

Семенюк Вячеслав Денисович, д-р техн. наук, доц, заведующий кафедрой «Строительные конструкции, здания и сооружения»

Белорусско-Российского университета, г. Могилев, Беларусь,

Босаков Сергей Викторович, д-р техн. наук, проф., проф. кафедры «Строительная механика» Белорусского национального технического университета, г. Минск, Беларусь,

Астафьев Ярослав Вячеславович, канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры «Строительные конструкции, здания и сооружения» Белорусско-Российского университета, г. Могилев, Беларусь,
Баранов Николай Николаевич, канд. техн. наук, доц. кафедры «Геотехника и экология в строительстве» Белорусского национального технического университета, г. Минск, Беларусь

Расчет и конструирование устья ствола № 2 Краснослободского рудника РУП ПО «Беларуськалий»

Calculation and construction of shaft collar №2 of Krasnoslobodsky mine RUE "Belaruskaliy"

Предложены расчет и конструирование постоянного ствола № 2 Краснослободского рудника РУП «Беларуськалий». Авторами произведена проверка правильности подсчитанных заказчиком нагрузок на устье ствола № 2. На основе этих нагрузок с помощью ПК «Лира-9» выполнен расчет устья. По найденным величинам усилий и напряжений подобрана арматура и выполнено конструирование.

Calculation and designing of a constant trunk № 2 Krasnoslobodsky mines RUP "Беларуськалий" is offered. Authors make check of correctness of the loadings counted up by the customer on a mouth of a trunk № 2. On the basis of these loadings by means of the personal computer «Lyre-9» mouth calculation is executed. The armature is picked up for the found sizes of efforts and pressure and designing is executed.

1. ВВЕДЕНИЕ

Самый крупный на территории СНГ производитель и поставщик калийных минеральных удобрений и один из крупнейших в мире является Республиканское унитарное предприятие "Беларуськалий". Функционируя на базе Старобинского месторождения калийных солей "П.О. "Беларуськалий" включает в себя четыре рудоуправления, вспомогательные цеха и обслуживающие подразделения, в которых занято около 20 тысяч человек. Старобинское месторождение калийных солей является одним из крупнейших калийных месторождений мира (около 350 кв.км). Оно расположено в южной части Минской области Республики Беларусь. По своему строению месторождение представляет собой пологую (угол падения – 1–30°) пластовую залежь, состоящую из четырех калийных горизонтов – с первого по четвертый (сверху вниз). Расстояние между калийными горизонтами составляет от 50–60 метров (между первым и вторым) до 150–200 метров (между вторым и третьим, а также между третьим и четвертым). Разрабатываются пласты на II и III калийных горизонтах (Второй и Третий пласты). Калийный пласт I горизонта рудника 1 РУ разрабатывается с 2004 года. Калийный пласт IV горизонта рассматривается как перспективный для последующего освоения. Кроме того, за границами горного отвода действующих рудников разведаны значительные запасы калийных солей, которые в перспективе ПО "Беларуськалий" планирует к отработке (Краснослободский и Нежинский участки месторождения). Основной целью "Программы развития РУП "ПО "Беларуськалий" до 2012 года" является повышение экспортного потенциала РУП "ПО "Беларуськалий" за счет увеличения мощности по производству калийных удобрений до 9 млн тонн в год и выпуска конкурентоспособной по качеству и ассортименту продукции. Для достижения этой цели «Беларуськалий» решает следующие задачи:

- строительство Краснослободского и Березовского рудников, для поддержания и расширения рудной базы РУП "ПО "Беларуськалий", в связи со снижением сырьевых запасов на Первом и Втором рудоуправлениях;
- модернизация и реконструкция рудников, обогатительных фабрик и вспомогательных цехов, с заменой физически и морально устаревшего оборудования;

– разработка и внедрение отечественного оборудования взамен импортного согласно "Программе создания импортозамещающей техники, оборудования и материалов для РУП "ПО "Беларуськалий" на предприятиях Республики Беларусь в 2004–2009 гг.";

– снижение техногенного воздействия на окружающую среду в Солигорском промышленном районе.

Устье ствола № 2 Краснослободского рудника следует отнести к уникальным объектам, что потребовало привлечения коллектива исполнителей из БНТУ и БРУ для выполнения расчетов и конструирования. Исполнители выполнили работу в три этапа, используя проектную документацию заказчика в лице РУП П.О. «Беларуськалий».

Этап 1.

Проверка правильности определения заказчиком нагрузок на устье ствола от копра и грунта.

Этап 2.

Расчет МКЭ по ПК «ЛИРА -9» устья ствола на основании данных этапа 1.

Этап 3.

Подбор арматуры и конструирование ж/б устья ствола на основании данных этапа 2.

2. ОЦЕНКА ПРАВИЛЬНОСТИ ПОДСЧЕТА НАГРУЗОК ОТ ГРУНТА НА ПОСТОЯННОЕ УСТЬЕ СТВОЛА

Строение грунтовой толщи, характеристики грунтов и положение уровня грунтовых вод приняты по данным заказчика. Вертикальные нагрузки на уровне подошвы фундаментов подсчитаны с учетом их собственного веса и значения коэффициента надежности $\gamma_f = 1,1$. Были построены эпюры бокового давления:

– от строительно-монтажной пригрузки $q = 10$ кПа;

– от собственного веса грунта при значении коэффициента надежности $\gamma_f = 1,1$;

– гидростатическая от грунтовой воды при отметке $WL = 12,78$ м;

– от вертикальных нагрузок фундаментов.

Эпюра бокового давления от строительно-монтажной пригрузки с ординатой 2,8 кПа начинается с отметки – 17,8, кровли пласта песчаного грунта. Песчаный грунт обратной засыпки обладает сцепле-

нием $C = 2,55$ кПа, а пласт суглинка – $C = 27,9$ кПа; при этих параметрах давление связности превышает боковое.

Эпюра бокового давления от собственного веса и гидростатическая имеют треугольное очертание с максимальными ординатами соответственно $\sigma_{xy} = 125,9$ кПа и $\sigma_L = 124,6$ кПа.

Расчет горизонтального давления от вертикальных нагрузок фундаментов выполнен отдельно для вплотную примыкающих к стенке фундаментов и близлежащих на расстоянии до 12,7 м.

Эпюры давлений от фундаментов рассчитаны по методу угловых точек для вертикалей по краям фундаментов и вертикалей по краям и середине ствола.

Расчеты и значения величин давлений на ствол от отдельных фундаментов рассчитаны по формуле Буссинеска в зависимости от расстояния, глубины заложения подошвы и положения рассматриваемой точки.

Общая схема нагружения постоянного устья ствола от грунта, фундаментов и воды представлена на рис. 1.

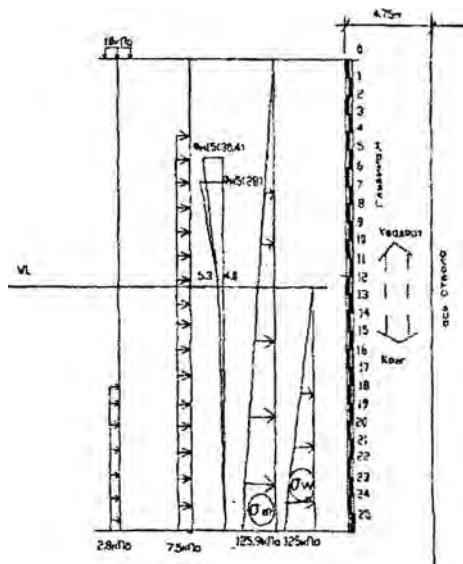


Рис. 1. Общая схема нагружения постоянного устья ствола от грунта, фундаментов и воды

В результате проведенного анализа были получены следующие выводы:

Значения величин горизонтального давления на ствол имеют некоторые отличия от представленных заказчиком.

1. Постоянная нагрузка (вес грунта, вес железобетона фундаментов) исполнителями принималась с коэффициентом надежности по нагрузке $\gamma_f = 1,1$.

2. Рассчитана эпюра бокового давления от строительно-монтажной пригрузки, и, хотя она сказывается в нижней части ствола, ее ордината ориентировочно составляет около 1 % от суммы грунтовой с гидростатической.

3. На графическом листе № 2, представленным заказчиком не приводятся контактные (с очертанием близким к треугольному) полосовые эпюры от фундаментов $\Phi_m 15$ и $\Phi_m 35$.

4. Некоторые превышения в значениях максимальных ординат эпюр – грунтовой ($125,9 - 118,7 = 7,2$ кПа) и гидростатической ($147,0 - 125,0 = 22$ кПа) могут быть связаны с учетом коэффициента $\gamma_f = 1,1$ и изменившимся положением уровня грунтовых вод.

5. Полученная ордината бокового давления от фундаментов $\sigma_{ху,ф} = 7,5$ кПа превышает на 1 кПа графическом листе № 2, представленным заказчиком, что можно связать с инженерной, точностью расчетов.

3. РАСЧЕТ МКЭ ПОСТОЯННОГО УСТЬЯ СТВОЛА

3.1. Обоснование выбора расчетной схемы устья при его расчете МКЭ на ПК «ЛИРА-9,2»

Соотношение размеров отверстий, толщин и диаметров с остальными линейными размерами устья не позволили исполнителям использовать конечные элементы оболочек. При построении конечно-элементной модели пришлось использовать трехмерные конечные элементы типов:

- пространственный 8-узловой изопараметрический (КЭ - 36);
- пространственный 6-узловой изопараметрический (КЭ - 34);
- пространственный 8-узловой типа параллелепипед (КЭ - 31);
- пространственный 6-узловой типа прямоугольная призма (КЭ-33).

Каждый из перечисленных конечных элементов имеет три степени свободы в узле.

Тип жесткости для всех конечных элементов принимался, соответствующим бетону С^{30/37} (В37); $E_b = 3510000 \text{ т/м}^2$; $\nu_b = 0,167$; $\gamma_0 = 2,500 \text{ т/м}^3$.

Нагрузки на поверхность постоянного устья брались в соответствии с данными, приведенными выше. Причем нагрузки от копра принимались непосредственно приложенными к устью без учета разгрузочной способности распределительных балок, что шло в запас прочности.

Граничные условия по перемещениям брались на отметке - 22,0 м, где принималось: $U = V = W = 0$.

Исполнителями рассматривались три загрузки:

Загрузка 1 – собственный вес бетона устья + нагрузки от грунта + загрузка 3 от копра.

Загрузка 2 – собственный вес бетона устья + нагрузки от грунта + загрузка 2 от копра.

Загрузка 3 – собственный вес бетона устья + нагрузки от грунта + загрузка 1 от копра.

3.2. Результаты расчетов

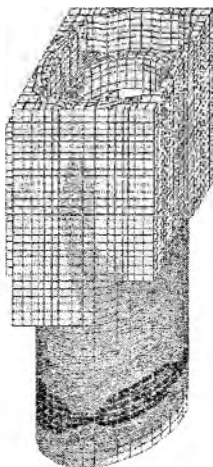


Рис. 2. Результат расчета устья ствола в виде изополей напряжений (загрузка 1)

При каждом нагружении анализировались величины перемещений устья на отметке +0.0 и значения главных растягивающих напряжений σ_1 и главных напряжений σ_3 (как правило, сжимающих напряжений). Результаты численных расчетов выполнены в форме изолиний. Расчеты на ПЭВМ показали, что:

1. Максимальные горизонтальные перемещения точек устья на отметке +0.0 для всех нагружений не превышают допусковых нормами.

2. Максимальные по абсолютной величине главные сжимающие напряжения для всех случаев нагружения $4,57 \text{ МПа} < 20,0 \text{ МПа}$. Следовательно для восприятия главных растягивающих напряжений необходимо в плоскости их действия установить стальную арматуру.

3. Максимальные главные растягивающие напряжения – $1,86 \text{ МПа} > 1,33 \text{ МПа}$.

4. ПОДБОР АРМАТУРЫ И КОНСТРУИРОВАНИЕ

4.1. Общая часть

В разделе даны рабочие чертежи железобетонных конструкций устья ствола № 2 для объекта «2 РУ. Ввод мощности по руде взамен выбывающей за счет строительства Краснослободского рудника РУППО «Беларуськалий», разработанные Белорусским национальным техническим университетом и Белорусско-Российским университетом.

Используя исходные данные, представленные «Заказчиком», а также уточненные нагрузки от грунта и от копра на постоянное устье ствола, взяв за основу расчет постоянного устья ствола методом конечных элементов, был произведен подбор арматуры в характерных сечениях ствола и ее сравнение с требованиями по конструированию.

Расчет выполнен в соответствии СНБ 5.03.01-02 «Бетонные и железобетонные конструкции»; конструктивные требования – в соответствии п. 11 СНБ 5.03.01-02. Изготовление устья ствола производится из бетона класса $C^{30}/_{37}$. Продольное, спиральное и косвенное армирование выполняется из стержней класса S500 (ТУ РБ 190266671.001;

ТУ РБ 04778771.001; ТУ РБ 400074854.025), поперечное армирование (хомуты) – из стержней класса S240 (ГОСТ 5781).

4.2. Расчет на местное сжатие (смятие)

Передача нагрузки от веса копра на устье ствола осуществляется через опорные плиты стальных составных балок Б1 в четырех точках (22; 23; 24; 25). Нагрузка от воздействия копра (максимальная) при третьем сочетании в точке 25 составляет 248,75 тс.

Прочность бетонного элемента, подвергнутого действию местной сжимающей нагрузки, проверяем из условия

$$N_{sd} \leq \alpha_u \cdot f_{ctd} \cdot A_{co}, \quad (1)$$

где N_{sd} – равнодействующая расчетных усилий, действующих на площадь смятия A_{co} .

$$N_{sd} = 248,75 \text{ тс} = 2487,5 \text{ кН.}$$

Площадь смятия соответствует площади опорной плиты. Площадь опорной плиты (по данным «Заказчика») под стальные балки Б1 составного сечения составляет

$$\begin{aligned} A_{co} &= 55 \text{ см} \cdot \frac{70 \text{ см} + 80 \text{ см}}{2} - 2 \cdot 14 \text{ см} + 5 \text{ см} \cdot 80 \text{ см} - 24 \text{ см} \cdot 8 \text{ см} = \\ &= 7677 \approx 0,768 \text{ м}^2; \end{aligned}$$

$$\alpha_u = \frac{1}{4} \left(3 + \frac{\sigma_{u,\min}}{\sigma_{u,\max}} \right) \geq \frac{3}{4}, \quad (2)$$

Где $\sigma_{u,\min}$, $\sigma_{u,\max}$ – соответственно минимальные и максимальные напряжения сжатия. По данным проведенных расчетов

$$\sigma_{u,\min} = 2,8 \text{ МПа}; \quad \sigma_{u,\max} = 14,0 \text{ МПа};$$

тогда $\alpha_u = \frac{1}{4} \left(3 + \frac{2,8}{14,0} \right) = 0,80 > 0,75$, условие (2) соблюдается.

$$f_{cud} = \omega_u \cdot \alpha \cdot f_{cd} \quad (3)$$

расчетное сопротивление бетона смятию, определяемое при расчетных сопротивлениях бетона сжатию f_{cd} и растяжению f_{ctd} при коэффициенте безопасности по бетону $\gamma_c = 1,8$.

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{30}{1,8} = 16,67 \text{ МПа}; \quad f_{ctd} = \frac{f_{ctk}}{1,8} = \frac{2,0}{1,8} = 1,11 \text{ МПа}.$$

$$\omega_u = 1 + K_u \cdot K_f \cdot \frac{f_{ctd}}{f_{cd}} \left(\sqrt{\frac{A_{c1}}{A_{c0}}} - 1 \right) \leq \omega_{u,max}, \quad (4)$$

где K_u – коэффициент эффективности бокового обжатия при смятии

$$K_u = 0,8 \cdot \frac{f_{cd}}{f_{ctd}} = 0,8 \cdot \frac{16,67}{1,11} = 12;$$

$K_f = 0,8$ по табл. 7.6 СНБ 5.03.01-02;

$$\omega_u = 1 + 12 \cdot 0,8 \cdot \frac{1,11}{16,67} \cdot \left(\sqrt{\frac{3,07}{0,768}} - 1 \right) = 1,38;$$

по табл. 7.6 СНБ 5.03.01-02 принимаем $\omega_{u,max} = 1,0$.

$\alpha = 0,85$ по п. 6.1.5.4 СНБ 5.03.01-02.

$$f_{cud} = 1,0 \cdot 0,85 \cdot 16,67 = 14,17 \text{ МПа};$$

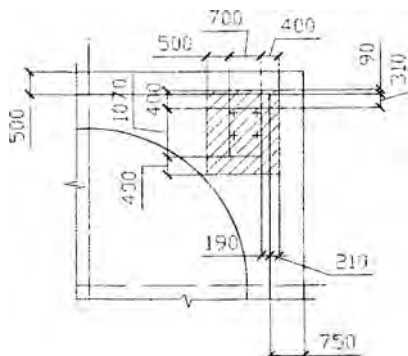
$$248,75 \text{ тс} < 0,8 \cdot 1417 \cdot 0,768 = 870,6 \text{ тс}.$$

Однако, учитывая активность солей на коррозионные свойства арматурных сталей, а также непредвиденные воздействия клетки на конструкцию устья ствола для безотказной работы конструкций по-

стоянного устья ствола при эксплуатации в течение длительного периода времени, принимаем косвенное армирование из четырех сеток из арматуры $\varnothing 16$ S500 ячейкой 200×200 мм, с шагом по высоте $S = 200$ мм.

Фрагмент расположения сеток косвенного армирования под опорой копра представлен на рис. 3, а. Конструкция сетки косвенного армирования представлена на рис. 3, б.

а)



б)

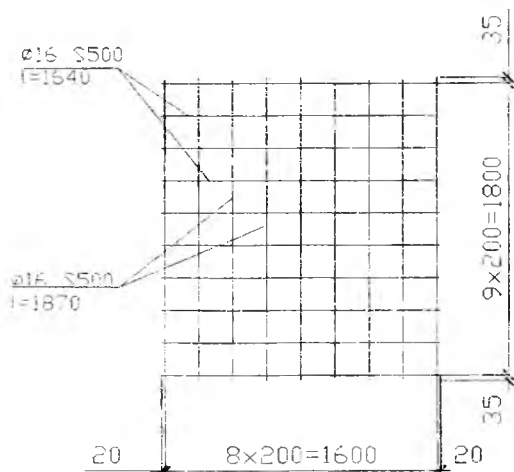


Рис. 3. Сетка косвенного армирования под опорой стальной балки (а); фрагмент расположения сеток косвенного армирования под опорой копра (б)

Крепление опорной части балки Б1 к устью ствола осуществляется при помощи анкерных болтов диаметром 48 мм.

Конструкция анкерного болта, сопрягающего устье ствола с опорной плитой балки Б1 представлена на рис. 4. Под анкерные болты Ø48 мм с резьбой М48 служат гайки шестигранные классов точности В по ГОСТ 5915-70*, А по ГОСТ 5927-70*, С по ГОСТ 15526-70*. Диаметр описанной окружности $D=83,4$ мм; размер под ключ $S=75$ мм; высота гайки $H=38$ мм; вес одной гайки 0,96 кг.

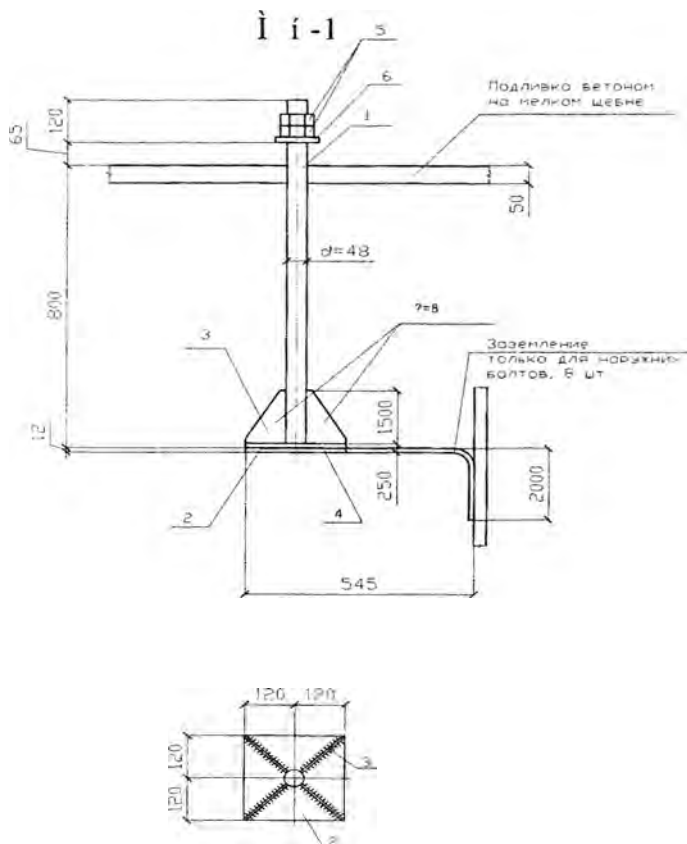


Рис. 4. Конструкция анкерного болта, сопрягающего устье ствола с опорной плитой балки Б1

Схема расположения анкерных болтов представлена на рис 5.

Под анкерные болты $\text{Ø}30$ мм с резьбой M30 служат гайки с диаметром описанной окружности $D = 50,9$ мм; размер под ключ $S = 46$ мм; высота гайки $H = 24$ мм; вес одной гайки $0,225$ кг. Конструкция анкерного болта $\text{Ø}30$ мм представлена на рис. 3, а.

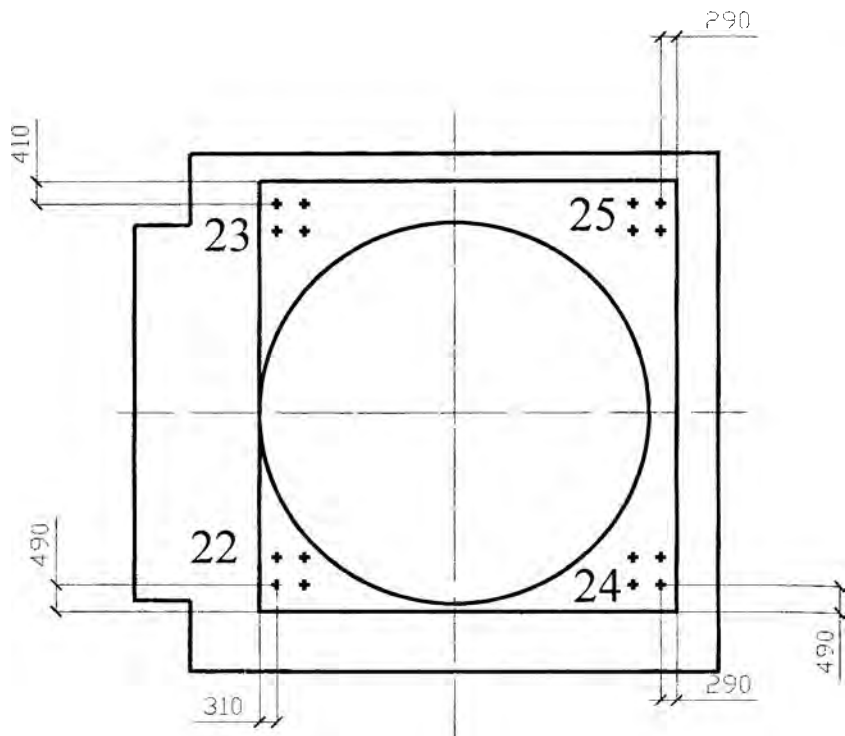


Рис. 5. Схема расположения анкерных болтов на отм. -2.480 м

4.4. Армирование устья ствола

а) спиральное армирование

Максимальные расчетные напряжения на отметке -14.5 м составляют 320 т/м^2 или 32 кг/см^2 . Площадь поперечного сечения спиральной арматуры составляет $7,11 \text{ см}^2$; по конструктивным требованиям согласно СНБ 5.03.01-02 площадь поперечного сечения арматуры S_1 и S_2 должна быть не менее $0,2\%$, т.е. не менее 20 см^2 . Спиральную арматуру ставим из конструктивных соображений $5\text{O}25 \text{ S}500$ с каждой стороны сечения (см. армирование).

б) продольная (вертикальная) арматура

принята также из конструктивных соображений – $\text{O}25 \text{ S}500$ с шагом 450 мм по внешнему периметру кольца и с шагом 360 мм по внутреннему периметру кольца. Схема армирования ствола спиральной арматурой и вертикальной представлена на рис. 8 и рис. 9.

Фрагмент стыка продольной арматуры представлен на рис. 7.

в) поперечная арматура (хомуты)

принята также из конструктивных соображений – $\text{O}16 \text{ S}500$ с шагом 400 мм, в месте стыковки продольных стержней шаг хомутов 200 мм.

Армирование характерных сечений представлено на рис. 10–12.

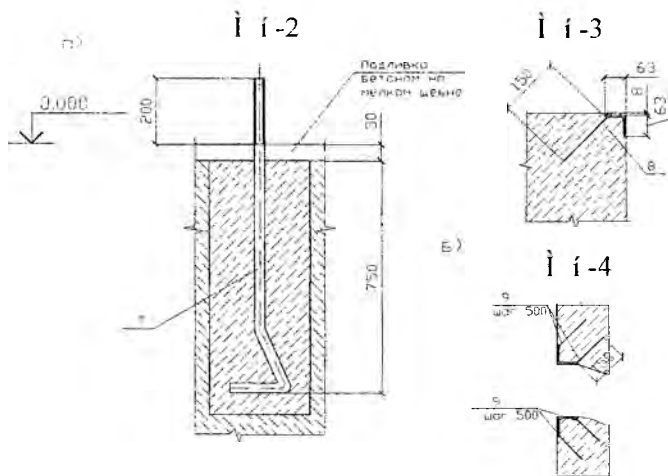


Рис. 6. Конструкция анкерного болта $\varnothing 30$ мм (а) и деталь обрамления проемов (б)

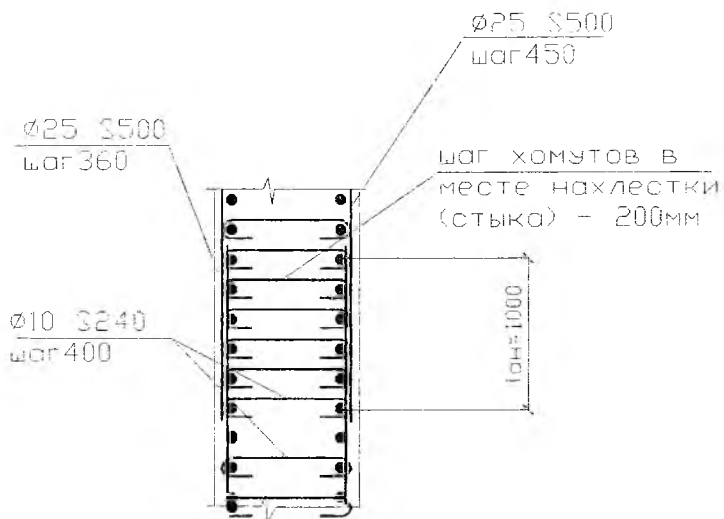


Рис. 7. Фрагмент стыка продольных стержней устья ствола

2-2 (1:100)

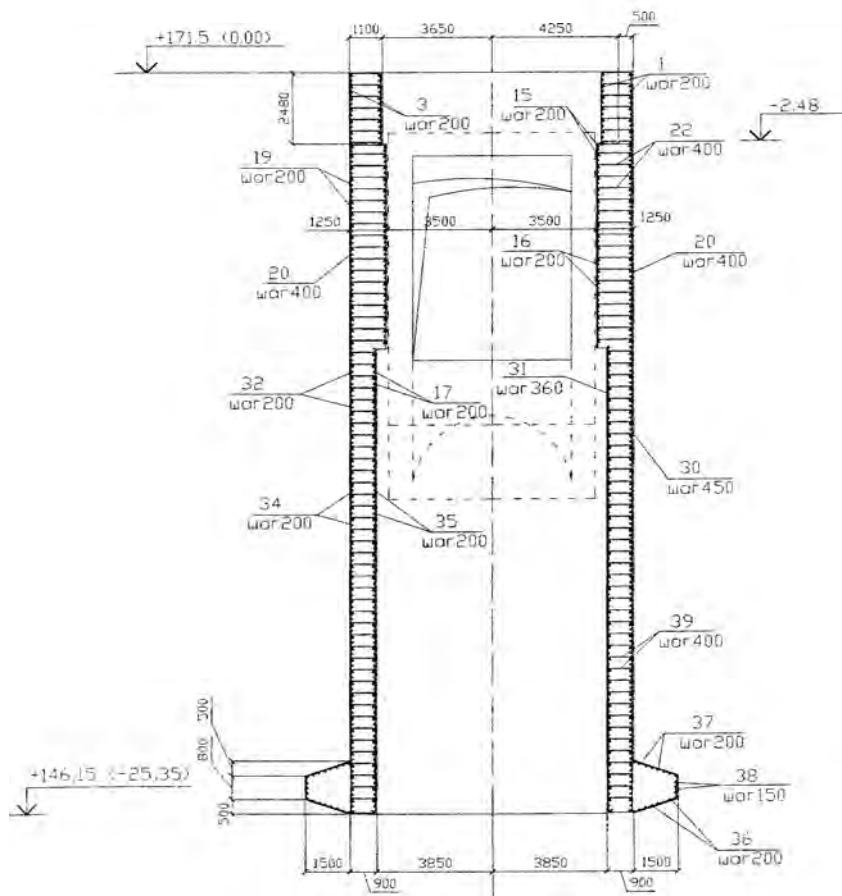


Рис. 8. Разрез – 2-2

1-1 (1:100)

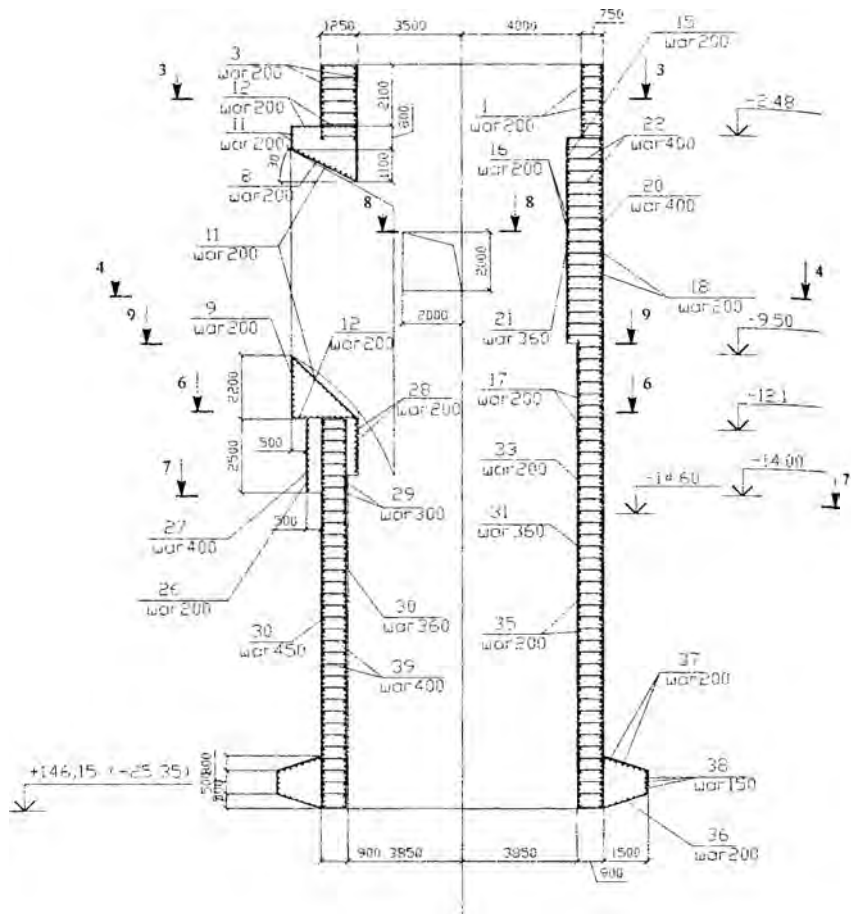


Рис. 9. Разрез – 1-1

7-7 (1:100)

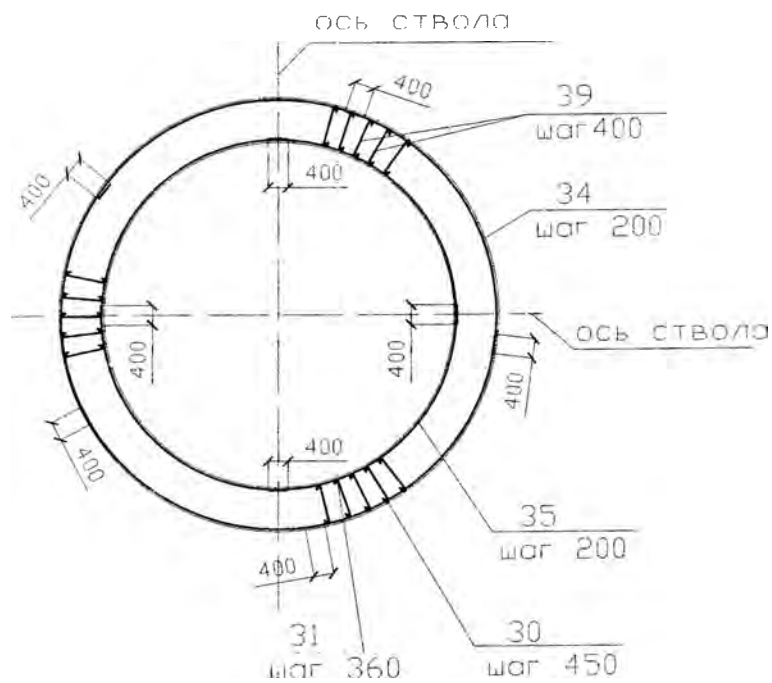


Рис. 10. Сечение – 7-7

9-9 (1:100)

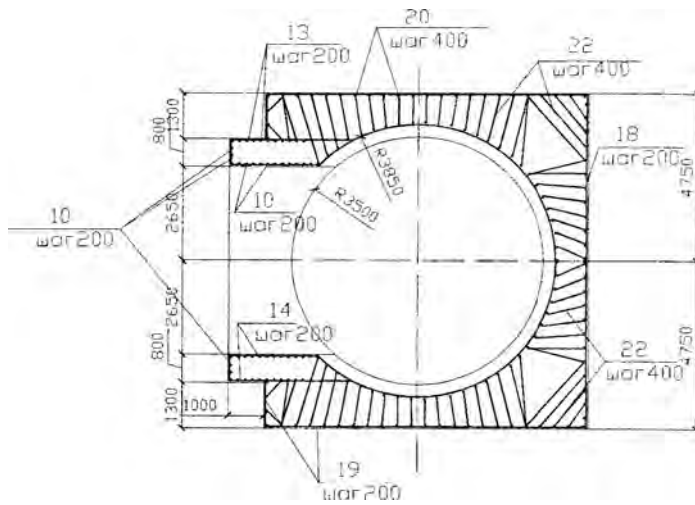


Рис. 11. Сечение – 9-9

5-5 (1:100)

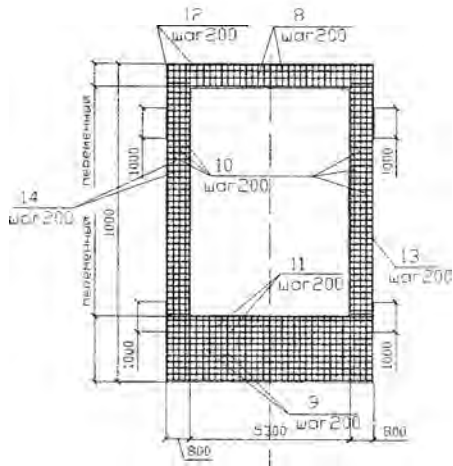


Рис. 12. Сечение – 5-5

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реализация развития РУП "ПО "Беларуськалий" на 2006– 2012 годы позволит разрешить основные вопросы развития рудной базы (в первую очередь за счет строительства нового рудника на Краснослободском участке нашего месторождения), а также обновить морально и физически устаревшее оборудование, обеспечить поддержание производственных мощностей и конкурентоспособность выпускаемой продукции как по качеству, так и по ценовому фактору. Исполнителями в лице сотрудников БНТУ и БРУ выполнены расчет и конструирование постоянного ствола № 2 Краснослободского рудника РУП «Беларуськалий». Авторами произведена проверка правильности подсчитанных заказчиком нагрузок на устье ствола № 2. На основе этих нагрузок с помощью ПК «Ли́ра-9» выполнен расчет устья. По найденным величинам усилий и напряжений подобрана арматура и выполнено конструирование.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цитович, Н.А. Механика грунтов / Н.А. Цитович. – М.: Высшая школа, 1983. – 288 с.
2. Руководство по расчету башенных копров угольных и рудных шахт. – М.: Стройиздат, 1975. – 109 с.
3. СНиП 2.09.03-85. Сооружения промышленных предприятий. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986. – 56 с.
4. СНиП 2.01.09-91. Здания и сооружения на подрабатываемых территориях и просадочных грунтах. – М.: Стройиздат, 1992. – 33 с.
5. СНиП 2.01.07-85. Нагрузки и воздействия / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1988. – 36 с.
6. СНБ 5.03.01-02. Бетонные и железобетонные конструкции. – Минск: Минстройархитектуры РБ, 2003. – 140 с.
7. Программный комплекс «Ли́ра-Windows». – Киев: Факб., 1997. – 137 с.
8. Александров, А.В. Основы теории упругости и пластичности / А.В. Александров. – М.: Высшая школа, 1990. – 398 с.