

Н.Н. ФОТИЕВА

А.С. САММАЛЬ

Тульский политехнический институт, Тула, СССР

РАСЧЕТ НАБРЫЗГБЕТОННОЙ КРЕПИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК
В СОЧЕТАНИИ С АНКЕРАМИ

Резюме. Предлагается метод расчета облегченной набрызгбетонной крепи в сочетании с анкерами для горных выработок произвольного поперечного сечения, использование которого позволяет при проектировании более полно учитывать основные особенности статической работы этой конструкции. Метод базируется на исследовании взаимодействия крепи, слоя пород, укрепленных анкерами, и массива пород как элементов единой деформируемой системы, что позволяет в полной мере использовать несущую способность массива. При расчете учитывается влияние неровностей поверхности выработки на напряженное состояние крепи.

В основу разработанного метода положено аналитическое решение плоской контактной задачи для двуслойного кольца произвольной формы с неровностями, аппроксимируемыми гипотрохондальной кривой, в несомой линейно-деформируемой среде; при этом слой пород, укрепленных анкерами, моделируется как однородный с приведенным модулем деформации, величина которого определяется на основе экспериментальных данных.

Метод запрограммирован для ЭВМ ЕС. Приводятся примеры расчета.

В настоящее время одним из перспективных видов крепления является облегченная набрызгбетонная крепь в сочетании с анкерами. Опыт применения этой крепи показывает, что она с успехом может использоваться не только в благоприятных, но также и в сложных горно-геологических условиях, в том числе на больших глубинах, в выработках, подверженных влиянию очистных работ и массовых взрывов. Имеющиеся в настоящее время методы расчета набрызгбетонной крепи не в полной мере отражают особенности ее взаимодействия с массивом пород, что сдерживает расширение области применения этой экономичной конструкции.

Основной особенностью статической работы набрызгбетонной крепи является то, что набрызгбетон, наносимый на горные породы с помощью сжатого воздуха, имеет с ними непрерывный контакт по всей поверхности и образует вместе с окружающими выработку породами единую деформируемую систему. Это позволяет в полной мере использовать несущую способность массива, увеличивающуюся также вследствие наличия вокруг выработки слоя пород, укрепленных анкерами. Вместе с тем тонкое набрызгбетонное покрытие практически повторяет форму поверхности выработки, т.е. имеет неровности, которые (особенно при буровзрывном способе проходки) соизмеримы с его толщиной и могут быть причиной концентрации напряжений и разрушения крепи.

С целью более полного учета указанных особенностей при проектировании комбинированной крепи из набрызгбетона в сочетании с анкерами в Тульском политехническом институте разработан метод расчета, основанный на рассмотрении взаимодействия набрызгбетонной крепи, слоя пород, крепленных анкерами, и массива пород как элементов единой деформируемой системы с учетом влияния неровностей поверхности выработки и крепи. При этом слой пород, дискретно укрепленный анкерами, рассматривается как однородный, имеющий некоторый приведенный модуль деформации E_2 . Отношение $\beta = \frac{E_2}{E_1}$ (E_1 - модуль деформации массива пород) может быть определено в зависимости от несущей способности применяемых анкеров P_a и плотности их установки n_s (число анкеров на 1 м^2 поверхности выработки) по графику (рис. 1), построенному на основании результатов работы / 1 /.

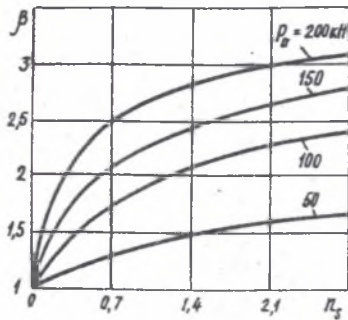


Рис. 1. Зависимости $\beta = \frac{E_2}{E_1}$ от P_a, n_s

Расчетная схема приведена на рис. 2. Среда S_1 , моделирующая массив пород с деформационными характеристиками E_1, ν_1 (соответственно модуль деформации и коэффициент Пуассона пород), слой S_2 толщиной Δ_1 равной длине анкеров l_a с

характеристиками E_2, ν_2 , моделирующий слой пород, укрепленных анкерами, и слой S_3 толщиной Δ_2 с характеристиками E_3, ν_3 , моделирующий набрызгбетонное покрытие, деформируются совместно, т.е. на линиях контакта L_1, L_2 выполняются условия непрерывности векторов смещений и полных напряжений.

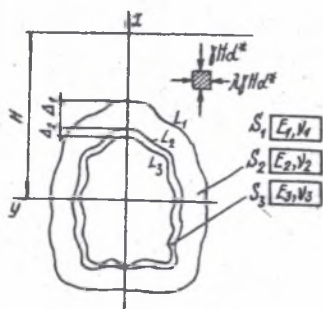


Рис. 2.

Контуры L_3 и L_2 имеют неровности, аппроксимируемые гипотрохоидальной кривой, параметры которой - число неровностей n_1 и их амплитуда δ (среднее отклонение от проектного гладкого контура) - могут задаваться на основе статистической обработки данных натуральных измерений или согласно / 2 /, соответственно

как половина отношения длины контура поперечного сечения к расстоянию между контурными шпурями и половина допустимой нормы перебора. На значение параметров неровностей накладываются ограничения

$$\frac{(n_1 - 1) \delta}{R} < 1,$$

R - средний радиус выработки.

(I)

В целях учета случайного характера распределения неровностей поверхности выработки целесообразно производить расчет дважды - как при положительном значении δ , соответствующем наличию впадины в верхней точке свода, так и при отрицательном значении δ , соответствующем наличию выступа, а для проверки прочности крепи использовать огибающую эпюр нормальных тангенциальных напряжений, полученных из двух указанных расчетов.

В области $S_1 + S_2$ имеется начальное поле напряжений, обусловленное собственным весом пород:

$$\sigma_x^{(0)} = -\gamma H d^2, \quad \sigma_y^{(0)} = -\lambda \gamma H d^2, \quad \tau_{xy} = 0. \quad (2)$$

Здесь γ - объемный вес пород, H - глубина заложения выработки, λ - коэффициент бокового давления в ненарушенном массиве, α^* - корректирующий множитель, введенный для учета отставания крепления от проходки выработки, определяемый по формуле / 3 /:

$$\alpha^* = \exp\left(-1,3 \frac{\ell}{R}\right), \quad (3)$$

где ℓ - расстояние от места, где наносится набрызгбетон, до забоя, R - средний радиус выработки.

Необходимо также учитывать, что расстояние ℓ до забоя (и, следовательно, величина α^*) должно быть ограничено условием, чтобы не произошло разрушения пород до нанесения набрызгбетона /4/

$$(1 - \alpha^*) \frac{1 + \frac{(n_1 - 1)\delta}{R}}{1 - \frac{(n_1 - 1)\delta}{R}} \leq \frac{K_{упр} R_c}{2\gamma H} \quad (4)$$

здесь $K_{упр}$ - коэффициент, введенный для учета упрочняющего действия анкеров, устанавливаемых до нанесения набрызгбетона, определяемый экспериментальным путем или по графику, приведенному на рис. 3 (если установка анкеров производится после нанесения набрызгбетона, то принимается $K_{упр} = 1$), R_c - прочность пород на сжатие.

Из формулы (4) имеем:

$$\alpha^* \geq 1 - \frac{K_{упр} R_c}{2\gamma H} \frac{1 - \frac{(n_1 - 1)\delta}{R}}{1 + \frac{(n_1 - 1)\delta}{R}} \quad (5)$$

Учитывая, что для прочных пород, где возможно большое отставание крепи от забоя, множитель $\alpha^* \rightarrow 0$, целесообразно в запас прочности конструкции принимать $\alpha^* = 0,15$.

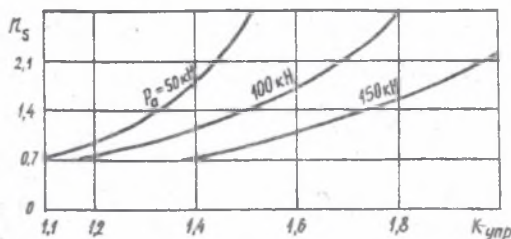


Рис. 3

Таким образом, корректирующий множитель α^* определяется формулой

$$\alpha^* = \max \left\{ \exp\left(-1,3 \frac{\ell}{R}\right), 1 - \frac{\kappa_{\text{пл}} R_c}{2fH} \frac{1 - \frac{(n_i-1)\delta}{R}}{1 + \frac{(n_i-1)\delta}{R}}, 0,15 \right\} \quad (6)$$

Поставленная задача решена авторами с использованием теории аналитических функций комплексного переменного, аппарата конформного отображения и комплексных рядов.

После представления полных напряжений в виде сумм начальных и дополнительных напряжений, вызванных проходкой выработки, определения комплексных потенциалов $\psi_i(z)$, $\bar{\psi}_i(z)$ ($i = 1, 2, 3$), регулярных в соответствующих областях S_i и обращающихся в нуль на бесконечности, граничные условия поставленной задачи для определения дополнительных напряжений имеют вид / 4 /:

$$\begin{aligned} \varphi_1(t) + t \overline{\varphi_1'(t)} + \overline{\psi_1(t)} &= \varphi_2(t) + t \overline{\varphi_2'(t)} + \overline{\psi_2(t)} \\ \kappa_1 \varphi_1(t) - t \overline{\varphi_1'(t)} - \overline{\psi_1(t)} &= \frac{\mu_1}{\mu_2} [\kappa_2 \varphi_2(t) - t \overline{\varphi_2'(t)} - \overline{\psi_2(t)}] \quad \text{на } L_1 \quad (7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \varphi_2(t) + t \overline{\varphi_2'(t)} + \overline{\psi_2(t)} &= \varphi_3(t) + t \overline{\varphi_3'(t)} + \overline{\psi_3(t)} + \left(\frac{1+\lambda}{2} t - \frac{1-\lambda}{2} \bar{t} \right) \gamma H \alpha^* \\ \kappa_2 \varphi_2(t) - t \overline{\varphi_2'(t)} - \overline{\psi_2(t)} &= \frac{\mu_2}{\mu_3} [\kappa_3 \varphi_3(t) - t \overline{\varphi_3'(t)} - \overline{\psi_3(t)}] \quad \text{на } L_2 \quad (8) \end{aligned}$$

$$\varphi_3(t) + t \overline{\varphi_3'(t)} + \overline{\psi_3(t)} = 0 \quad \text{на } L_3 \quad (9)$$

Здесь $\mu_i = \frac{E_i}{2(1+\nu_i)}$, $\kappa_i = 3-4\nu_i$ ($i = 1, 2, 3$), E_i , ν_i -

модули деформации и коэффициенты Пуассона материалов сред S_i ($i = 1, 2, 3$).

Пусть $z = \omega(\zeta)$ - рациональная функция, осуществляющая конформное отображение внешности окружности радиуса $R_3 < 1$ на внешность области, занимаемой кольцом и средой таким образом, чтобы единичная окружность Γ перешла в линию контакта L_1 .

Такое отображение получается в два этапа. Сначала определяются коэффициенты рациональной функции

$$z = \omega(\zeta_1) = \sum_{\nu=0}^m \tilde{a}_\nu \zeta_1^{1-\nu} + \tilde{a}_{n+1} \zeta_1^{-n}, \quad (10)$$

реализующей конформное отображение внешности единичной окружности на внешность внутреннего контура L_3 поперечного сечения крепи, имеющего $n_1 = n + 1$ неровностей с амплитудой (отклонением от проектного контура) $\delta = \tilde{a}_{n+1}$. Первое слагаемое функции (10), содержащее ряд с коэффициентами \tilde{a}_ν ($\nu = 1, \dots, m$), осуществляет отображение внешности единичной окружности на внешность внутреннего проектного (гладкого) контура L_3 сечения крепи; для достижения достаточной точности в практических целях можно ограничиться $m = 5$. Второе слагаемое отражает наличие неровностей, случайное распределение и амплитуды которых аппроксимируются гипотрохой.

Таким образом, функция (10) имеет вид

$$z = \omega(\zeta_1) = \sum_{\nu=0}^{n+1} \tilde{a}_\nu \zeta_1^{1-\nu}, \quad (11)$$

где $\tilde{a}_\nu = 0$ при $\nu = m + 1, m + 2, \dots, n$.

В результате преобразования (11) контурам L_1 и L_2 в плоскости переменного z будут соответствовать окружности Γ_1 и Γ_2 в плоскости ζ_1 , радиусы которых R_1^* , R_2^* определяются из решения уравнения $n + 1$ степени вида

$$\sum_{\nu=0}^{n+1} \tilde{a}_\nu x^{n-\nu+1} = 0, \quad (12)$$

где $\tilde{a}_\nu = \begin{cases} \tilde{a}_\nu, & \text{при } \nu = 0, 2, 3, \dots, n + 1, \\ \tilde{a}_\nu - (\ell_1 + \Delta + \delta), & \text{при } \nu = 1. \end{cases}$

Здесь ℓ_1 - расстояние от начала координат до верхней точки внутреннего проектного контура поперечного сечения крепи,

$$\Delta = \begin{cases} \Delta_1 + \Delta_2 & \text{для определения } R_1^*, \\ \Delta_1 & \text{для определения } R_2^*, \end{cases} \quad (13)$$

Δ_1, Δ_2 - толщины соответственно крепи и слоя пород, укрепленных анкерами.

Уравнение (12) решается дважды, и каждый раз в качестве R_1^* или R_2^* берется единственный, больший единицы действительный корень.

Далее осуществляется преобразование, при котором окружность единичного радиуса Γ в плоскости переменного ζ переходит в окружность радиуса R_1^* в плоскости переменного ζ_1 , при этом окружности радиусов R_2^* , I перейдут соответственно в окружности радиусов

$$R_2 = \frac{R_2^*}{R_1^*}, \quad R_3 = \frac{1}{R_1^*}. \quad (14)$$

Отображающая функция (II) принимает вид

$$z = \omega(\zeta) = R \left(\zeta + \sum_{\nu=1}^n q_\nu \zeta^{-\nu} \right), \quad (15)$$

где $R = \frac{\tilde{a}_0}{R_3}$, $q_\nu = \frac{\tilde{a}_{\nu+1} R_3^{\nu+1}}{\tilde{a}_0}$ ($\nu = 1, 2, \dots, n$).

В отображающей функции (15) отброшен член q_0 , влияющий лишь на положение начала координат. Вследствие симметрии контуров относительно вертикальной оси Ox все коэффициенты отображающей функции вещественны.

Граничные условия (7) - (9) в преобразованной области после операций, аналогичных приведенным в работе / 4 /, приобретают вид

$$s_1 \bar{\varphi}_1\left(\frac{1}{\sigma}\right) + l_1 \left[\frac{\bar{\omega}\left(\frac{1}{\sigma}\right)}{\omega'(\sigma)} \varphi_1'(\sigma) + \psi_1(\sigma) \right] = \frac{\bar{\omega}\left(\frac{1}{\sigma}\right)}{\omega'(\sigma)} \varphi_2'(\sigma) + \psi_2(\sigma),$$

$$t_1 \bar{\varphi}_1\left(\frac{1}{\sigma}\right) + d_1 \left[\frac{\bar{\omega}\left(\frac{1}{\sigma}\right)}{\omega'(\sigma)} \varphi_1'(\sigma) + \psi_1(\sigma) \right] = \bar{\varphi}_2\left(\frac{1}{\sigma}\right), \quad (16)$$

$$s_2 \bar{\varphi}_2\left(\frac{R_2}{\sigma}\right) + l_2 \left[\frac{\bar{\omega}\left(\frac{R_2}{\sigma}\right)}{\omega'(R_2\sigma)} \varphi_2'(R_2\sigma) + \psi_2(R_2\sigma) \right] = \frac{\bar{\omega}\left(\frac{R_2}{\sigma}\right)}{\omega'(R_2\sigma)} \varphi_2'(R_2\sigma) + \psi_3(R_2\sigma),$$

$$t_2 \bar{\varphi}_2\left(\frac{R_2}{\sigma}\right) + d_2 \left[\frac{\bar{\omega}\left(\frac{R_2}{\sigma}\right)}{\omega'(R_2\sigma)} \varphi_2'(R_2\sigma) + \psi_2(R_2\sigma) \right] = \bar{\varphi}_3\left(\frac{R_2}{\sigma}\right) + \quad (17)$$

$$+ \frac{1}{1+\alpha_3} \left[\frac{1+\lambda}{2} \bar{\omega}\left(\frac{R_2}{\sigma}\right) - \frac{1-\lambda}{2} \omega(R_2\sigma) \right] \delta H d_3^*$$

$$\bar{\psi}_3\left(\frac{R_3}{\sigma}\right) + \frac{\omega\left(\frac{R_3}{\sigma}\right)}{\omega'(R_3\sigma)} \psi_3'(R_3\sigma) + \psi_3(R_3\sigma) = 0. \quad (18)$$

Здесь введены обозначения: $t_i = \frac{1 + \alpha_i \beta_{i+1}}{1 + \alpha_{i+1}}$, $d_i = \frac{1 - \beta_{i+1}}{1 + \alpha_{i+1}}$,
 $\beta_{i+1} = \frac{E_{i+1}(1 + \nu_i)}{E_i(1 + \nu_{i+1})}$, $l_i = 1 - d_i$, $s_i = 1 - t_i$ ($i = 1, 2$),
 $\sigma = e^{i\theta}$ - точка единичной окружности Γ .

Комплексные потенциалы $\psi_i(z)$, $\psi_i(z)$ ($i = 1, 2, 3$), определяющие напряженное состояние среды и колец, голоморфны в соответствующих областях и могут быть представлены в виде рядов Лорана / 5 /

$$\psi_i(z) = \sum_{\nu=1}^{\infty} c_{\nu}^{(1)(i)} z^{-\nu} + \sum_{\nu=0}^{\infty} c_{\nu}^{(3)(i)} z^{\nu}, \quad \psi_i(z) = \sum_{\nu=1}^{\infty} c_{\nu}^{(2)(i)} z^{-\nu} + \sum_{\nu=0}^{\infty} c_{\nu}^{(4)(i)} z^{\nu} \quad (19)$$

$$c_{\nu}^{(3)(i)} = c_{\nu}^{(4)(i)} = 0, \quad (\nu = 1, \dots, \infty). \quad (i = 1, 2, 3)$$

Подставив (15), (19) в условия (16) - (18), как это сделано в работе / 6 /, удается прийти к бесконечной системе линейных алгебраических уравнений относительно $c_{\nu}^{(1)(i)}$, $c_{\nu}^{(2)(i)}$ ($\nu = 1, \dots, \infty$).

После решения системы (укороченной до 60 уравнений) и нахождения корней $c_{\nu}^{(j)(i)}$ ($j = 1, 2$; $\nu = 1, \dots, 30$) на основе полученных соотношений определяются коэффициенты $c_{\nu}^{(l)(i)}$ ($j = 1, \dots, 4$; $i = 2, 3$) и по формулам Колосова - Мусхелишвили / 6 / - напряжения в областях S_i ($i = 1, 2, 3$).

Полученное решение запрограммировано для ЕС ЭВМ. Ниже приводится пример расчета набрызгбетонной крепи выработки сводчатого поперечного сечения высотой 2,82 м и шириной 3,0 м при следующих исходных данных $E_1 = 9700$ МПа, $\nu_1 = \nu_2 = 0,25$,

$E_3 = 29000$ МПа, $\nu_3 = 0,15$, $\lambda = 0,33$, $\Delta_2 = 0,07$ м; параметры анкеров: $l_a = \Delta_1 = 1,5$ м, $P_a = 100$ кН, $n_s = 1$. В соответствии с рис. 1, $\beta = 1,85$ и, следовательно, $E_2 = 17\,945$ МПа. При расчетах рассматривались неровности поверхности выработки с параметрами $n_r = 6$, $\delta = 0,1$ м.

На рис. 4 сплошными линиями показаны расчетные эпюры (в развертке нормальных тангенциальных напряжений $\sigma_{\theta}/\gamma H \text{ м}^2$ на внутреннем контуре поперечного сечения крепи при наличии впадины (кривая 1) и выступа (кривая 2) в верхней точке свода; пунктирной линией - те же напряжения при отсутствии неровностей поверхности выработки.

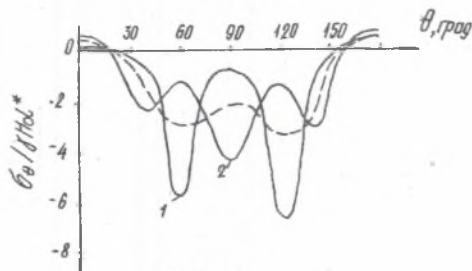


Рис. 4

Описанная методика может применяться при расчете набрызгбетонной крепи подземных сооружений с учетом слоя омоноличенных пород, образующегося вследствие проникания набрызгбетона в

трещины, и монолитной крепи выработок, сооружаемых с применением упрочнения окружающих пород с помощью тампонажа скрепляющими растворами, а программа для ЭВМ позволяет производить эффективные многовариантные расчеты с учетом геометрических размеров крепи и упрочненной зоны.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Тимофеев О.Э., Трушко В.А. Эффективность упрочнения штангами модели монолитной структуры на до- и запредельной стадии деформирования // Взаимодействие крепи и пород в сложных условиях.-Л.:ЛГИ, 1984. - С.101-107.
- [2] Методические рекомендации по расчету временной крепи тоннельных выработок.- М.:ВНИИТС, 1984. - 54 с.
- [3] Руководство по проектированию подземных горных выработок и расчету крепи / ВНИИ, ВНИИОМПС Минуглепрома СССР, - М.:Стройиздат, 1983. - 272 с.
- [4] Бульчев Н.С., Фотиева Н.Н., Стрельцов Е.В. Проектирование и расчет крепи капитальных выработок. - М.:Недра, 1986. - 288 с.
- [5] Фотиева Н.Н., Саммаль А.С. Расчет набрызгбетонной крепи подземных сооружений с учетом слоя омоноличенной бетоном породы //Физико-техн. пробл. разраб. полезных ископаемых.- 1987, № 2. - С. 87-90.

- [6] Мухелишвили Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. - М.:Наука, 1966. - 708 с.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Mirosław Chudek

OBLICZANIE OBUDOWY Z BETONU NATRYSKIWANEGO WYROBISK GÓRNICZYCH W POŁĄCZENIU Z KOTWIAMI

S t r e s z c z e n i e

Proponowana jest metoda obliczania lżejszej obudowy z betonu natryskiwanego w połączeniu z kotwiami, dla wyrobisk górniczych o dowolnym przekroju poprzecznym. Zastosowanie tej metody w czasie projektowania pozwoli na pełniejsze uwzględnienie podstawowych właściwości statycznej pracy tej konstrukcji. Metoda oparta jest na badaniach oddziaływania obudowy, warstwy skał wzmocnionych kotwiami i calizny jako elementów wspólnego odkształcanego systemu, co pozwala w pełni wykorzystać nośność górotworu. Przy obliczeniach uwzględniono wpływ nierówności powierzchni wyrobiska na stan naprężenia obudowy. Istotę opracowanej metody stanowi analityczne rozwiązanie płaskiego kontaktowego, zadania (lub zagadnienia Herza) dla dwuwarstwowego pierścienia o dowolnym kształcie, z nierównościami, aproksymowanymi przez krzywą hipotroidalną, w wąskim liniowo-odkształcanym środowisku; przy czym warstwa skał, umocnionych kotwiami modelowana jest jako jednolita, przy zastosowaniu współczynnika odkształcenia, którego wielkość określana jest na podstawie danych doświadczalnych.

Opierając się na przedstawionej metodzie opracowano program komputerowy na EMC jednolitego systemu. Załączono przykłady obliczeń.

THE CALCULATION OF SHOTCRETE LINING OF HEADINGS IN CONNECTION WITH ROCKBOLTS

S u m m a r y

The authors propose a method of calculating lighter linings made of shotcrete in connection with rockbolts, for leadings of any shape of their cross-section. The application of this method will make it possible to take into consideration the fundamental properties of the static behaviour of such a construction. The method is based on investigations concerning the interaction of the lining, the layer of rock reinforced by bolts and the undisturbed rock-mass, all of them being elements of the same strained system. Thus it becomes possible to make full use of the

bearing capacity of the rock mass. In these calculations the effect of irregularities in the surface of the heading upon the stresses in the lining has been taken into account.

The essence of the method is the analytical solution of a plane contact problem (or Herz's problem) for a double-layer ring of any shape with irregularities approximated by a hypotroidal curve in a weighty linearly deformed environment. The stratum of rock reinforced by bolts has been modelled as being quite uniform, applying a coefficient of deformation the value of which had been determined experimentally.

Based on this method, a computer program for a uniform EMC system has been set up. Examples of calculations have been presented, too.