УДК 622.023

А.Г.ПРОТОСЕНЯ, *д-р техн. наук, профессор,(812)328-86-25, kaf-sgp@mail.ru*
Н.А.БЕЛЯКОВ, *канд. техн. наук, ассистент, nike-bel@yandex.ru*
А.Д.КУРАНОВ, *аспирант, kuranov555@mail.ru*
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург

A.G.PROTOSENYA, *Dr. in eng. sc., professor, (812)328-86-25, kaf-sgp@mail.ru*
N.A.BELYAKOV, *PhD in eng. sc., assistant lecturer, nike-bel@yandex.ru*
A.D.KURANOV, *post-graduate student, kuranov555@mail.ru*
National Mineral Resources University (Mining University), Saint Petersburg

МЕТОД ПРОГНОЗА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ КОМПЛЕКСА ТОННЕЛЬНЫХ ВЫРАБОТОК СЛОЖНОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ КОНФИГУРАЦИИ С УЧЕТОМ ВЗАИМНОГО ВЛИЯНИЯ И ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ СТРОИТЕЛЬСТВА

Исследовано пространственное распределение напряжений при взаимодействии различно расположенных выработок с учетом последовательности их строительства. Для решения задачи использован метод конечных элементов, получены коэффициенты концентрации и закономерности распределения напряжений в системе «обделка – массив». Выявлено взаимное влияние выработок комплекса при их поэтапном строительстве в соответствии с технологией.

Ключевые слова: тоннель, тоннельный узел, напряжение, смещение, коэффициент концентрации, обделка, камера, штольня, сбойка.

THE PREDICTION TECHNICS OF TUNNEL SETS WITH COMPLEX THREE DIMENSIONAL CONFIGURATION STRESS STATE WITH ALLOWANCE FOR RELATIVE INFLUENCE AND BUILDING SEQUENCE

The three dimensional stress distribution in tunnel set with allowance for relative influence and building sequence is investigated. To complete the task the finite elements analysis was used. The values of stress concentration factor and conformities of stress distribution in the «lining – mass» system are estimated. The relative influence of each tunnel in tunnel set with allowance for building sequence is identified.

Key words: tunnel, tunnel set, stress, displacement, concentration factor, permanent lining, chamber, drift, cross slit.

Наиболее трудными с точки зрения получения решения геомеханических задач прогноза напряженно-деформированного состояния являются задачи, в которых рассматриваются комплексы взаимовлияющих горных выработок различной пространственной конфигурации.

Такие комплексы тоннельных сооружений имеют место при строительстве станций метрополитенов, транспортных узлов, околоствольных дворов вертикальных стволов и других систем выработок.

Решение задачи прогноза напряженно-деформированного состояния обделок выра-

боток тоннельного узла, имеющего сложную пространственную конфигурацию, представляется тем более сложным, что необходимо учесть, помимо особенностей технологических схем строительства каждой из выработок комплекса, еще и влияние последовательности их проведения, а также взаимное влияние.

В данной работе приведена методика расчета напряженного состояния обделок комплекса тоннельных выработок, включающего автодорожный и железнодорожный тоннели, две штольни, две сервисно-технологические штольни, камеру большого сечения и две сбойки.

Общий вид конфигурации выработок транспортного узла и сетки конечных элементов разработанной модели обделок на конечном этапе расчета представлен на рис.1.

В разработанной конечно-элементной модели выделялись следующие основные расчетные этапы, учитывающие технологические этапы строительства:

1. Создание в нетронутом горными работами породном массиве под действием гравитационных сил поля естественных напряжений.

2. Проходка и крепление штольни № 3.

3. Проходка и крепление сервисно-технологической штольни № 1.

4. Проходка и крепление камеры.

5. Проходка и крепление железнодорожного и автодорожного тоннелей.

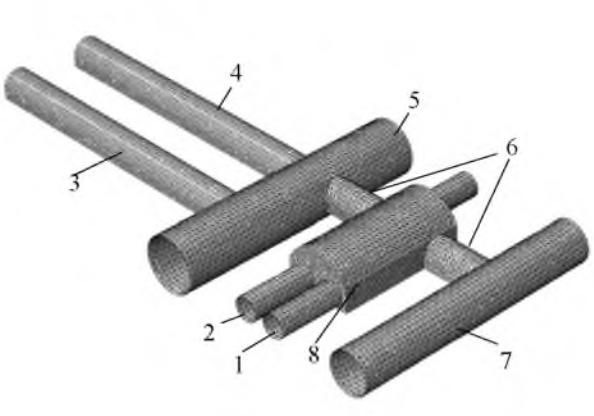


Рис.1. Общий вид конфигурации выработок транспортного узла и сетки конечных элементов разработанной модели обделок на конечном этапе расчета

1 – сервисно-технологическая штольня № 2; 2 – сервисно-технологическая штольня № 1; 3 – штольня № 3; 4 – штольня № 3БИС; 5 – автодорожный тоннель; 6 – забученные сбойки; 7 – железнодорожный тоннель; 8 – камера

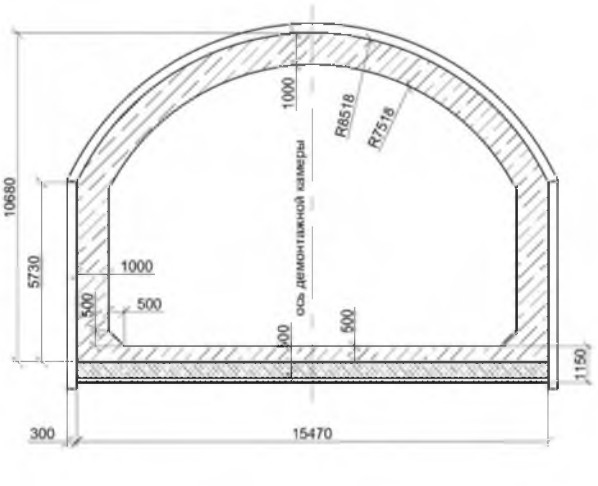


Рис. 2. Конфигурация сечения и основные размеры камеры

6. Проходка и крепление сбоек железнодорожного и автодорожного тоннелей с камерой.

7. Проходка и крепление сервисно-технологической штольни № 2.

8. Забутовка сбоек автодорожного и железнодорожного тоннелей с камерой.

9. Проходка и крепление штольни № 3БИС.

Следует отметить, что этап 8 моделировался при условии полного и равномерного заполнения материалом забутовки сбоек. В качестве забутовки принимался бетон класса В25, расчетный предел прочности которого на сжатие составляет 14,5 МПа, а на растяжение – 1,05 МПа.

При моделировании для выработок тоннельного комплекса использовались следующие толщины крепей и обделок:

- для камеры толщина постоянной обделки – 1000 мм. Конфигурация ее сечения представлена на рис.2;
- для штолен № 3, № 3БИС, сбоек и сервисно-технологических штолен – 225 мм. Размеры обделки сервисно-технологических штолен – $D_{вч}/D_{св}$ = 5650 мм/5200 мм. Размеры вчерне штолен № 3, № 3БИС и сбоек: высота 6000 мм, ширина 7000 мм, радиус свода – 3500 мм;
- для автодорожного тоннеля – 500 мм. Размеры обделки тоннеля – $D_{вч}/D_{св}$ = = 12290 мм/11830 мм;
- для железнодорожного тоннеля – 450 мм. Размеры обделки тоннеля – $D_{вч}/D_{св}$ = = 10300 мм/9400 мм.

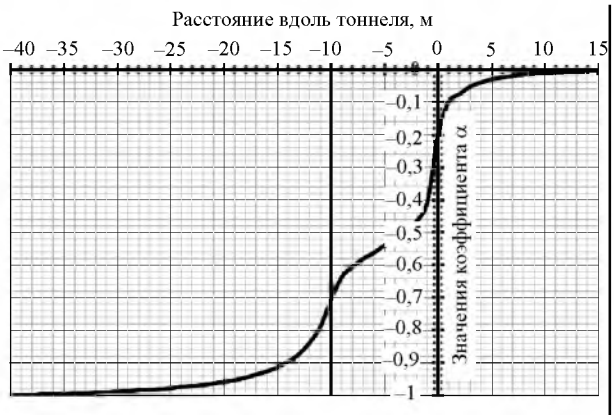


Рис.3. График зависимости значений коэффициента α от расстояния до лба забоя вдоль трассы сервисно-технологической штольни

Деформационно-прочностные характеристики пород, а также материалов обделок, применявшиеся при моделировании, приведены ниже:

Известняк	
Удельный вес, кН/м^3	25,7
Модуль общей деформации, МПа	7200
Коэффициент Пуассона	0,24
Бетон класса В25	
Удельный вес, кН/м^3	25
Модуль упругости, МПа	30000
Коэффициент Пуассона	0,2

Учет влияния технологии строительства всех выработок тоннельного комплекса на формирование напряженно-деформированного состояния их крепей и обделок выполнялся косвенно с помощью введения коэффициента α*. Для определения этого коэффициента был разработан ряд вспомогательных пространственных конечно-элементных моделей. На основании этих моделей производилась оценка сдерживающего влияния забоя на развитие смещений в незакрепленных выработках заданной конфигурации поперечного сечения. Пример обработки полученных результатов одной из таких вспомогательных моделей для сервисно-технологических штолен приведен на рис. 3.

Основываясь на представленной на рис.3 графической зависимости и считая, что обделка сервисно-технологических штолен вступает в работу непосредственно после схода с оболочки щита, а также учитывая значительное взаимное влияние близко расположенных штолен, можно заключить, что в данном случае значение коэффициента α составит 0,7. Значения коэффициента α для всех выработок тоннельного узла приведены ниже:

Автодорожный тоннель	0,8
Железнодорожный тоннель	0,8
Камера	0,55
Штольни № 3 и № 3БИС	0,61
Сервисно-технологическая штольня (одиночная)	0,8
Сервисно-технологическая штольня (в зоне взаимного влияния)	0,7

На рис.4 представлена пространственная конфигурация исследуемого тоннельного узла и расположение характеристических сечений, в которых производился анализ работы напряженного состояния тоннельных конструкций на различных этапах строительства.

Решение задачи выполнялось в рамках объемной постановки. Граничные условия задавались следующим образом: модели запрещались смещения по нижней грани – в направлении оси *Z*, по боковым граням – в направлении оси *X*, по торцевым граням – в направлении оси *Y*, верхняя грань модели оставлялась свободно деформируемой. Начальное поле распределения напряжений задавалось с учетом геостатического закона согласно гипотезе Динника с коэффициентом бокового давления, равным 0,32. Глубина заложения тоннельного комплекса составила 250 м от дневной поверхности.

Необходимо отметить, что строительство камеры данного тоннельного узла производится с применением уступного способа. При этом изначально раскрытие ее сечения выполняется на временном комбинированном креплении (двутавровые полигональные арки с бетонной затяжкой между рамами крепления). Изучение особенностей работы данного крепления требует разработки отдельной модели и в рамках данной статьи подробно рассматриваться не будет. Заметим лишь, что в разработанной конечно-элементной модели тоннельного узла моделируется постоянная обделка камеры, представленная монолитным железобетоном.

---

* *Булычев Н.С.* Механика подземных сооружений: Учеб. для вузов. М., 1994.

Bulichev N.S. Mechanics of underground constructions: Textbook. Moscow, 1994.

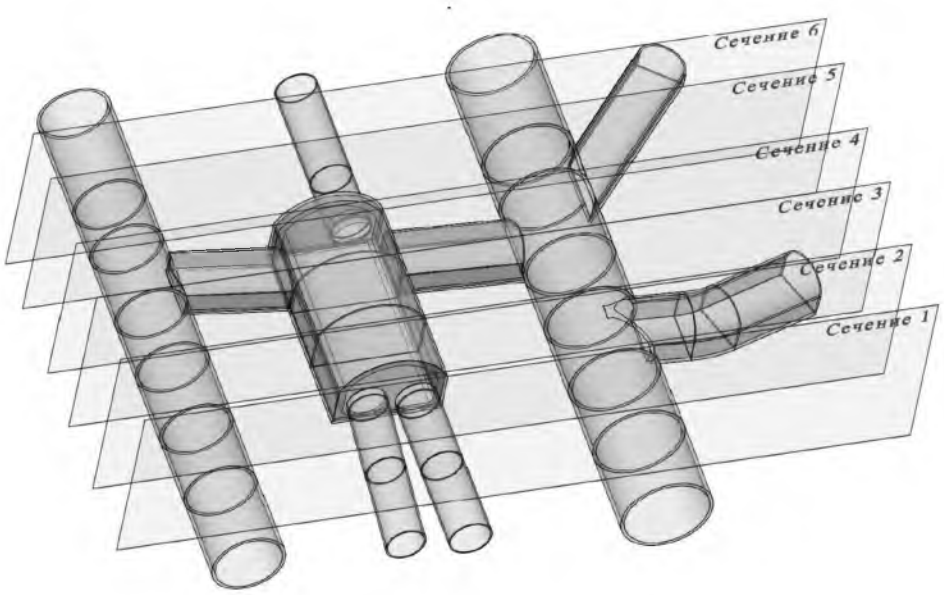


Рис.4. Пространственная конфигурация тоннельного узла и расположение характеристических сечений

Для анализа напряженно-деформированного состояния выработок тоннельного узла выполнено построение эпюр напряжений в шести сечениях на последнем этапе строительства (рис.4). Эти эпюры представлены на рис.5.

По полученным эпюрам напряжений можно заключить следующее:

- сопряжения количественно и качественно изменяют величины напряжений в обделках штолен;
- в месте сопряжения штолен и автодорожного тоннеля формируются концентраторы сжимающих напряжений, локализованные в боках штолен, причем напряжения на сопряжении штольни № 3 составляют 19-25 МПа, на сопряжении штольни № 3БИС 10-15 МПа;
- в лотках штолен формируются растягивающие напряжения, равные 3 МПа;
- в лотке штольни № 3 на сопряжении с автодорожным тоннелем растягивающие напряжения отсутствуют;
- вне сопряжения штолен и автодорожного тоннеля максимальные сжимающие напряжения локализуются в боках штолен, причем напряжения в обделке штольни № 3 составляют 10-11 МПа, на сопряжении штольни № 3БИС 9-10 МПа.

Из анализа напряжений на внутреннем контуре обделок выработок комплекса следует, что наибольшие напряжения формируются на внутреннем контуре обделки камеры. Выполним более подробный анализ напряжений в обделке камеры.

На втором этапе строительства комплекса осуществляется проведение автодорожного (1) и железнодорожного (2) тоннелей, построение эпюр сжимающих напряжений на внутреннем контуре обделки выполнено в четырех сечениях, расположенных с шагом 10 м (рис.6).

На рис.7 приведено наложение эпюр напряжений на внутреннем контуре обделки камеры по четырем рассматриваемым сечениям.

По полученным эпюрам можно установить следующее:

- проведение автодорожного и железнодорожного тоннелей качественно и количественно изменяет характер напряженного состояния обделки камеры;
- в центральной части камеры концентрация растягивающих напряжений смещается в сторону железнодорожного тоннеля;
- практически во всех точках обделки происходит увеличение напряжений в 2-4 раза;

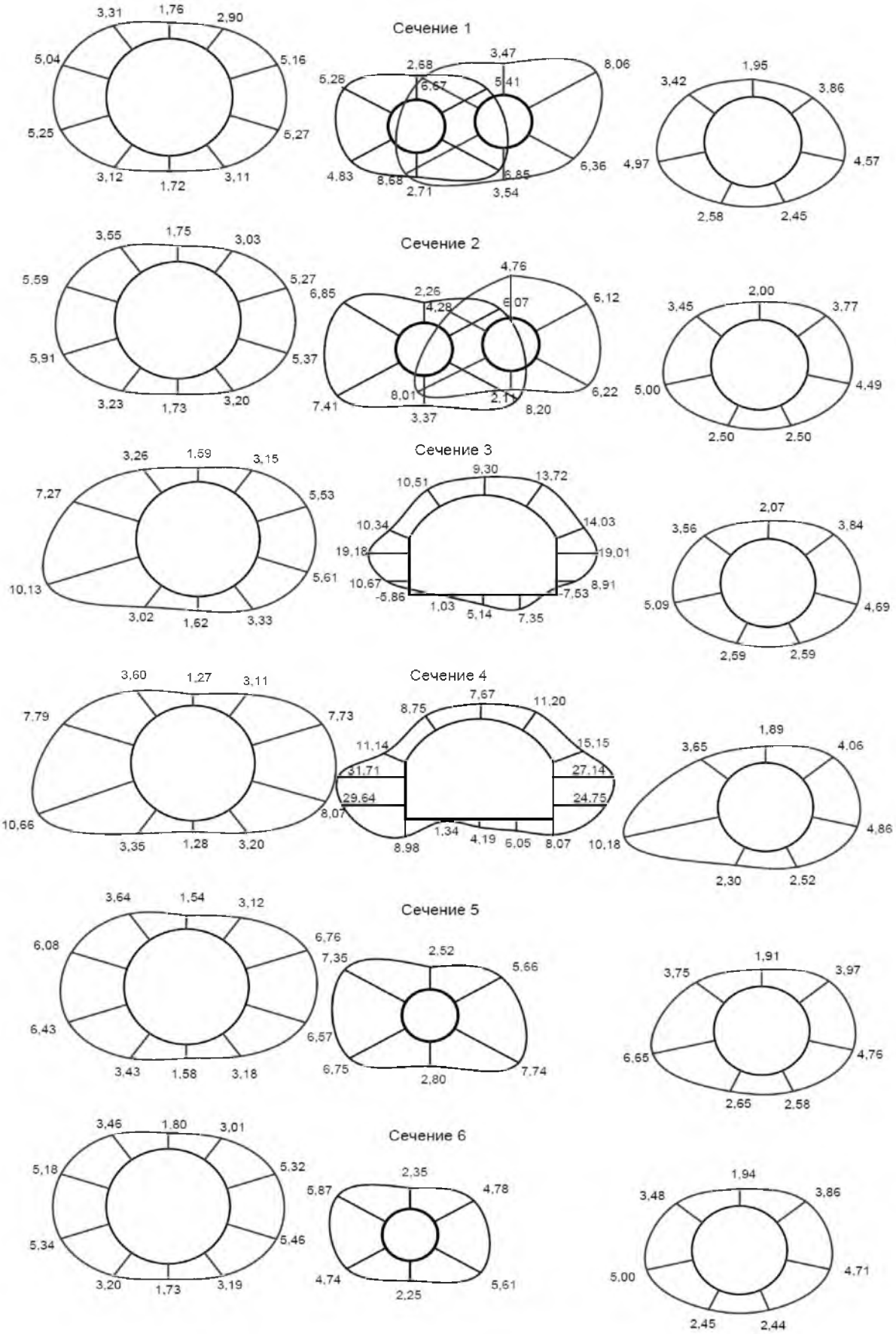


Рис.5. Эпюры распределения напряжений в характеристических сечениях обделок выработок тоннельного узла

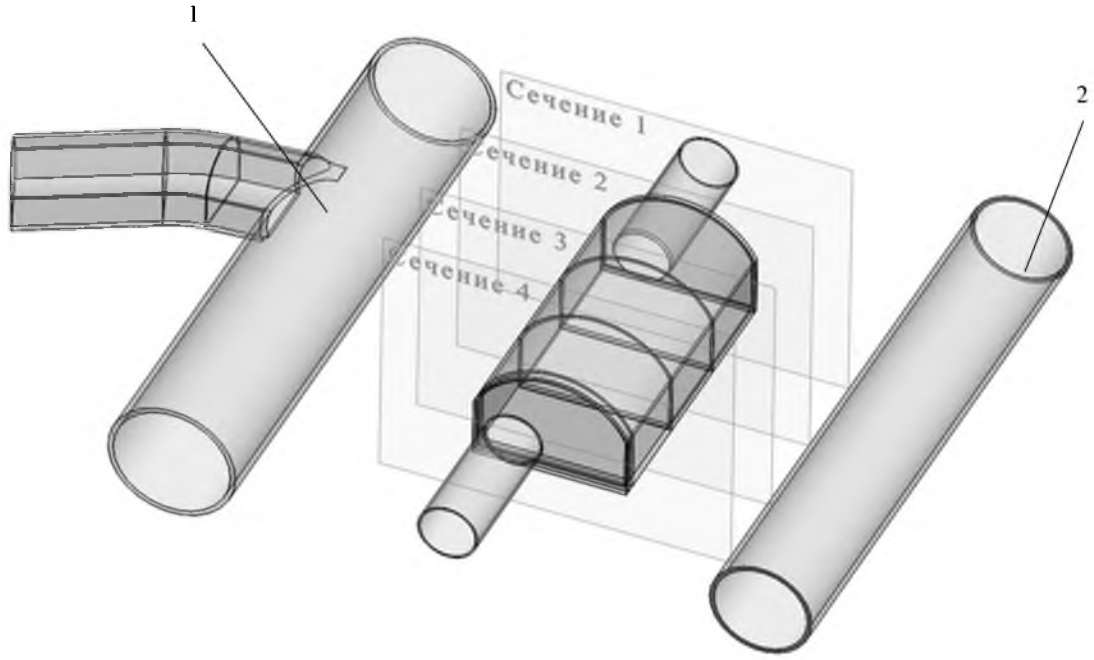


Рис.6. Расположение анализируемых сечений обделки камеры на втором этапе строительства комплекса

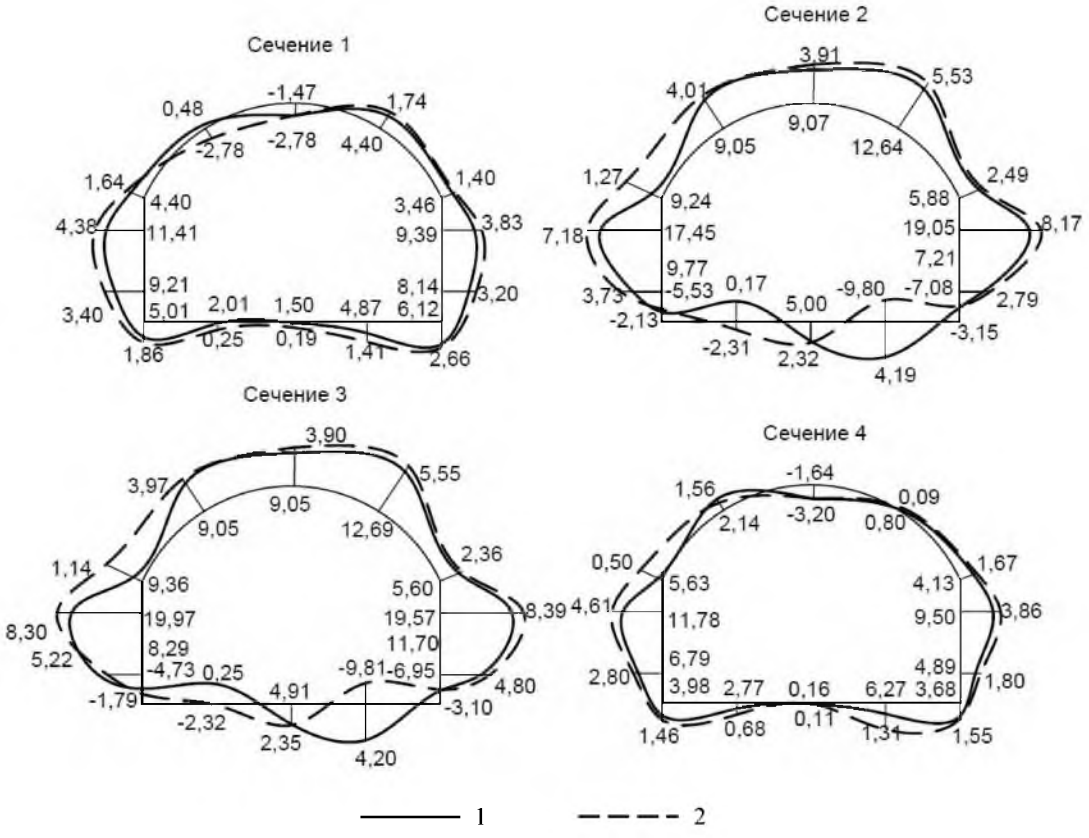


Рис. 7. Наложение эпюр напряжений на внутреннем контуре обделки камеры по сечениям, МПа

1 – на четвертом расчетном этапе; 2 – на пятом расчетном этапе

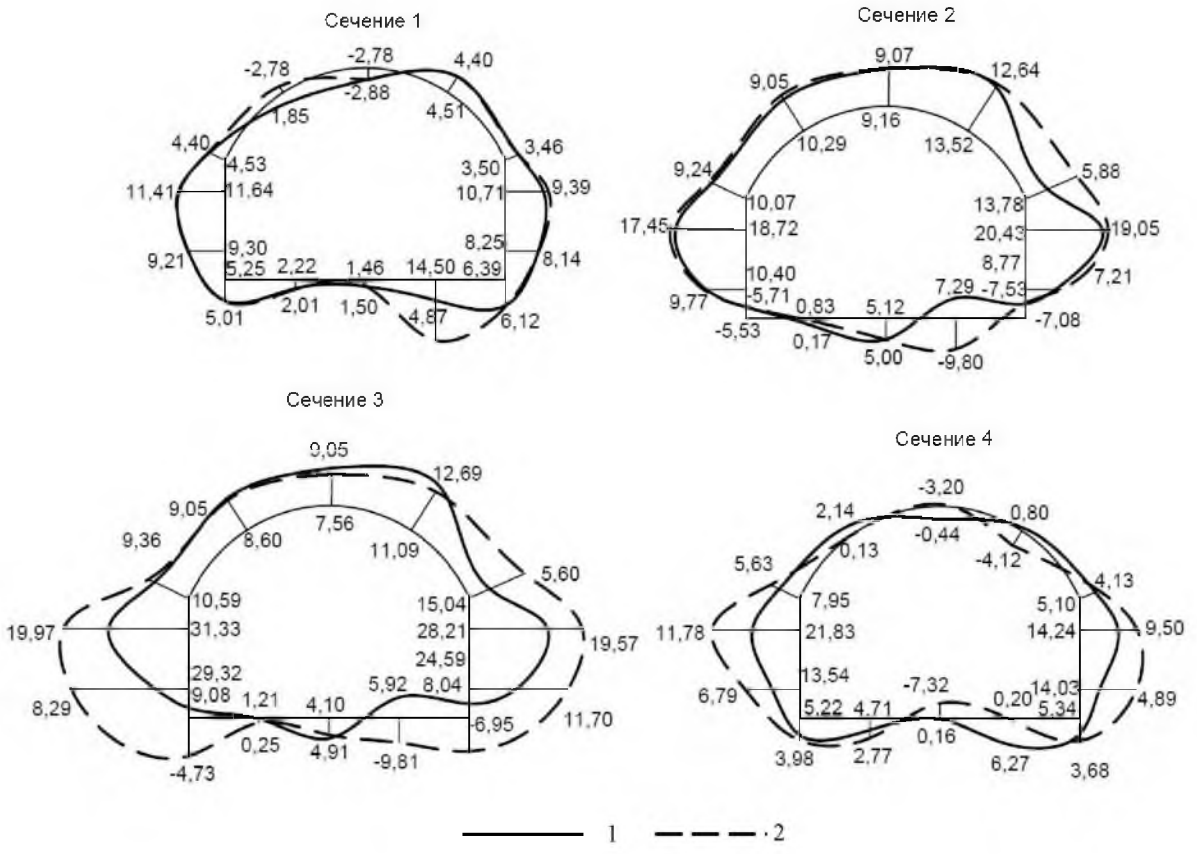


Рис.8. Наложение эпюр напряжений на внутреннем контуре обделки камеры по сечениям, МПа

1 – на пятом расчетном этапе; 2 – на шестом расчетном этапе

• максимальные сжимающие напряжения локализуются в боках и составляют 20 МПа в средней части камеры;

• максимальные растягивающие напряжения локализуются в правой части лотка в средней части камеры и составляют 10 МПа.

На третьем этапе строительства комплекса осуществляется сбойка камеры с автодорожным и железнодорожным тоннелями.

На рис.8 приведено наложение эпюр напряжений на внутреннем контуре обделки камеры по четырем рассматриваемым сечениям до и после проведения сбоек с автодорожным и железнодорожным тоннелями.

По полученным эпюрам можно установить следующее:

• проведение сбоек качественно и количественно изменяет характер напряженного состояния обделки демонтажной камеры;

• растягивающие напряжения локализуются только в приторцевых частях обделки камеры;

• в средней части камеры происходит перераспределение напряжений, в результате которого на внутреннем контуре обделки действуют только сжимающие напряжения;

• в месте сопряжения камеры и сбоек формируются концентраторы сжимающих напряжений, причем напряжения на сопряжении камеры со сбойкой с камеры с автодорожным тоннелем (23-31 МПа) превышают напряжения на сопряжении камеры со сбойкой с железнодорожным тоннелем (20-28 МПа).

В результате выполнения полного анализа полученного решения пространственной задачи были сделаны следующие выводы:

• основное влияние на концентрацию напряжений оказывают участки сопряжения выработок тоннельного комплекса;

• выполнение забутовки сбоек после реализации деформаций массива не приводит к значительному перераспределению напряжений в обделках выработок узла;

• зона влияния камеры в плане представляет собой эллипс и распространяется по оси камеры и перпендикулярно к ней примерно на 1/2 величины ее пролета;

• из-за значительного пролета камеры на напряженно-деформированное состояние как временной крепи, так и постоянной обделки камеры сильное сдерживающее влияние оказывают ее торцы;

• в постоянных обделках штолен № 3 и № 3БИС, выполненных из железобетона толщиной 225 мм, максимальные напряжения возникают в зоне влияния сопряжения с автодорожным тоннелем и составляют 20-24 МПа. На этих участках необходимо принять меры по упрочнению конструкции.

В среднем величины напряжений в обделках штолен № 3 и № 3БИС не превышают 12-14 МПа (при этом в обделке штольни № 3 в среднем напряжения несколько выше, чем в обделке штольни № 3БИС). Поэтому вне зоны влияния сопряжения их обделки следует признать адекватными действующим на них нагрузкам;

• в постоянной обделке автодорожного тоннеля, выполненной из сборного железобетона (бетон класса прочности В35) толщиной 500 мм, максимальные напряжения возникают в зоне влияния сопряжений с забученной сбойкой и штольней № 3БИС и составляют 10,5-11 МПа.

Подводя итог, следует заключить, что предложенная в статье методика прогноза напряженно-деформированного состояния обделок выработок, входящих в комплексы сложной пространственной конфигурации, и основные реализованные в ней подходы показали свою эффективность на рассмотренном примере. Можно рекомендовать данную методику в качестве способа решения задач геомеханики и геотехнологии с геометрией высокой степени сложности.