



# Расчет модели вертикальных подземных выработок



Шейн Аунг ТУН

Shein Aung TUN

**Разработана перспективная методика расчета модели для определения напряженно-деформированного состояния среза шахтного ствола на произвольной глубине. Создан программный комплекс «Шахта», который значительно ускоряет процесс проектирования подземных транспортных сооружений.**

*Ключевые слова:* подземный транспорт, шахтный ствол, грунт, железобетонные конструкции, напряженно-деформированное состояние, расчетная модель.

*Шейн Аунг Тун — аспирант кафедры «Системы автоматизированного проектирования транспортных конструкций и сооружений» Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ).*

**З**адача определения напряженно-деформированного состояния среза шахтного ствола на произвольной глубине довольно часто встречается при проектировании подземных транспортных сооружений. При всей нетривиальности подходов ее, однако, можно свести к решению плоской задачи теории упругости, сформулированной для области, находящейся в условиях плоской деформации [2].

Задачи этого класса решаются как численными [3], так и аналитическими методами [2]. Реализация аналитическими методами значительно затруднена вследствие того, что в расчётную схему среза необходимо помимо грунтового массива включить конструкцию бетонной обделки и тюбинга, а также учесть неоднородность грунта в плоскости среза шахтного ствола. Поэтому, взяв на себя именно этот вариант решения, расчётную модель мы строили на базе апробированного для данного класса задач метода конечных элементов (МКЭ) [3] с использованием программного комплекса «Катран», разработанного на кафедре «Системы автоматизированного проектирования транспортных конструкций и сооружений» МИИТ.

Расчётная модель системы «обделка ствола – грунтовая среда» создавалась следующим образом. Грунтовая среда находится в условиях объёмно-напряжённого состояния под действием сил гравитации (рис. 1).

Для построения расчётной схемы обделки в грунтовой среде примем во внимание три гипотезы [1].

**Гипотеза 1.** Обделка погружается в окружающую среду (рис. 2 а) и только после этого выбирается порода (рис. 2 б).

**Гипотеза 2.** Будем считать, что обделка состоит из колец единичной толщины (рис. 2 а).

**Гипотеза 3.** При обнажении пород в процессе выработки происходит некоторая деформация обнаженной поверхности. В расчётной модели эта деформация не учитывается. Будем считать, что крепь вставляется при обнажении пород мгновенно.

С учётом приведенных гипотез за расчётную схему можно принять плоский слой единичной толщины, и задача сводится таким образом к решению плоской задачи теории упругости как сумма двух решений.

**Решение 1.** Напряжённое состояние, отвечающее рис. 2 а (бытовое давление, значение напряжений приведены на рис. 1).

**Решение 2.** Расчёт пластины единичной толщины с учётом жесткости обделки, используя соотношения плоской задачи теории упругости [2] на нагрузку  $q$ , приложенную по контуру отверстия, подкреплённо-го обделкой.

В данном случае нагрузка самоуравновешенная и вызывает напряжения, быстро убывающие по мере удаления от зоны выработки (принцип Сен-Венана [2]). С учё-

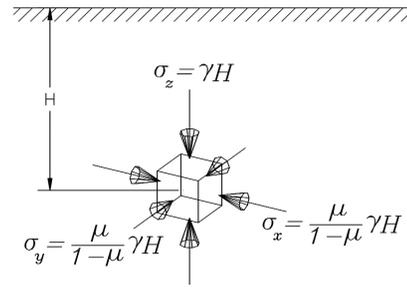


Рис. 1.

том этого внешний диаметр пластины В (рис. 3) можно взять конечного размера (7–8 диаметров выработки).

Численное моделирование расчётной схемы выполнялось следующим образом. Схема среза вертикальной транспортной магистрали или шахтного ствола представляет собой плоскую систему, состоящую из пластин и стержней (рис. 4). Пластинами моделировался грунт и бетонная обделка, стержнями – тьюбинг (рис. 5). Условиями предусмотрено наличие в плоскости среза двух грунтов с разными физико-механическими характеристиками, в этом случае граница раздела грунтов совпадает с вертикальной осью симметрии расчётной схемы.

Положение каждого узла характеризуется шестью степенями свободы. При сборке расчётной схемы использовались два типа конечных элементов: пространственный стержень (рис. 6) и прямоугольная пластинка (рис. 7). Для решения задачи вполне достаточно трёх степеней свободы в узле, но с целью упрощения интегрирования проблемно ориентированного модуля в расчётное ядро системы «Катран» были включены пространственные конечные элементы. На базе описан-

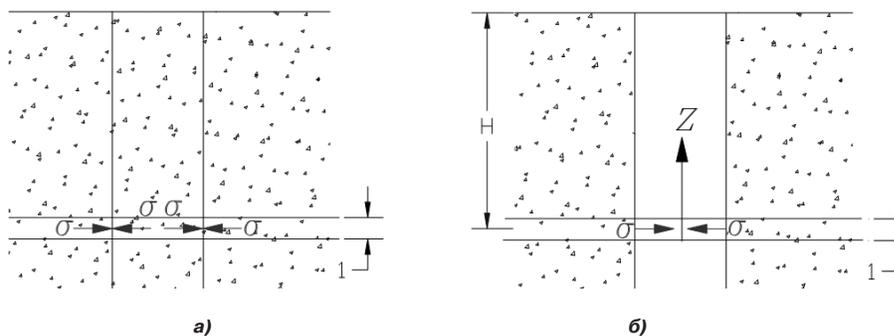


Рис. 2.



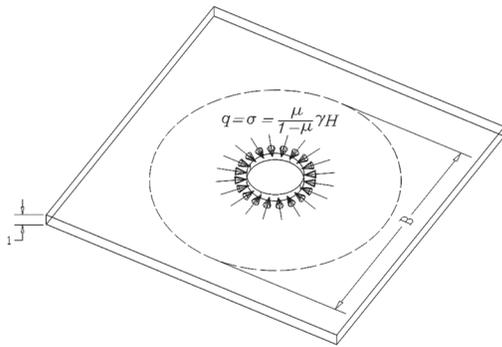


Рис. 3.

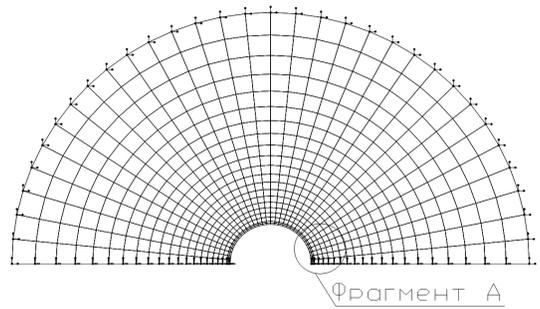


Рис. 4.

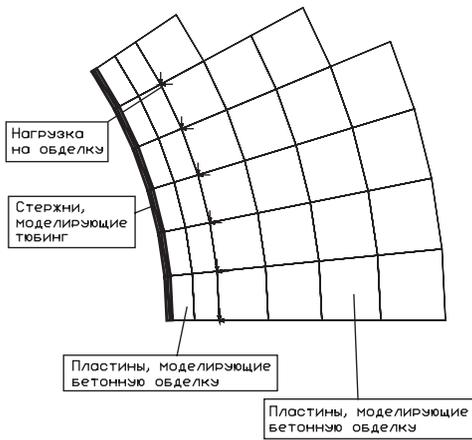


Рис. 5.

ной модели разработан проблемно ориентированный программный комплекс «Шахта», предназначенный для определения напряженно-деформированного состояния шахтных стволов.

Блок нагрузок на шахтный ствол учитывает:

1. Давление грунта. Определяется по соотношениям, приведенным на рис. 3.

2. Давление воды:  $q_w = \gamma_w \cdot H_w$ , где  $\gamma_w$  – плотность воды,  $H_w$  – статический напор грунтовых вод.

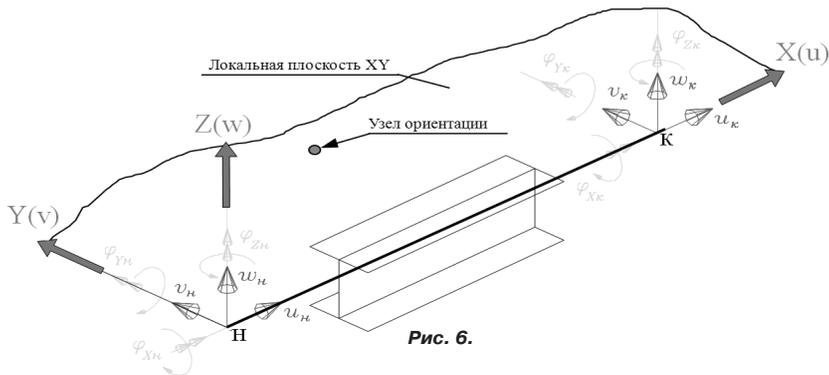


Рис. 6.

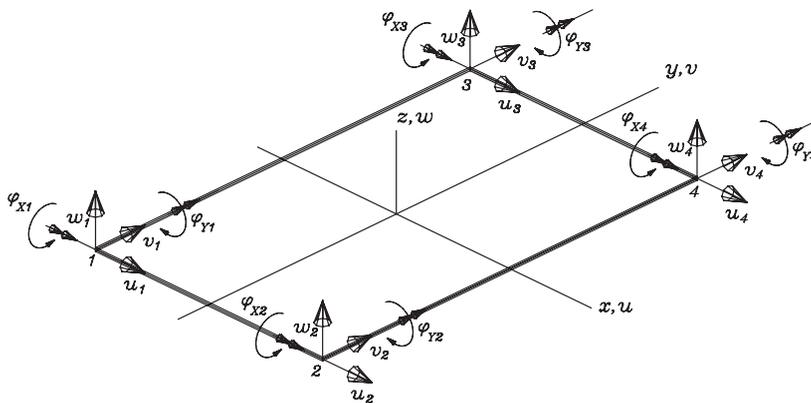


Рис. 7.

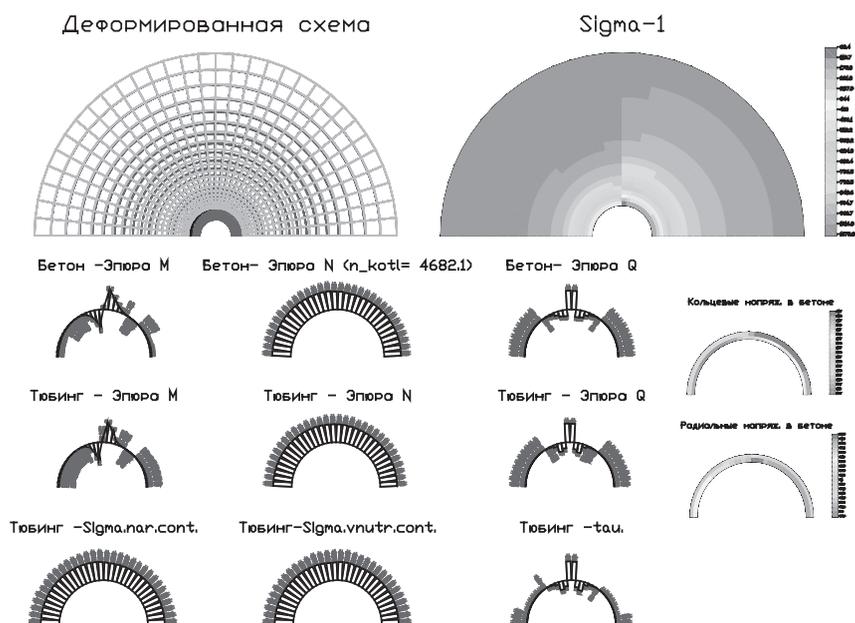


Рис. 8.

При наличии воды расчёт выполняется в два этапа:

1. Расчёт обделки и тюбинга на давление воды без учёта работы грунта.
2. Расчёт всей конструкции на давление грунта.

Результаты расчётов суммируются. Исходные данные задаются в табличной форме.

Результаты расчётов представляются в виде эпюр на рабочем листе AutoCAD (рис. 8).

На чертеже отображаются:

- расчётная и деформированная схема с номерами узлов;
- цветная эпюра главных сжимающих напряжений в грунте;
- эпюры моментов, нормальных и поперечных сил в бетонной обделке и тюбинге;

- цветные эпюры кольцевых и радиальных напряжений в бетонной обделке.

На экран можно также вывести таблицы перемещений узлов внутреннего контура обделки.

В заключение следует отметить, что разработанный на базе данной методики программный комплекс «Шахта» успешно эксплуатируется в проектной организации «Шахтспецпроект» и значительно ускоряет процесс проектирования конструкций шахтных стволов. То есть имеет реальные перспективы к применению и развитию.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Булычёв Н. С. Механика подземных сооружений. – М.: Недра, 1994.
2. Самуль В. И. Основы теории упругости и пластичности. – М.: Высшая школа, 1970.
3. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. ●

## MODELING OF STRUCTURAL BEHAVIOR FOR VERTICAL UNDERGROUND EXCAVATIONS

**Shein Aung Tun** – Ph. D. student at the department of Computer-aided design of transportation structures and facilities of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT).

The author describes the engineering of a prospective technique of simulation of mode of deformation of a shaft's slice at a random depth, which has been used to create the software "Mine" serving to accelerate the designing of underground transport installations.

**Keywords:** underground transport, shaft, soil, reinforced concrete installations, deflected mode, design model.

Координаты автора (contact information): Шейн Аунг Тун – sheinaungtun@gmail.com.

