

**А.Х. Ибрагимов<sup>1</sup>, И.М. Полякова<sup>1\*</sup>**

<sup>1</sup> Международная образовательная корпорация (Кампус КазГАСА), Алматы, Казахстан

\*Corresponding author: [pim8192@mail.ru](mailto:pim8192@mail.ru)

**Информация об авторах:**

Ибрагимов Алиакбар Ходжиакбарович – магистрант факультета общего строительства, Международная образовательная корпорация (Кампус КазГАСА), Алматы, Казахстан

<https://orcid.org/0000-0001-6919-4024>, email: [pim8192@mail.ru](mailto:pim8192@mail.ru)

Полякова Ирина Марковна – кандидат технических наук, ассоциированный профессор, Международная образовательная корпорация (Кампус КазГАСА), Алматы, Казахстан

<https://orcid.org/0000-0002-4080-5423>, email: [pim8192@mail.ru](mailto:pim8192@mail.ru)

## **ЭВОЛЮЦИЯ МЕТОДОВ УЧЕТА НЕЛИНЕЙНОСТИ ПРИ РАСЧЕТЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

**Аннотация.** В данной статье рассмотрены этапы развития дисциплин, ставящих своей целью расчет строительных конструкций. Кратко описаны предпосылки и часть фундаментальных положений, которые привели к формированию такой области исследования как нелинейная строительная механика.

**Ключевые слова:** физическая нелинейность, геометрическая нелинейность, напряжения, деформации, пластичность, критерий текучести, упругопластический материал.

Вопросами учета нелинейного характера работы различных конструкций занимается такая область знаний как нелинейная строительная механика, которая, в свою очередь, является логическим продолжением линейной строительной механики [1].

Фундаментальная база этой науки была создана знаменитым ученым Робертом Гуком, который сформулировал законы зависимости напряжения от деформации, одним из которых был закон линейно-упругой деформации. Подобный упрощенный взгляд на процесс деформирования помог дать мощный толчок развития в сфере расчета строительных конструкций (рис. 1).

На основании принципов линейной механики были созданы такие методы расчета как метод расчета по допускаемым напряжениям и метод расчета по предельному равновесию. Однако построить наиболее глубокую картину расчета и объединить в себе все актуальные на тот момент теоретические положения позволил только метод расчета по предельным состояниям [2].

На начальном этапе в рамках данного метода выделили два вида нелинейности, учет которых позволит максимально возможно описать поведение конструкции под нагрузкой с учетом имеющегося на тот момент теоретического и технического оснащения. Однако сразу стоит отметить, что для высокой точности необходимо применять сразу несколько видов нелинейности.

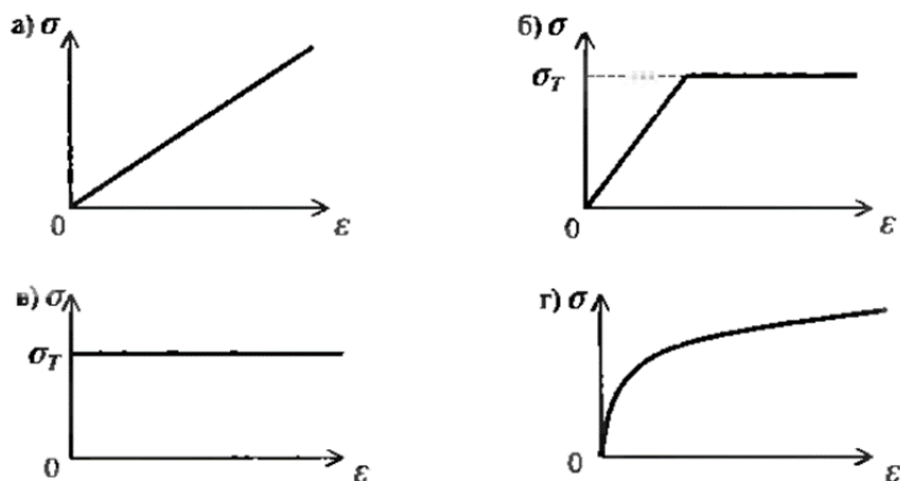


Рисунок 1 – Диаграммы деформирования материала: а – линейно-упругий; б – идеально упругопластический; в – жесткопластический; г – нелинейно упругий.

Поэтому ученый Новожилов В.В. предложил следующим образом классифицировать задачи механики:

- 1) Физически и геометрически линейные задачи;
- 2) Физически нелинейные, геометрически линейные задачи;
- 3) Физически линейные, геометрически нелинейные задачи;
- 4) Физически и геометрически нелинейные задачи.

В связи с тем, что учет нелинейности влечет за собой многократное увеличение сложности и трудоемкости расчета возникла огромная необходимость в разработке методов, которые помогут в достаточной степени упростить и при этом ускорить выполнение расчета, при этом сохранить должную точность на прежнем уровне, либо добиться минимизации отклонения [3].

С целью подобного упрощения была разработана и принята в качестве основной гипотеза, описывающая поведение нелинейно-упругого материала. В рамках данной гипотезы было сохранено постоянство зависимости между напряжениями и деформациями в процессах загрузки и разгрузки. Работой в сфере разработки данной гипотезы долгое время занимался ученый Качанов Л.М. Им была доказана теорема: «При активной пластической деформации поведение упругопластического тела неотлично от поведения нелинейно-упругого тела с такой же зависимостью между напряжениями и деформациями». Упругопластическим в свою очередь называется материал, обладающий физической нелинейностью, в котором зависимость между напряжениями и деформациями в процессе нагрузки отличается от таковой в процессе разгрузки (рис. 2).

Возникшие в рамках данной гипотезы вопросы, связанные с появлением пластических деформаций и соответствующих данным деформациям напряжений уже невозможно решить посредством методов, выведенных в рамках используемой ранее теории упругости. Поэтому возникает необходимость в изучении подобных процессов с точки зрения появившейся позже дисциплины под названием теория пластичности.



Рисунок 2 – Диаграммы деформирования физически нелинейного материала:  
а – нелинейно-упругий, б – упругопластический.

Точкой появления теории пластичности можно назвать момент проведения экспериментов знаменитого ученого Анри Эдуард Треска. В рамках своих экспериментов Анри Эдуард Треска изучал необратимое деформирование твердых тел. Это привело к появлению такого понятия, как пластическая деформация. Также им был сделан вывод о существовании некой характеристики исследуемого объекта, которая выражает такое максимальное значение касательных напряжений, при котором материал переходит в пластическую стадию работы.

Это подтолкнуло его к формированию первой в своем роде теории максимальных касательных напряжений. К числу главных выводов данной теории можно отнести первого критерия пластичности, более широко известного в научных кругах как критерий текучести Треска [4].

Данный критерий записывается в математическом виде посредством главных напряжений (рис. 3). Если предположить, что:

$$\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$$

критерий Треска можно сформулировать в виде

$$1/2 (\sigma_1 - \sigma_3) = C_Y = \text{const}$$

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – главные напряжения;

$C_Y$  – величина максимального касательного напряжения, при котором начинается пластическая стадия работы исследуемого материала.

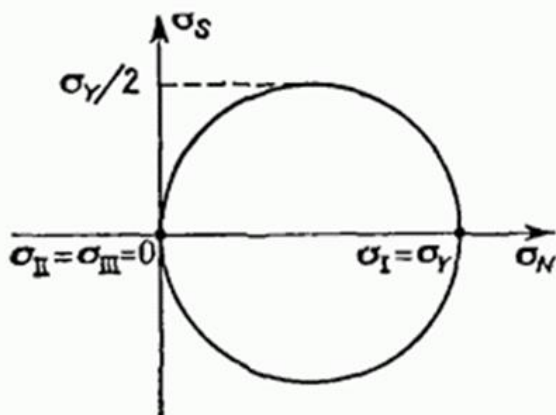


Рисунок 3 – Круги Мора при простом растяжении

Далее развитием идей Анри Эдуард Треска занимался такой ученый как Сен-Венан. Именно он и построил первую математически оформленную теорию пластичности. Доработкой идей этих ученых и окончательным построением фундаментальных положений теории пластичности занимался ученый Рихард Эдлер фон Мизес [5].

Задачи одновременно физически и геометрических нелинейные требуют усилий, которые превышают усилия, затраченные на исследования только физически или только геометрически нелинейных задач. Поэтому их решение уже было невозможно без применения высокопроизводительных ЭВМ.

После приобретения необходимых расчетных мощностей Власовым В.В. и Феодосьевым В.И. были разработаны методы последовательных нагружений и шаговый метод, которые и лежат в основе нелинейных расчетов, выполняемых современными расчетными комплексами, такими как ЛИРА САПР, ЛИРА СОФТ, SCAD и т.д.

### **Выводы**

В данной статье мы рассмотрели путь, проделанный учеными всего мира в поисках методов, которые позволят наиболее точно отразить работу конструкций под нагрузкой. Была продемонстрировано развитие идей нелинейности, начиная от простейших представлений Роберта Гука, который сформировал базу для таких дисциплин, как сопротивление материалов и строительная механика и, заканчивая работами, которые легли в основу формирования нелинейного расчетного процессора, который используют все современные расчетные программные комплексы, построенные на базе метода конечных элементов.

Данный путь занял большой отрезок времени и нельзя сказать, что сейчас мы находимся в финальной точке этого маршрута. Однако с каждым днем совершается все больше и больше научных открытий в том числе, связанных со сферой строительства, что приближает нас ко дню, когда мы можем описать и предугадать поведение зданий в процессе эксплуатации, что сделает нашу жизнь намного безопасней.

### **Литература:**

1. Петров В.В. *Нелинейная инкрементальная строительная механика*. – М.: «Инфра-Инженерия», 2014.
2. Рудых О.Л., Соколов Г.П., Пахомов В.Л. *Введение в нелинейную строительную механику*. – М.: Изд-во АСВ, 1998.
3. Карпенко Н.И. *Общие модели механики железобетона*. – М.: «Стройиздат», 1996.
4. Бондаренко В.М. *Некоторые вопросы нелинейной теории железобетона*. – Харьков: Изд-во Харьковского университета, 1968.
5. Работнов Ю.Н. *Механика деформируемого твердого тела*. – М.: «Наука», 1988.

### **References:**

1. Petrov V.V. *Nonlinear, incremental structural mechanics*. – M.: Infra-Engineering, 2014.
2. Rudich O.L., Sokolov G.P., Pakhomov V.L. *Introduction to nonlinear mechanical construction*. – M.: ASV, 1998.

3. Karpenko N. I. *General models of the mechanics of reinforced concrete*. – M.: «Stroyizdat», 1996.
4. Bondarenko V.M. *Some questions of the nonlinear theory of reinforced concrete*. – Kharkiv: Publishing House of the Kharkiv University, 1968.
5. Rabotnov Yu.N. *Mechanics of a deformable solid*. – M.: «Nauka», 1988.

**А.Х. Ибрагимов<sup>1</sup>, И.М. Полякова<sup>1\*</sup>**

<sup>1</sup>Халықаралық білім беру корпорациясы (ҚазБСҚА кампусы), Алматы, Қазақстан

\*Corresponding author: pim8192@mail.ru

**Авторлар жайлы ақпарат:**

Ибрагимов Алиакбар Ходжаикбарович – Жалпы құрылыс факультеті магистранты, ХБК (ҚазБСҚА кампусы), Алматы, Қазақстан

<https://orcid.org/0000-0001-6919-4024>, email: [pim8192@mail.ru](mailto:pim8192@mail.ru)

Полякова Ирина Марковна – техника ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, Халықаралық білім беру корпорациясы (ҚазБСҚА кампусы), Алматы, Қазақстан

<https://orcid.org/0000-0002-4080-5423>, email: [pim8192@mail.ru](mailto:pim8192@mail.ru)

## **ҚҰРЫЛЫС ҚҰРЫЛЫМДАРЫН ЕСЕПТЕУДЕГІ ЖАҚСЫЗ ЕСЕПТІЛІКТІ ЕСЕП АЛУ ӘДІСТЕРІНІҢ ЭВОЛЮЦИЯСЫ**

**Аңдатпа.** Бұл мақалада құрылыс құрылымдарын есептеуді мақсат ететін пәндердің даму кезеңдері қарастырылған. Сызықтық емес Құрылыс механикасы сияқты зерттеу саласын қалыптастыруға әкелген іргелі ережелердің алғышарттары мен бөлігі қысқаша сипатталған.

**Түйін сөздер:** физикалық сызықтық емес, геометриялық сызықтық емес, кернеу, деформация, икемділік, сұйықтық өлшемі, серпімді пластикалық материал.

**A.Kh. Ibragimov<sup>1</sup>, I.M. Polyakova<sup>1\*</sup>**

<sup>1</sup>International Educational Corporation (KazGASA campus), Almaty, Kazakhstan

\*Corresponding author: pim8192@mail.ru

**Information about authors:**

Ibragimov Aliakbar – Master of the Faculty of General Construction, IEC (KazGASA campus), Almaty, Kazakhstan

<https://orcid.org/0000-0001-6919-4024>, email: [pim8192@mail.ru](mailto:pim8192@mail.ru)

Polyakova Irina – Candidate of technical science, associate prof., IEC (KazGASA campus), Almaty, Kazakhstan

<https://orcid.org/0000-0002-4080-5423>, email: [pim8192@mail.ru](mailto:pim8192@mail.ru)

## **EVOLUTION OF METHODS FOR ACCOUNTING NONLINEARITY IN CALCULATION OF BUILDING STRUCTURES**

**Abstract.** This article discusses the stages of development of disciplines that aim to calculate building structures. The prerequisites and some of the fundamental provisions that led to the formation of such a field of research as nonlinear structural mechanics are briefly described.

**Keywords:** Physical nonlinearity, geometric nonlinearity, stresses, deformations, plasticity, yield criterion, elastic-plastic material.