

ГЛАВА 7

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЗКИ НА КРЕПЬ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТВОЛОВ

7.1. Методы расчета нагрузки на крепь ствола, основанные на теории расчета подпорных стен

7.2. Методы, основанные на гипотезе совместного деформирования системы «крепь ствола - порода»

7.3. Эмпирические методы определения нагрузки на крепь стволов

7.4. Численное моделирование напряжённно-деформированного состояния породного массива в окрестности вертикального ствола

Вертикальные стволы шахт являются главными в комплексе выработок, обеспечивая связь подземной части предприятия с поверхностной.

Это выработки долговременного назначения и в, этой связи, к ним предъявляют повышенные требования: крепь стволов не должна иметь повреждений, что достигается выбором соответствующего материала и надлежащим запасом прочности, который определяется расчетом.

Теории горного давления, позволяющие определить нагрузки на крепь, применительно к вертикальным выработкам характеризуются тремя направлениями.

Первое направление основано на применении простых физических моделей, в соответствии с которыми нагрузка на крепь создается боковыми породами, имеющими ту или иную степень разрушения. При этом величина нагрузки не зависит от времени, технологии и характеристик самой крепи. В основу расчетных методов этого направления положена теория расчета подпорных стен.

Второе направление основано на гипотезах взаимодействие крепи, совместно деформирующейся с окружающим породным массивом. В этом случае нагрузка на крепь зависит и от жесткости крепи, и от параметров технологии ее возведения.

Третье направление образуют эмпирические методы, которые основываются на результатах соответствующим образом обработанных и представленных шахтных и лабораторных экспериментов.

7.1. Методы расчета нагрузки на крепь ствола, основанные на теории расчета подпорных стен

Первое теоретическое решение задачи о давлении горных пород на крепь шахтного ствола было предложено М.М. Протодяконовым свыше 80 лет назад [121]. Оно основывалось на представлении о породах как несвязанной (сыпучей) среде. Известно, что в соответствии с теорией расчета подпорных стен, горизонтальное давление в такой среде равно

$$p_{\Gamma} = \gamma H \operatorname{tg}^2 \frac{90^{\circ} - \rho}{2}. \quad (7.1)$$

Расчетная схема к решению задачи приведена на рис. 7.1.

При пересечении n пластов, обладающих разными физико-механическими свойствами, М.М. Протодяконов рекомендовал вы-

числять средневзвешенное значение кажущегося угла внутреннего трения по формуле

$$\rho_{cp} = \operatorname{arctg} \frac{f_1 h_1 + f_2 h_2 + \dots + f_n h_n}{h_1 + h_2 + \dots + h_n}, \quad (7.2)$$

где f_n - коэффициент крепости n -го пласта, h_n - мощность n -го пласта.

Как следует из формулы (7.1), давление на крепь ствола имеет место в породах любой крепости, на любой глубине и пропорционально этой глубине.

Практика же показывает, что при пересечении прочных пород стенки ствола могут долгие годы сохранять устойчивость даже без крепи.

Это несоответствие теоретических выводов результатам натуральных наблюдений побудило П.М. Цимбаревича внести изменение в расчетную схему, изложенную выше [112]. Первое изменение (1933 г) состояло в том, что горизонтальная нагрузка на крепь определяясь для каждого пересекаемого стволом пласта в соответствии с его физико-механическими характеристиками (рис. 7.1).

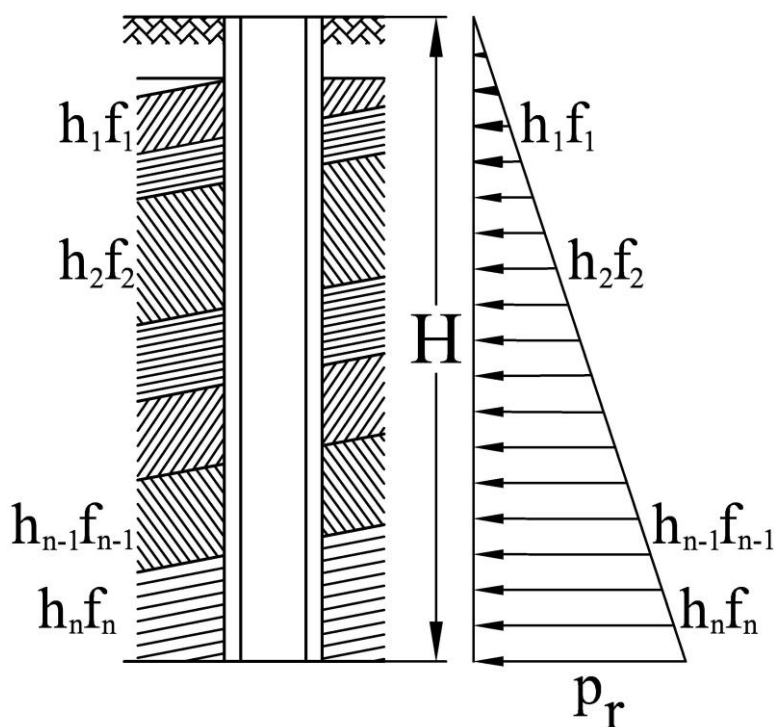


Рис. 7.1. Расчетная схема определения нагрузки на крепь ствола по М.М. Протодяконову

Величина нагрузки определялась на контактах в вышележащем p'_{n-1} и нижележащем p''_{n-1} слоях:

$$p'_{n-1} = \operatorname{tg}^2 \frac{90^\circ - \rho_{n-1}}{2} \left(\sum_{i=1}^{n-1} h_i \gamma_i \right), \quad (7.3)$$

$$p''_{n-1} = \operatorname{tg}^2 \frac{90^\circ - \rho_n}{2} \left(\sum_{i=1}^{n-1} h_i \gamma_i \right),$$

где γ_i - объемный вес пород i -го пласта; h_i - мощность i -го пласта; ρ_n и ρ_{n-1} - величина угла внутреннего трения в смежных пластах. При таких расчетах эпюра нагрузок на крепь имеет вид, изображенный на рис. 7.2.

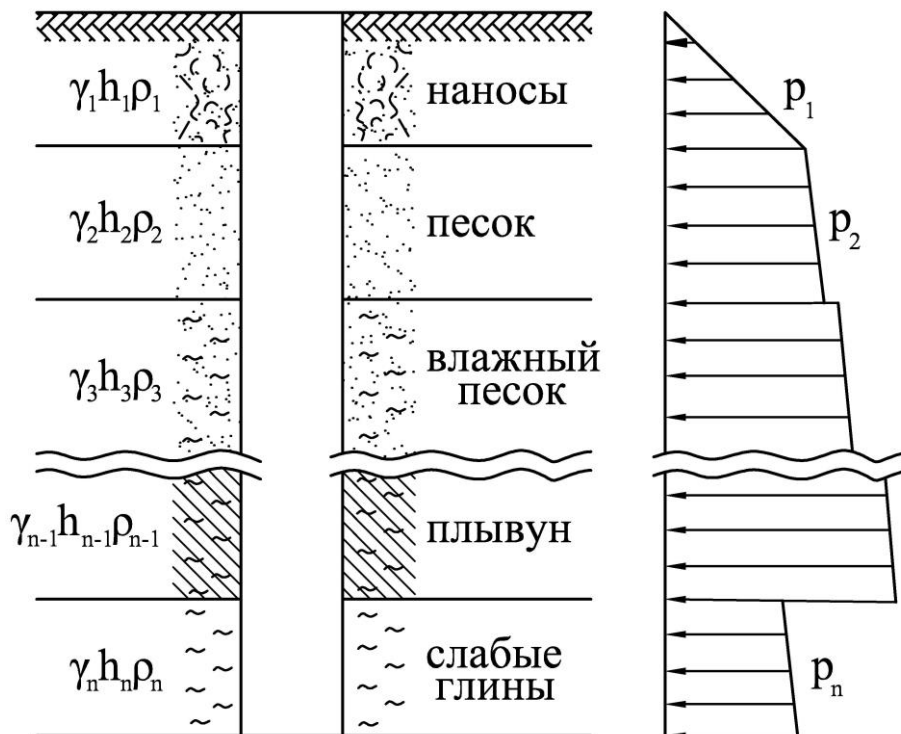


Рис. 7.2. Распределение нагрузки на крепь ствола по П.М. Цимбаревичу

В последующем (1953 г.) П.М. Цимбаревич внес второе уточнение в свой метод, учтя возможность отсутствия давления в прочных слоях породы.

Условия отсутствия давления в слое обеспечивается условием

$$R_c \geq \frac{2\mu}{1-\mu} \gamma H, \quad (7.4)$$

где R_c - предел прочности пород слоя на одноосное сжатие, μ - коэффициент Пуассона пород слоя.

В более общем виде, с учетом величины сцепления пород, изложенная выше задача была решена А.П. Максимовым [8]. Давление на крепь ствола в этом случае определяется по формуле

$$p_r = \frac{\gamma H(1 - \sin \rho) - 2C \cos \rho}{1 + \sin \rho}, \quad (7.5)$$

где C - сцепление пород.

Из формулы (7.5) можно определить ту предельную глубину, начиная с которой породы переходят в неустойчивое (сыпучее) состояние

$$H_{np} = \frac{2C}{\gamma(1 - \sin \rho)}. \quad (7.6)$$

Из формулы (7.5) вытекает формула (7.1), как частный случай.

7.2. Методы, основанные на гипотезе совместного деформирования системы «крепь ствола - порода»

В 1925 г. А.Н. Динник предложил использовать для решения задач горного давления методы теории упругости. Позднее М.М. Протоdjяконов доказал несостоятельность этих предложений, основываясь на том, что упругие деформации реализуются в твердых телах (породах) гораздо быстрее, чем может быть возведена крепь в выработке. Кроме того, наличие пород в упругом состоянии само по себе является гарантией устойчивого состояния породного массива.

В последующем попытки применения соотношений теории упругости для определения давления на крепь ствола были предприняты Г.Н. Савиным [125], И.В. Родиным [126] и др. От предложений А.Н. Динника они отличались незначительными деталями.

Первой работой, в которой были учтены пластические деформации, возникающие в процессе разрушения приконтурного породного массива, была работа Ф.А. Белаенко [127]. В основу решения заложена предпосылка о том, что давление на крепь возникает лишь на глубине, где породы под влиянием действующих напряжений переходят в пластическое состояние. Величина нагрузки - это результат совместного деформирования системы «крепь-порода».

Напряжения, действующие в нетронутом породном массиве, приняты следующими:

$$\sigma_z = \gamma H, \quad \sigma_x = \sigma_y = \frac{\mu}{1 - \mu} \gamma H.$$

Условие перехода пород в пластическое состояние имеет вид

$$S = \frac{R}{\sqrt{3}} m \varepsilon \lambda,$$

где S - интенсивность напряжения сдвига, ε - интенсивность деформаций сдвига, R - предел упругости; m и λ - параметры кривой пластического деформирования, определяемые опытным путем.

Основное условие совместной работы крепи и боковых пород определяется уравнением

$$U_{a_{t \rightarrow \infty}} - U_{a_{t \rightarrow 0}} = U_k$$

где $U_{a_{t \rightarrow \infty}}$ - конечные смещения контура выработки; $U_{a_{t \rightarrow 0}}$ - начальные смещения контура выработки; U_k - упругие смещения внешних точек цилиндра крепи.

Расчеты, выполненные Ф.А. Белаенко, достаточно сложные и громоздкие, дали результаты, хорошо согласующиеся с натурными измерениями.

В аналогичной постановке, но с учетом реологических свойств пород и материала крепи, была разработана методика расчета крепи вертикальных стволов группой авторов во главе с К.В. Руппенейтом [128]. В задаче породный массив рассматривался как упругая среда, в которой пройдена выработка с крепью. В этой среде под влиянием нагрузок возникает ползучесть деформаций и релаксация напряжений. Возведение крепи происходит с некоторым отставанием от забоя, за это время контур выработки деформируется внутрь на некоторую величину U_o . После возведения крепи процесс перемещений контура продолжается за счет ползучести деформаций, однако ему противостоит сопротивление крепи. Совместное деформирование породного массива и крепи продолжается до тех пор, пока в системе «крепь-порода» не реализуется состояние равновесия. Эта часть смещений обозначается U_q . Конечная величина смещений равна

$$U_{q(\infty)} = U_o + U_q.$$

Характер взаимодействия крепи и боковых пород показан на рис. 7.3.

При смещении крепи, равном нулю, давление на нее будет равно \mathcal{H} , а при некоторой величине смещения крепи равном U_k , давление на крепь может быть равным нулю.

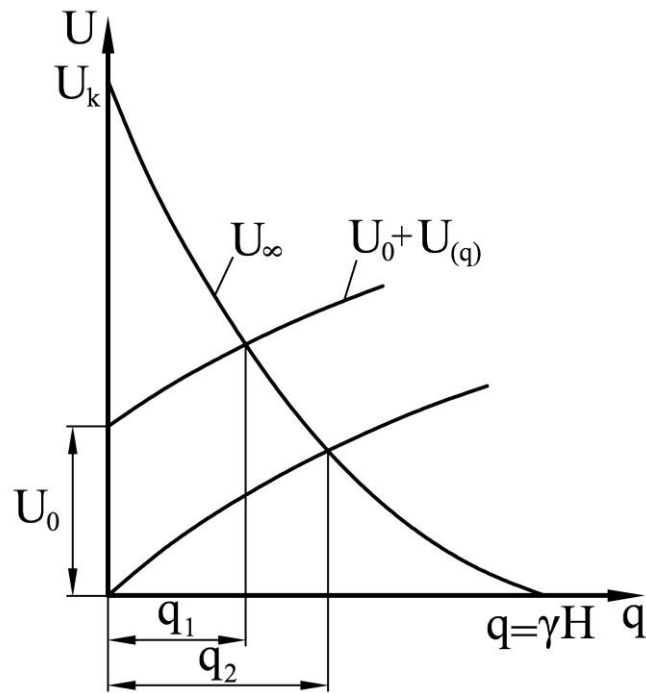


Рис. 7.3. График зависимости величины смещения пород U от давления на крепь q

При возведении крепи вслед за забоем ($U_0 = 0$) давление на крепь больше, чем при возведении крепи с отставанием от забоя ($U_0 \neq 0$). Исходя из этого, авторами для разных пород были приняты соответствующие реологические модели. В частности, для скальных пород принята модель Пойтинга-Томпсона. Задача решена отдельно для тубинговой крепи с последующим тампоном закрепного пространства и для монолитной бетонной крепи при разных технологических схемах ее возведения.

Если учесть, что для связанных пород реологические деформации относительно невелики, то часть их всегда можно компенсировать за счет технологии возведения крепи. На практике же технология сооружения стволов не оказывает столь существенного влияния на величину нагрузки на крепь.

7.3. Эмпирические методы определения нагрузки на крепь стволов

Отсутствие достаточно надежных методов определения нагрузки на крепь вертикальных стволов вызвало необходимость в постановке натуральных экспериментов в действующих стволах. Наиболее широко

эти эксперименты были выполнены во ВНИМИ. На основе обработки полученных результатов был предложен эмпирический метод расчета, заложенный в СНиП-II-94-80 [129]. Этот метод распространяется на горно-геологические условия основных угольных бассейнов (Донбасс, Кузбасс, Караганда) при цилиндрической форме крепи из монолитного и сборного бетона, железобетона и других материалов при диаметре ствола до 8 м в свету и притоке воды до 8м³/час.

Порядок расчета в соответствии со СНиП-II-94-80 следующий.

Расчет крепи протяженной части ствола производится на суммарное действие горизонтального (радиального) давления пород P_n и давления остаточного напора подземных вод P_T с учетом технологической и монтажной нагрузок.

Расчетное горизонтальное (радиальное) давление пород P_n на крепь протяженной части вертикальной выработки без учета влияния очистных работ определяют по формуле

$$P_n = n m_y n_H P^H (1 + 0,1 \cdot (R_0 - 3)), \quad (7.7)$$

где R_0 - радиус выработки в свету, м; n - коэффициент перегрузки, равный 1,3; m_y - коэффициент условий работы, зависящий от вида крепи (набрызгбетонная-0,50; сборная-0,75; монолитная-0,80); n_H - коэффициент приведения к расчетному (максимальному) давлению, при неравномерной эпюре нагрузок, табл.7.1., P^H - нормативное давление на крепь, КПа, определяемое для пород I, II, III категории в соответствии с критерием устойчивости пород по формулам:

$$\text{при } c \leq 6 \quad P^H = 10((2c - 1) + \Delta), \quad (7.8)$$

$$\text{при } 10 \geq c \geq 6 \quad P^H = 10((3c - 7) + \Delta),$$

где c - критерий устойчивости, определяемый в соответствии с [90]; Δ - параметр, учитывающий технологию проходческих работ, принимаемый равным нулю при последовательной и параллельной схемах, и равный 2-3 при совмещенной схеме.

СНиП-II-94-80 предусматривает возможность определения нагрузки на крепь ствола в районе сопряжений, а также на устье ствола.

Общим недостатком всех эмпирических методов является огромное количество коэффициентов, с помощью которых формулы приводятся к конкретным горно-геологическим условиям. Это снижает точность и надежность расчетов.

Таблица 7.1.

Коэффициент приведения

Угол залегания пород, α , град	Коэффициент n_H	
	при последовательной и параллельной схемах проходки	при совмещенной схеме проходки
До 10	2,00	1,75
От 10 до 35	2,50	2,00
более 35	2,75	2,25

7.4. Численное моделирование напряжённо-деформированного состояния породного массива в окрестности вертикального ствола

В предыдущих параграфах были рассмотрены расчетные схемы, позволяющие определить нагрузку на крепь ствола, основанные на существенной идеализации объекта исследований: гладкий контур выработки, однородная породная среда, идеальные условия контакта породного контура с крепью, однородный состав материала крепи. Реальный же объект обладает более сложными свойствами, которые распределены в пространстве случайным образом. Учесть все эти особенности можно только рассматривая численные модели.

Ниже приведен расчет напряженно-деформированного состояния геомеханической системы «крепь ствола-породный массив», выполненный в программной среде Phase 2 канадской компании Rockscience. Горно-геологические условия соответствуют проходке воздухоподающего ствола № 3 ШУ «Покровское».

Вид расчетной КЭ-модели к задаче представлен на рис. 7.4.

Полученные картины распределения коэффициента устойчивости k_y по внутреннему и внешнему контуру бетонной крепи ствола (рис. 7.5) позволяют выполнить оценку ее прочности в зависимости от степени неравномерности отклонений контура ствола в проходке, определяемой коэффициентом вариации V , % (рис. 7.5-7.8).

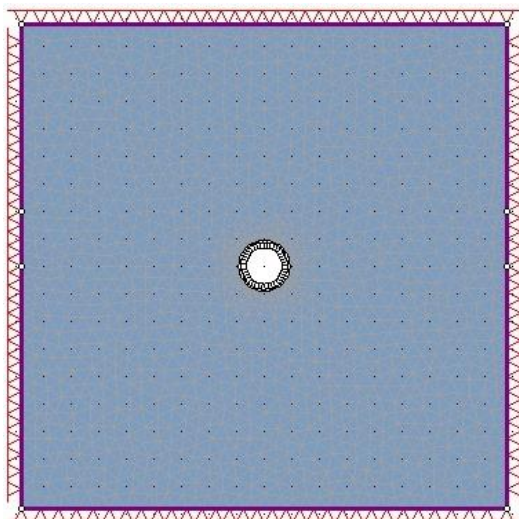


Рис. 7.4. Расчетная схема и конечно-элементная модель ствола

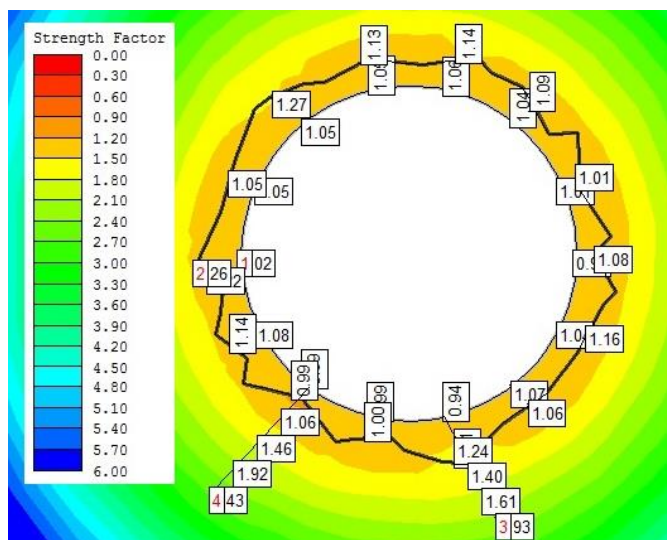


Рис. 7.5. Распределения k_y бетонной крепи ствола и приконтурного массива при коэффициенте вариации $V = 20,4 \%$

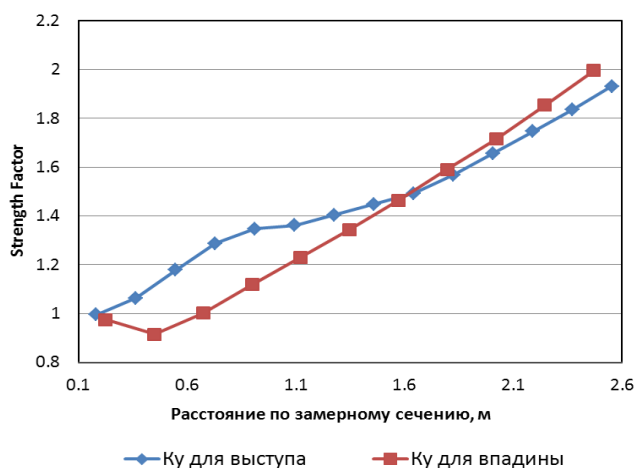


Рис. 7.6. Графики распределения k_y бетонной крепи ствола и приконтурного массива по глубине от контура ствола

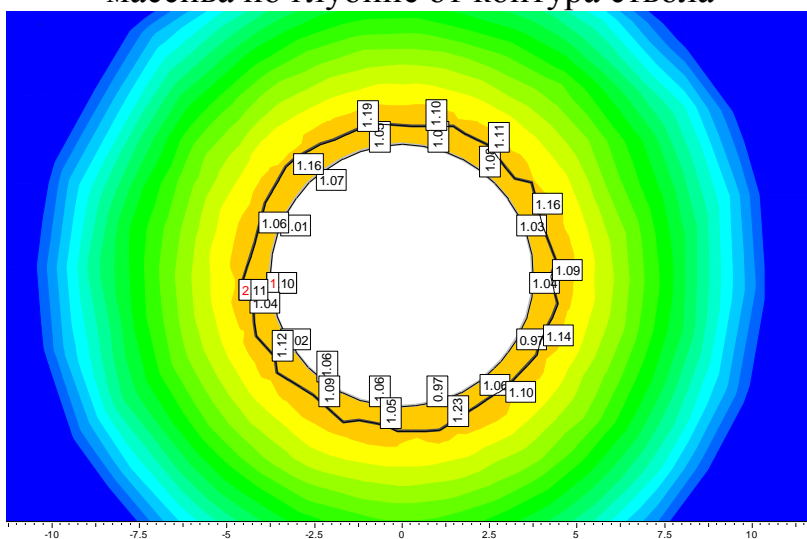


Рис. 7.7. Распределения k_y бетонной крепи ствола и приконтурного массива при коэффициенте вариации $V = 15,3 \%$

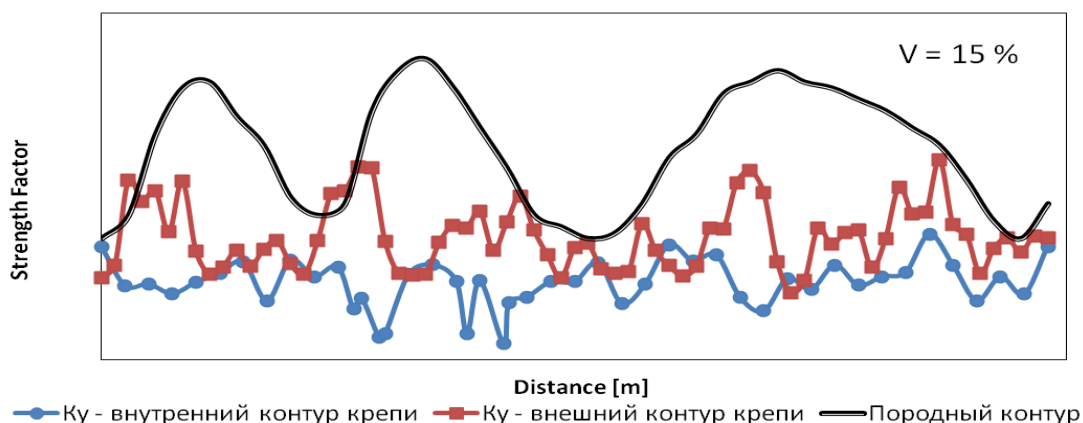


Рис. 7.8. Графики распределения k_y бетонной крепи ствола при коэффициенте вариации $V = 15,3 \%$

Расчеты позволяют определить коэффициент запаса прочности в произвольной точке крепи, учесть влияние неоднородностей, указать пути совершенствования технологии проведения ствола.

Биографическая справка



1. Максимов Александр Павлович (р. 1919) – известный советский ученый в области механики горных пород, специалист в области шахтного строительства. Автор гидродинамической теории пучения пород почвы в горных выработках.



2. Белаенко, Федор Акимович (1893-1962) – известный советский специалист в области сооружения и крепления шахтных стволов. Автор «энергетической» теории горного давления в шахтных стволах.

Контрольные вопросы и задания

1. Какие три направления теории горного давления, позволяющие определить нагрузку на крепь вертикальных стволов, известны в геомеханике?
2. На каком предположении основан расчет нагрузки на крепь вертикальных стволов по М.М. Протодяконову?
3. Какие изменения в теорию М.М. Протодяконова были внесены П.М. Цимбаревичем?
4. На каких предположениях основывается «энергетическая» теория горного давления Ф.А. Белаенко?
5. Какие физические предпосылки заложены в основу методики расчета крепи по К.В. Руппенейту?
6. Достоинства и недостатки эмпирических методов определения нагрузки на крепь вертикального ствола.
7. Изложите порядок выполнения расчётов с применением численных моделей деформирования породного массива в окрестности вертикального ствола. Что позволяет получить исследование численной модели?