. The wall thickness of public buildings went down to 5.6 m²⁵.

Jean le Rond D’Alembert²⁶, a French mathematician and mechanic, developed a theory of partial differential equations of the second order for transverse oscillations of a string (a wave equation)²⁷ [24].

Johann Andreas von Segner, a German mathematician, developed a graphical method to solve higher order algebraic equations and presented his conclusions in “Introduction into the analysis of infinitesimals” (1748)²⁸ and “A course in mathematics” (1756)²⁹ [25].

Swiss mathematician and mechanic Johann Samuel König proved the theorem of the kinetic motion energy in an absolutely solid body (1751).

²⁴ Hartshorne R. Algebraic geometry. Moscow, Mir Publ., 1970; 161.

²⁵ Tjulinal.A. History and methodology of mechanics. Moscow, Moscow University Publ., 1979.

²⁶ Bogolubov A.N., Shtokalo I.Z. History of mechanics in Russia. Kyiv, Naukova Dumka Publ., 1987; 65–66.

²⁷ Veselovsky I.N. Essays on the history of theoretical mechanics. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1974; 287.

²⁸ Yushkevich A.P. A history of mathematics since antiquity through the early modern age. Moscow, Nauka Publ., 1970; 352..

²⁹ Laplace P.S. The system of the world. Moscow, Nauka Publ., 1982; 309.

Fig. 5. Moscow Church of the Nativity of Virgin in Putinki (construction commenced in 1625): *a* — church building model; *b* — Church plan

Fig. 6. The evolution of mathematics that influenced further development of theoretical design and analysis of buildings (time span — 600 years)

A substantial contribution into the civil engineering science was made by Alexis Claude Clairaut (solution of 1st order differential equations in 1736) and Pierre-Simon de Laplace (who was engaged in solving problems of acoustics), and German scholar Gottfried Wilhelm (von) Leibniz (who made the prototype of a calculating machine) [26] (Fig. 7).

In 1822, almost one century after the Leibniz's invention, British inventor and mathematician Charles Babbage designed the first calculating machine, which made no calculation mistakes. This machine was capable of solving simple equations, and this capability enabled engineers to make alternative analyses when designing and exploring options of building dimensions (Fig. 8).

In the middle of the 19th century bridge building was initiated; bridges are long-span structures that have no intermediate supports, and this activity boosted

the development of a theoretical analysis and made it more complex. Claude Louis Marie Henri Navier began studying the performance of loaded structures, and his efforts served as the basis for the analysis of structures under operating conditions. It was Navier who introduced the notion of the modulus of elasticity as a construction material characteristic; he was considered the founder of the theory of elasticity [27, 28].

In 1737, the building code was published in Russia. It contained construction and design regulations; it also had a list of responsibilities of an architect, as well as regulations governing the application of construction materials, etc.

By 1843, the Building Regulation and the Construction Decree were published for the second time. In these documents, the testing of materials and structures was governed at the legislative level.

Fig. 7. Leibniz's calculating machine (Source: <https://tehnikaland.ru/krupnaya-byitovaya-tehnika/istoriya-kompyutera.html>)

Fig. 8. Charles Babbage's calculating machine (Source: <https://ru.wikipedia.org/wiki/>)

In 1842–1855, pursuant to the Decree issued by Emperor Nikolai Pavlovich, a Code of Laws of the Russian Empire was compiled and published. It comprised a number of laws governing the construction process, namely, its Chapters 2 and 3, had requirements applied to the construction of different types of buildings (religious, public, housing buildings, engineering structures, etc.) and to the provision of land plots to accommodate them, let alone construction materials and the usable floor area with account for the number of local residents. A sample drawing and its description served as the basis for construction. The document also regulated construction of private timber houses occupying small plots of land³⁰.

³⁰ Code of Laws of the Russian Empire, compiled by the authority of His Majesty Emperor Nikolai Pavlovich, 1842; 15 volumes, St. Petersburg; Printing House of the Second Department of His Majesty's office; 1842–1855.

In 1956, regulatory documents governing building design were entitled “Construction Norms and Rules” (or SNiPs); later they were gradually transformed into Codes of Rules (CRs) broken down by each type of building, its purpose and construction materials [29].

Slow transmission of new information (as radio was invented as late as in the end of the 19th century in the USA, Russia, Germany, France and other countries almost at the same time), emerging image transmission technologies and development of television caused the science to develop at a slow pace in every area of knowledge, including civil engineering. Analytical and experimental research did not interact and influence one another. Many inventions and discoveries remained unneeded for dozens of years, until they were used in an applied area of knowledge (Fig. 9).

The 20th century was the age of a consistent system of building design, theory of analysis of elements of buildings and buildings as a whole; it was the period marked by the development of universal computer-aided analysis techniques in all branches of civil engineering; it was the age of computer-aided development that started with an IBM data processing machine and continued with the expansion of personal computers all over the world.

First vacuum tube computers, made in the USA in 1946, weighed 30 tons, while today a computer can be placed on the surface of a coin. In Russia, the first computer called a Small Electronic Computing Device was designed by A.S. Lebedev and produced in 1951.

The civil engineering science accessed a new level of abilities in terms of analysis and design of buildings and their elements, having come a long way from vacuum tube computers (MASM, 1951), transistor computers (BASM-6, 1965), magnetic disc computers (PDP-8, 1965), microprocessors (Intel 4004, 1971; Intel-8008,

Fig. 9. Evolution of design and analysis of building structures from the 18th to the 20th centuries (300 years)

Fig. 10. TSUM, earlier known as the Moore and Merilise department store, located at: 2 Petrovka street, Moscow. R. Klein, architect, 1908–1910

1975) to the first personal computer (Altair-8800, 1975; IBM PC, 1981). However, the attainments of the scholars made in the past centuries remain the basic set of civil engineering knowledge.

The issuance of regulatory documents facilitated the establishment of a consistent system of the analysis of buildings and their elements on the basis of earlier developed mathematical tools and most advanced computer technologies.

The emergence of reinforced concrete, a new construction material, facilitated the issuance of new regulatory documents governing monolithic construction and experimental research.

In 1908, the Moore and Merilise department store was built in Moscow; its galleries contained some reinforced concrete (Fig. 10).

On top of the technological infrastructure, engineers and architects obtained new analysis methodologies and multi-functional software designated for the design and analysis of structures. A finite element method, developed in the middle of the 20th century, enables the analysis of the whole building or its constituent elements.

In the 20th century, a substantial contribution into civil engineering design and analysis was made by I.G. Boubnov, B.G. Galerkin, V.Z. Vlasov, A.A. Gvozdev, N.M. Gersevanov, Yu.A. Dykhovichny, D.I. Zhuravsky, V.I. Mourashov, I.P. Prokofiev, L.D. Proskuryakov, I.M. Rabinovich, A.R. Rzhanitsyn, N.S. Streletsky, S.P. Timoshenko, V.A. Florin, N.A. Tsytoich, V.G. Shukhov and other prominent scientists.

CONCLUSION AND DISCUSSION

The 21st century offers new opportunities to civil engineers and architects. They encompass advanced

computers, computer memory, new integrated software capable of performing structural analysis and having extensive graphic tools, developing 3D models and a virtual research into the building both in terms of an experiment and in terms of theoretical studies. It took a building span two thousand years to increase 150-fold; new construction materials emerged, they assumed higher forces applied by structures and natural impacts. New artificial construction materials are in the process of research and development (for example, copolymer of ethylene and tetrafluoroethylene, or the ETFE film); they are lightweight, they have high thermal insulation capacity and assumption capacity in terms of external impacts, the thickness of walls and coatings has changed, some elements of buildings have turned transformable; now building layouts and constructions are adaptable to the pace of the progress and changing weather conditions.

CONCLUSIONS

The most recent documents, issued by the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACS), including the “Prospects for the development of fundamental research in the area of architecture, urban planning and civil engineering sciences through 2030” and draft “Proposals of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences in respect of the top-priority areas of research in the fields of architecture, urban planning and civil engineering” (Moscow) mark the need to resume (1) the experimental research into the stress strain state of building structures, and (2) the development of theoretical fundamentals of design of energy efficient, safe and comfortable buildings and structures. Each of these objectives needs mathematical models and analytical methodologies, experimental

researches to be made in respect of numerous areas of the civil engineering science, which means that major investments are to be made by and support is to be obtained from the government. The pace of the techno-

logical progress requires education to consolidate with design and research at the due diligence stage and in the process of the building operation, in order to confirm the analytical conclusions made by the researchers.

REFERENCES

1. Marcos Jaen Sanchez. *A secret behind three walls. Pythagoras. Pythagorean theorem. Series: Science. The greatest theories.* Moscow, De Agostini, 2015; 27:168. (rus.).
2. Iamblichus H. *The life of Pythagoras.* Moscow, New Acropolis, 2014; 180. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24058932> (rus.).
3. Gasparov M.L. *Diogenes Laertes. On the life, teachings and sayings of famous philosophers* / transl. from the ancient greek M. Gasparov. Ser. Historical library. Moscow, AST Publishing house, 2011; 576. (rus.).
4. Volzhip A.S. *History of the development of science about the movement of the earth. Part 1. Development of the science of earth movement in the era of geocentrism.* Moscow, Nauchtekhlitizdat, 2012; 11:55-56.
5. Hägg T., Rousseau P., Högel Ch. *Greek Biography and Panegyric in Late Antiquity.* Berkeley and Los Angeles, University of California Press, 2000; 283.
6. Zhmud L.Y. *Pythagoras and the early Pythagoreans.* Moscow, 2012; 445. (rus.).
7. Lebedev A.V. *Peripatetic school. New philosophical encyclopedia in 4 vols. / In-t philosophy of the Russian Academy of Sciences; NAT. societies.-science. Foundation; Pres. V.S. Stepin, scientific editor of the Council.* 2nd ed. Moscow, Thought, 2010. (rus.).
8. Orlov E.V. *The Philosophical language of Aristotle : monograph.* Novosibirsk, SB RAS publishing House, 2011; 317. (rus.).
9. Losev A.F. *Diogenes Laertius. About the life, teachings, and sayings of famous philosophers.* Transl. M.L. Gasparov. Moscow, AST Publishing house, 2020; 800. (rus.).
10. Aristotle. *Physics.* Moscow, Publishing House of URSS, 2010; 236. (rus.).
11. *Euclid's beginnings* / trans., comment. D.D. Mordukhai-Boltovsky. Moscow, 1948-1950; 1-3. (rus.).
12. *History of mathematics from ancient times to the beginning of the XIX century.* Moscow, 1970; 1. (rus.).
13. *The science. The greatest theories. No. 9: Nature is described by formulas. Galilei. Scientific method* / trans. from ital. Moscow, De Agostini, 2015; 160.
14. Kuvaldina T.B. Luca Pacioli's Treatise as a monument of history and culture of accounting and bookkeeping. *Siberian financial school.* 2014; 4(105):59-61. (rus.).
15. Seifert M.G., Sagatdinova A.M. Features of the architectural formation of the first universities in Western Europe and Russia. *Proceedings of Kazan state University of architecture and construction.* 2010; 1(13):16-22. (rus.).
16. Yevlakhova E.Yu., Zheleznyakov V.A., Polyakov A.D., Melikhov D.N. Brief historical review of the history of the development of "Resistance of materials" as a science. *Science and innovation — modern concept: collection of scientific works. article based on the results of the work of internat. science. Forum* / ed. D.R. Khismatullin. 2019; 89-94. (rus.).
17. Zhuravleva M.A. Culture in the Renaissance. *Fundamental foundations of innovative development of science and education: collection of art. VI international. science.-practice. Conf. in 3 hours.* 2019; 14-16.
18. Chernov S.G. *Stories about physicists and mathematicians: mon.* Moscow, Publishing house mtsnmo, 2013; 448. (rus.).
19. Sinkevich G.I. *Early stage of development of historia matheseos. Historiography of the history of mathematics. History of science and technology.* Moscow, Nauchtekhlitizdat, 2017; 1:3-17. (rus.).
20. Kiesow A.N., Bulatkhanova E.M. "The Beginning" Newton's. *Building Construction: state and prospects of development: materials. All-Russian scientific conference.-technical. conf., dedicated to the 100th anniversary of V.A. Kartashov.* Saransk, National Research Mordovian state University N.P. Ogareva, 2019; 18-25. (rus.).
21. Zeiten I.G. *History of mathematics in ancient times and in the middle ages* / trans. with fr. P.S. Yushkevich / ed. A.P. Yushkevich. Ser. Physical and mathematical heritage: mathematics (history of mathematics). Moscow, URSS, 2010; 231.
22. Yakovlev V.I. The First mathematicians and mechanics of the PSH and Institute of France. *Bulletin of the Perm University. Series: Mathematics. Mechanics. Computer science.* 2019; 1(44):90-109. (rus.).
23. *History and mathematics: socio-economic aspects of history and modernity. yearbook* / response. ed. L.E. Grinin, A.V. Korotayev. Volgograd, Uchitel, 2018; 5-12. (rus.).
24. *Collier's Encyclopedia.* 2000; 1-22.
25. Wilson C. Predictive astronomy in the century after Kepler. *Planetary Astronomy from the Renaissance to the Rise of Astrophysics. Part A: Tycho Brahe to Newton. The General History of Astronomy.* 1989; 2:171.
26. Nazarenkova E.V., Yakovlev V.I. On the contribution to the mechanics of Alexi clero. *Mathematics and interdisciplinary research: SB. Tr. All-Russian sci-*

entific conference.- practice. *Conf. young scientists from internat. participation*. Perm, 2018; 337-338.

27. Mkrtychyan D.A. State of mechanics and practical mechanics in Russia until the middle of the XIX century. *Theory of mechanisms and machines*. 2016; 14:4(32):229-234. DOI: 10.5862/TMM.32.7

28. Allen D.H. *How Mechanics Shaped the Modern World*. Springer, 2014; 17-24.

29. Lezina E. Genesis of architectural and construction regulations in Russia. *Fundamental and applied research: problems and results: collection of materials of the XIII International scientific and practical conference* / ed. S.S. Chernov. Novosibirsk, Publishing house CRNS, 2014; 11-15. (rus).

Received January 14, 2020.

Adopted in a revised form on February 5, 2020.

Approved for publication February 26, 2020.

B I O N O T E S : **Elena V. Sysoeva** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Design of Buildings and Structures of the Institute of construction and architecture; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 755880, Scopus: 57192373360, ORCID: 0000-0001-7250-3190; SysoevaEV@mgsu.ru.