



**ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА ПОРОД И ОБДЕЛОК
ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ТОННЕЛЕЙ, СООРУЖАЕМЫХ ВБЛИЗИ ГОРНОГО СКЛОНА**

С. В. Анциферов, А. В. Фомин, А. А. Феклин, М. А. Кудрявцев

Тулский государственный университет,

E-mail: antsser@mail.ru, favr_93@mail.ru, afeklin1@gmail.com, maks.kudravtcev@yandex.ru,
просп. Ленина 92, г. Тула 300012, Россия

Для исследования напряженного состояния объектов геомеханической системы “массив грунта с наклонной земной поверхностью – комплекс параллельных тоннелей” используется аналитический метод расчета, разработанный на основе полученного нового решения соответствующей задачи теории упругости. Метод расчета реализован в виде компьютерной программы, позволяющей выполнять численное моделирование при практическом проектировании. Приводятся примеры расчета.

Наклонная земная поверхность, параллельные тоннели, обделка, аналитический метод, расчет, напряженное состояние

**STUDY OF STRESS STATE OF THE ROCK MASS AND LINING
OF PARALLEL TUNNELS CONSTRUCTED NEAR THE MOUNTAIN SLOPE**

S. V. Antsiferov, A. V. Fomin, A. A. Feklin, and M. A. Kudryavtsev

Tula State University,

E-mail: antsser@mail.ru, favr_93@mail.ru, afeklin1@gmail.com, maks.kudravtcev@yandex.ru,
pr. Lenina 92, Tula 300012, Russia

To study the stress state of “soil body with an inclined earth surface – a system of parallel tunnels” objects, an analytical calculation method is used, which is developed on the basis of obtained new solution to corresponding elasticity theory problem. This method is implemented as a computer program that allows numerical modeling in practical design. Examples of calculation are given.

Inclined earth surface, parallel tunnels, lining, analytical method, calculation, stress state

Возведение объектов различного назначения, в том числе в горных районах, нередко требует их сооружения подземным способом на малых глубинах. Результаты натурных [1–3], лабораторных исследований [4], компьютерного моделирования с использованием специализированных геомеханических программных комплексов [5–8] свидетельствуют об изменении напряженно-деформированного состояния окружающего выработки массива пород и конструкций подземных сооружений, негативно отражающихся на их несущей способности.

До недавнего времени не существовало аналитического метода расчета крепи горных выработок и обделок тоннелей, находящихся вблизи склона, при действии гравитационных сил, обусловленных собственным весом пород, которые позволяли бы учесть влияние на напряженное состояние конструкций компактного расположения выработок и наклонной земной поверхности [9, 10]. Рекомендации по учету влияния этих факторов на напряженно-деформированное состояние подземных конструкций в нормативно-технических документах [11, 12] отсутствуют.

Цели и задачи исследования. Цель работы — изучение закономерностей изменения напряженного состояния монолитных бетонных обделок двух вертикально расположенных параллельных тоннелей, сооруженных вблизи склона, при различных сочетаниях основных влияющих

факторов. Полученные зависимости установлены в результате численных экспериментов, выполненных с помощью разработанной авторами компьютерной программы, реализующей аналитический метод расчета [13].

Метод основан на математическом моделировании взаимодействия элементов единой деформируемой геомеханической системы “массив пород – наклонная земная поверхность – обделка параллельных тоннелей”, базирующегося на теоретических положениях геомеханики и механики подземных сооружений, а также на использовании математического аппарата теории функций комплексного переменного, позволяющего получить решение соответствующей задачи механики сплошных сред [13, 14].

Постановка задачи теории упругости. Рассматривается равновесие полубесконечной весомой линейно-деформируемой среды с наклонной границей, ослабленной конечным числом круговых отверстий, которые подкреплены концентрическими кольцами, сделанными из материалов с отличающимися деформационными характеристиками. Среда и подкрепленные отверстия моделируют поперечное сечение обделок комплекса параллельных тоннелей. В среде существует поле начальных напряжений, отвечающих за действие гравитационных сил в массиве. Для определения компонент этого поля при отсутствии экспериментальных данных предложено использовать результаты решения задачи о равновесии сплошной весомой полуплоскости с наклонной границей. Для определения полных напряжений в среде, моделирующей массив пород, находятся суммы начальных и искомых дополнительных напряжений, обусловленных наличием в полубесконечной среде подкрепленных отверстий. В постановке задачи влиянием собственного веса обделок на формирование напряженно-деформированного состояния элементов геомеханической системы по сравнению с весом окружающего массива пород пренебрегаем, поэтому начальные напряжения в кольцах, моделирующих обделки, отсутствуют. На линии контакта среды и колец — сред с различными деформационными характеристиками — выполняются условия непрерывности векторов полных напряжений и дополнительных смещений. Внутренние контуры колец, подкрепляющих отверстия, свободны от действия внешних нагрузок.

Описание решения задачи. Строгое решение поставленной задачи теории упругости получено методом Арамановича И. Г. [15] с использованием потенциалов Колосова – Мухелишвили, модифицированного в работах [9, 10, 15]. Этот метод базируется на математическом аппарате теории аналитических функций комплексного переменного, который предусматривает выполнение аналитического продолжения комплексных потенциалов через границу полуплоскости, теоремы Сохоцкого – Племеля, свойств интегралов типа Коши и рядов Лорана [16].

Полученное решение положено в основу метода расчета, реализованного в виде полного алгоритма и компьютерной программы, с помощью которой можно определить напряженное состояние массива пород и конструкций подземных сооружений с учетом ряда технологических факторов, оказывающих существенное влияние на несущую способность подземных конструкций — последовательности проходки выработок, отставания возведения обделок от забоя каждого из тоннелей, реологических свойств пород, с использованием теории линейной наследственной ползучести.

Далее приведены результаты численного моделирования, позволившие установить закономерности формирования напряженного состояния обделок двух одинаковых параллельных тоннелей, центры поперечных сечений которых расположены на одной вертикали при различных сочетаниях основных влияющих факторов: угла наклона земной поверхности к горизонту, соотношения модулей деформации массива пород и материала обделок, коэффициента бокового давления в массиве.

Примеры расчета. Расчетная схема, использованная при определении напряженного состояния монолитных бетонных обделок тоннелей кругового поперечного сечения, приведена на рис. 1. Она предусматривает одновременную проходку выработок и их крепление непосредственно в забое, что является наилучшим сочетанием при формировании напряженно-деформированного состояния обделок.

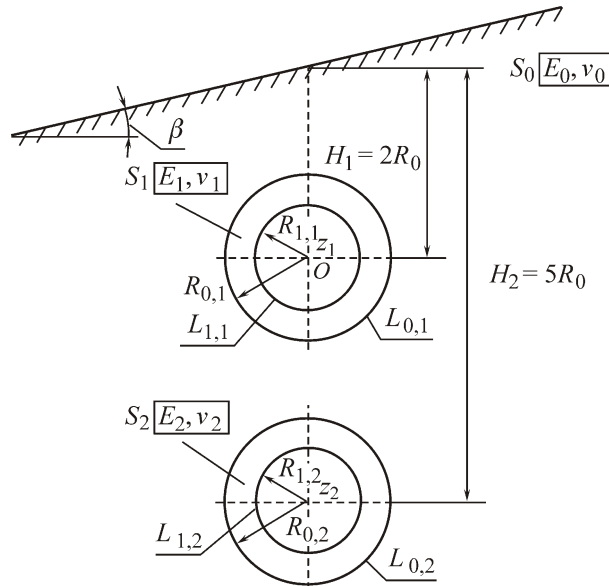


Рис. 1. Расчетная схема

На рис. 2 представлены эпюры нормальных тангенциальных напряжений σ_θ на наружных и внутренних контурах поперечных сечений обделок одиночных тоннелей при горизонтальной земной поверхности ($\beta = 0^\circ$), расположенных соответственно на глубине $H = 2R_0$ (рис. 2а, б) и $H = 5R_0$ (рис. 2в, г). Видно, что при таких исходных данных в обделках тоннелей появляются как растягивающие (положительные), так и сжимающие (отрицательные) нормальные тангенциальные напряжения. Максимальные растягивающие напряжения на наружном контуре сечения обделки тоннеля при глубине $2R_0$ возникают в точках горизонтального диаметра сечения обделки ($\theta = 0^\circ, \theta = 180^\circ$); максимальные сжимающие — в нижней точке вертикального диаметра при $\theta = 270^\circ$. Угол θ отсчитывается от горизонтали против хода часовой стрелки. На внутреннем контуре максимальные растягивающие напряжения возникают в точках при $\theta = 270^\circ$; максимальные сжимающие напряжения — при $\theta = 350^\circ$ ($\theta = 190^\circ$ с учетом симметрии). Аналогичное распределение напряжений имеет место и для одиночного тоннеля, расположенного на глубине $5R_0$ (рис. 2в, г).

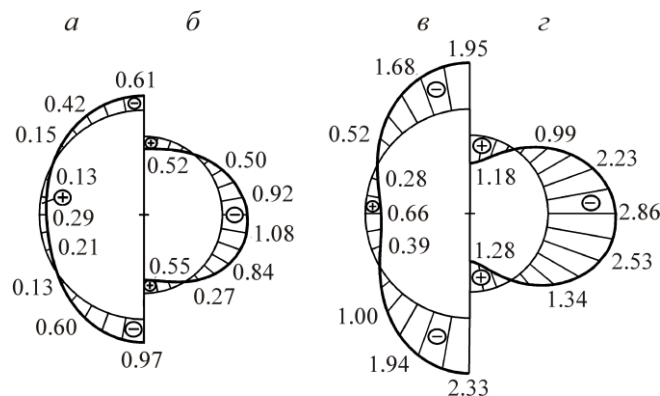


Рис. 2. Эпюры напряжений σ_θ , МПа на наружных и внутренних контурах обделок тоннелей при горизонтальной земной поверхности: а, б — при $H = 2R_0$; в, г — при $H = 5R_0$

На рис. 3 показаны эпюры напряжений σ_θ на наружных и внутренних контурах поперечных сечений обделок верхнего (рис. 3а, б) и нижнего (рис. 3в, г) тоннелей при наклонной земной поверхности ($\beta = 45^\circ$). Для сравнения пунктирными линиями изображены эпюры напряжений σ_θ на контурах поперечных сечений обделок одиночных тоннелей, расположенных на тех же глубинах при $\beta = 45^\circ$.

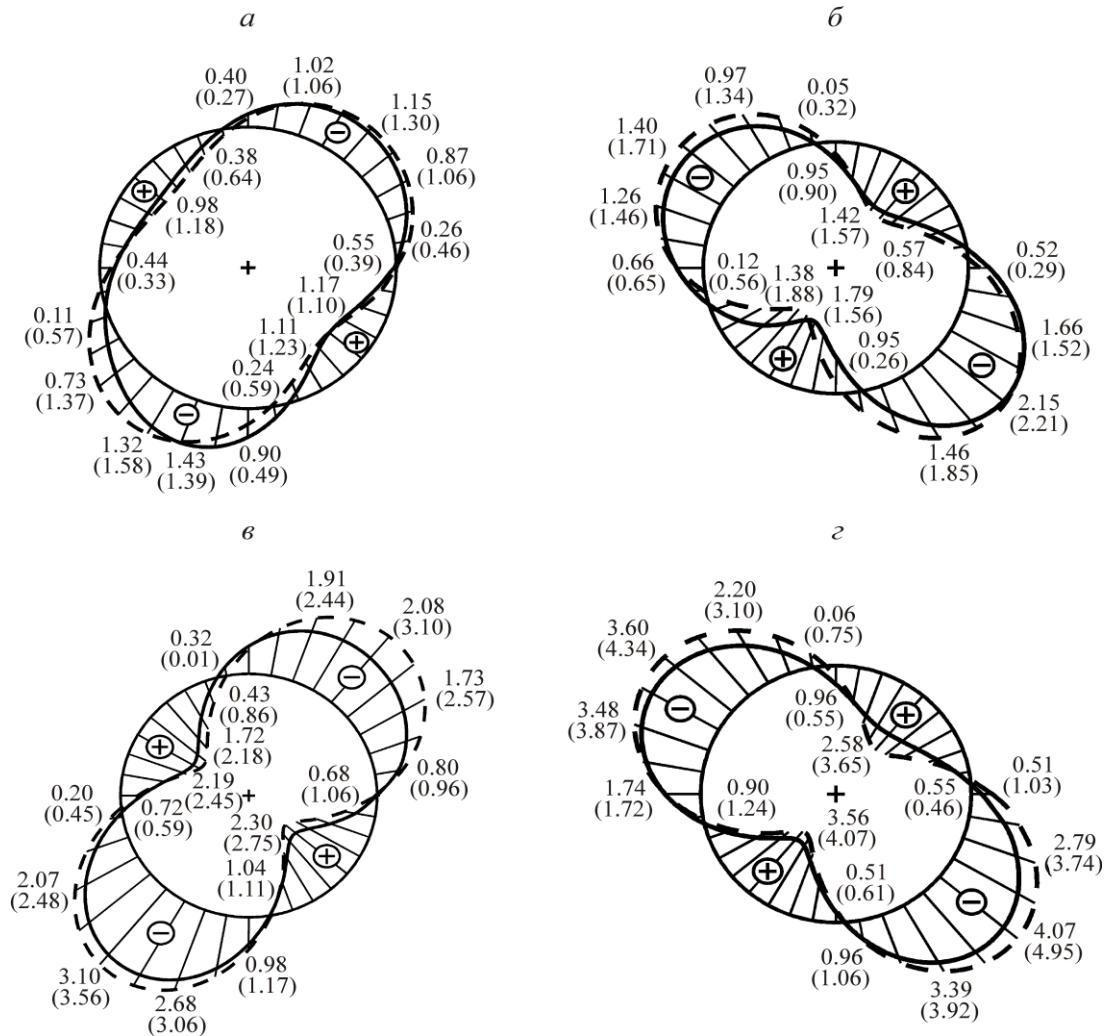


Рис. 3. Эпюры напряжений σ_θ , МПа на наружных и внутренних контурах обделок: а, б — верхнего тоннеля; в, г — нижнего тоннеля при наклонной земной поверхности

Эпюры напряжений на контурах обделок тоннелей при наклонной поверхности имеют выраженный асимметричный характер. Максимальные значения как растягивающих, так и сжимающих напряжений возникают в точках внутренних контуров поперечных сечений обделок. Из представленных эпюр следует, что близко расположенная наклонная земная поверхность приводит к многократному (до четырех раз) увеличению значений максимальных растягивающих напряжений как на наружном, так и на внутреннем контурах сечения тоннелей и практически двукратному увеличению максимальных сжимающих напряжений.

Результаты расчета обделок тоннелей с учетом близкого расположения наклонной земной поверхности показывают, что взаимное влияние двух параллельных тоннелей, центры поперечных сечений которых лежат на вертикальной прямой, приводит к уменьшению значений максимальных растягивающих и сжимающих напряжений σ_θ в обделках обоих тоннелей, причем более интенсивному в нижнем тоннеле.

На рис. 4 даны зависимости максимальных растягивающих и максимальных сжимающих напряжений σ_θ , возникающих в точках внутренних контуров сечений обделок тоннелей, от величины угла наклона земной поверхности β при следующих исходных данных: $E_0 = 20$ МПа, $\nu_0 = 0.3$, $E_1 = E_2 = 27000$ МПа, $\nu_1 = \nu_2 = 0.2$, коэффициент бокового давления $\lambda = 0.5$.

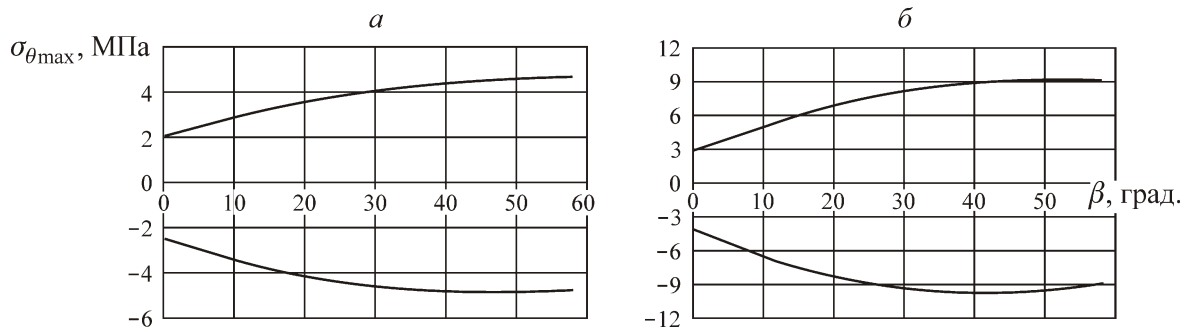


Рис. 4. Зависимости максимальных напряжений σ_θ от угла β на внутренних контурах обделок тоннелей: *a* — верхнего; *б* — нижнего

Установлено, что с увеличением угла β от 0° до предельно возможного, обеспечивающего минимальный целик между контуром выработки и земной поверхностью, наблюдается монотонное нелинейное увеличение в обделках обоих тоннелей максимальных растягивающих и максимальных сжимающих напряжений; при $\beta \approx 45^\circ$ обнаружен экстремум (максимум) для сжимающих напряжений в верхнем тоннеле и для растягивающих и сжимающих напряжений в нижнем. Аналогичные зависимости получены для максимальных нормальных тангенциальных напряжений, возникающих на контуре выработок в массиве пород.

ВЫВОДЫ

Достоверность представленных результатов подтверждается постановкой задачи исследования с использованием фундаментальных теоретических положений механики сплошной среды, геомеханики и механики подземных сооружений, выбором апробированной математической модели, которая дает возможность адекватно учесть влияние на напряженно-деформированное состояние элементов рассматриваемой геомеханической системы, достижением высокой точности выполнения граничных условий решаемой задачи теории упругости, удовлетворительным качественным и количественным согласованием результатов с данными, полученными другими авторами.

В настоящее время продолжается работа по совершенствованию математической модели, позволившей учесть влияние зон технологически неоднородного грунта вокруг выработок. Это может быть как ослабление грунта вокруг тоннелей вследствие проведения буровзрывных работ, так и укрепление грунта в результате использования специальных способов строительства, например предварительного инъекционного упрочнения. Изменение деформационных характеристик массива, как показывают расчеты обделок тоннелей, сооруженных в технологически неоднородных грунтах, существенно влияет на несущую способность подземных конструкций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Bezrodny K. P. and Lebedev M. O. Formation of the stressed state of temporary support during the construction of the transport tunnel of the North Caucasus Railways near the slope, Mining Information and Analytical Bulletin, 2012, no. 6, pp. 237–244. [Безродный К. П., Лебедев М. О. Формирование напряженного состояния временной крепи при строительстве транспортного тоннеля СКЖД вблизи склона // ГИАБ. — 2012. — № 6. — С. 237–244.]

2. **Belyakov N. A.** Geomechanical substantiation of the parameters of fastening of railway tunnels in the conditions of the North Caucasus, *Journal of Mining Institute*, 2010, vol. 186. pp. 99–103. [**Беляков Н. А.** Геомеханическое обоснование параметров крепления железнодорожных тоннелей в условиях Северного Кавказа // Записки горного института. — 2010. — Т. 186. — С. 99–103.]
3. **Causse L., Cojean R., and Fleurisson J.-A.** Interactions Between Tunnels and Unstable Slopes: Role of Excavation, XII IAEG Congress, Sep. 2014, Turin, Italy, pp. 237–242.
4. **Bogomolov A. N., Abramov G. A., Bogomolova O. A., and Pristanskov A. A.** Distribution of stresses in a homogeneous isotropic slope, weakened by a horizontal round working located at the level of its base, *Bulletin of Perm National Research Polytechnic University, Construction and architecture*, 2017, vol. 8, no. 2. pp. 15–26. [**Богомолов А. Н., Абрамов Г. А., Богомолова О. А., Пристансков А. А.** Распределение напряжений в однородном изотропном откосе, ослабленном горизонтальной круглой выработкой, расположенной на уровне его подошвы // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. — 2017. — Т. 8. — № 2. — С. 15–26.]
5. **Lebedev M. O.** Formation of a stressed state of temporary support during the construction of a transport tunnel near the slope, *Journal of Mining Institute*, 2012, vol. 199, pp. 161–167. [**Лебедев М. О.** Формирование напряженного состояния временной крепи при строительстве транспортного тоннеля вблизи склона // Записки горного института. — 2012. — Т. 199. — С. 161–167.]
6. **Protosenya A. G. and Belyakov N. A.** Method for predicting the stress-strain state of the lining of two mutually influencing tunnels taking into account the construction technology, *Journal of Mining Institute*, 2012, vol. 199. pp. 128–133. [**Протосеня А. Г., Беляков Н. А.** Метод прогноза напряженно-деформированного состояния обделок двух взаимовлияющих тоннелей с учетом технологии строительства // Записки Горного института. — 2012. — Т. 199. — С. 128–133.]
7. **Ashtiani M., Palassi M., and Ahmadi A.** Effect of Excavation of Tunnels in the Convex Slopes Using Distinct Element Method, *Rock Mechanics in Civil and Environmental Engineering*. January 2010, pp. 391–394.
8. **Koizumi Y., Lee J., Date K., Yokota Y., Yamamoto T., and Fujisawa K.** Numerical Analysis of Landslide Behavior Induced by Tunnel Excavation, *Rock Mechanics in Civil and Environmental Engineering*, Conference: European Rock Mechanics Symposium (EUROCK 2010), Lausanne, Switzerland, pp. 555–558.
9. **Sammal A. S. and Knyazeva S. V.** Calculation of a multilayer lining of a tunnel constructed near a slope on the action of the own weight of rocks, *Bulletin of the Tula State University, Series Geomechanics. Mechanics of Underground Structures*, 2004, issue. 2, pp. 3–11. [**Саммаль А. С., Князева С. В.** Расчет многослойной обделки тоннеля, сооружаемого вблизи склона на действие собственного веса пород // Изв. ТулГУ. Сер. Геомеханика. Механика подземных сооружений. — 2004. — Вып. 2. — С. 3–11.]
10. **Fotieva N. N., Antziferov S. V., and Korneeva N. N.** Designing Tunnel Linings Located Near Slopes, *Geotechnics 99? The Base of the Modern Technologies of Constructions*, Ostrava, Czech republic, 21-22 September 1999, pp. 88–90.
11. **SP 122.13330.2012.** Railway and road tunnels. Updated edition of SNiP 32-04-97 (with Amendment no. 1), Moscow, Ministry of Regional Development of Russia, 2012. 112 pp. [**СП 122.13330.2012.** Тоннели железнодорожные и автодорожные. Актуализированная редакция СНиП 32-04-97 (с изменением № 1). — М.: Минрегион России. — 2012. — 112 с.]
12. **SP 69.13330.2011.** Underground mine workings, Moscow, Rosstandart, 2011, 22 pp. [**СП 69.13330.2011.** Подземные горные выработки. — М.: Росстандарт, 2011. — 22 с.]
13. **Antsiferov S. V., Sammal A. S., and Fomin A. V.** On the stress state of the monolithic lining of mine workings, built near the slope, *Fundamental and Applied Mining Science*, 2019, vol. 6, no. 1. pp. 46–51. [**Анциферов С. В., Саммаль А. С., Фомин А. В.** О напряженном состоянии монолитной крепи горных выработок, сооруженных вблизи склона // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2019. — Т. 6. — № 1. — С. 46–51.]

14. **Antsiferov S. V. and Fomin A. V.** Mathematical modeling of the interaction of the lining of parallel tunnels, built near the slope, with a mass of soil, Bulletin of the Tula State University. Earth sciences, 2017, no. 4, pp. 255–262. [**Анциферов С. В., Фомин А. В.** Математическое моделирование взаимодействия обделок параллельных тоннелей, сооруженных вблизи склона, с массивом грунта // Изв. ТГУ. Науки о Земле. — 2017. — № 4. — С. 255–262.]
15. **Aramanovich I. G.** On stress distribution in an elastic half-plane weakened by a reinforced circular hole, Proceedings of the Academy of Sciences USSR, Moscow, 1955, vol. 104, no. 3. pp. 372–375. [**Араманович И. Г.** О распределении напряжений в упругой полуплоскости, ослабленной подкрепленным круговым отверстием // ДАН СССР. — 1955. — Т. 104. — № 3. — С. 372–375.]
16. **Muskhelishvili N. I.** Some basic problems of the mathematical theory of elasticity, Moscow, Nauka, 1966, 707 pp. [**Мусхелишвили Н. И.** Некоторые основные задачи математической теории упругости. — М.: Наука. 1966. 707 с.]