

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТОННЕЛЬНЫХ ОБДЕЛОК В СЛОЖНЫХ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

И. В. Нестеров, Аунг Тун Шейн

*Московский государственный университет путей сообщения,
г. Москва (Россия)*

Решение вопросов взаимодействия конструкции обделки тоннелей метро с окружающей грунтовой средой в сложных инженерно-геологических условиях наиболее распространенным способом решения является использование винклеровской модели грунта. В конечно-элементных комплексах эта схема реализуется путем установки пружин в узлы, контактирующие с грунтом. Расчет проводится в нелинейной постановке, и на каждой итерации исключаются пружины, работающие на растяжение. При формировании матрицы жесткости конечного элемента жесткость пружины, вычисленная через коэффициент постели, добавляется на главную диагональ матрицы жесткости конечного элемента. Этот подход не совсем удобен при использовании пространственных конечно-элементных моделей, так как в этом случае необходимо задавать положение грунта относительно плоскости (оси) элемента, что влечет за собой дополнительные вычислительные сложности, связанные с заданием ориентации грунтового массива, а также поиском «зоны отлипания». В рамках диссертационного исследования была разработана стержневая модель системы «обделка-грунт» (рис. 1).

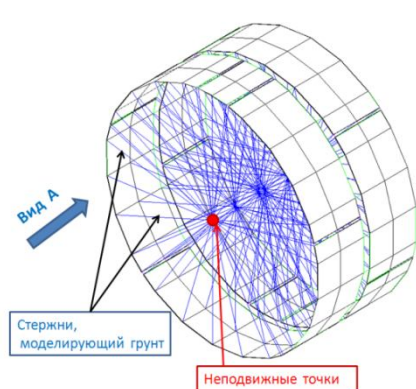


Рис. 1. Расчетная схема системы «обделка-грунт»

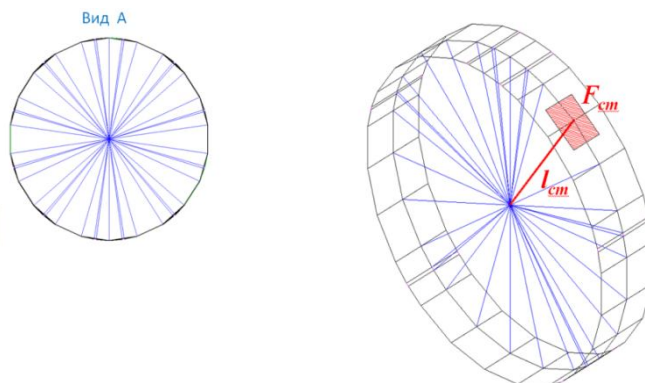


Рис. 2. Вычисление геометрических характеристик стержня, моделирующего грунт

Эта модель наглядна и компактна, так как приводит к незначительному увеличению размерности задачи. По этой модели удобно контролировать зону отлипания грунта и получать напряжения в грунтовом массиве через усилия в стержнях, моделирующих грунт. Приведенный модуль упругости стержня можно получить по следующему соотношению:

$$E_{cm} = k \cdot l_{cm},$$

где k – коэффициент постели, l_{cm} – длина стержня (рис. 2).

Площадь поперечного сечения F_{cm} стержня, моделирующего грунт, вычисляется в соответствии с рисунком 2. При учете конструктивной нелинейности по этой схеме в зоне отлипания выключаются стержни, работающие на сжатие.



Рис. 3. Блок-схема вычислительного ядра системы расчета сборных тоннельных обделок

Для численного моделирования по МКЭ конструктивной нелинейности, учитывающей работу стыковых узлов и взаимодействие конструкции обделки с грунтом, была разработана вычислительная процедура, реализованная в виде комплекса программ на языке C++. Блок-схема итерацион-

ного процесса приведена на рисунке 3. На рисунках 4, 5, 6 представлены результаты работы программы для фрагмента обделки.

Если ось тоннеля пересекает несколько геологических слоев (рис. 7) или проходит в непосредственной близости от ранее построенных подземных сооружений, то пространственный расчет сборной обделки выполняется с учетом цилиндрической анизотропии грунтовой среды. Цилиндрическая анизотропия – это неравномерность распределения коэффициента постели по периметру обделки.

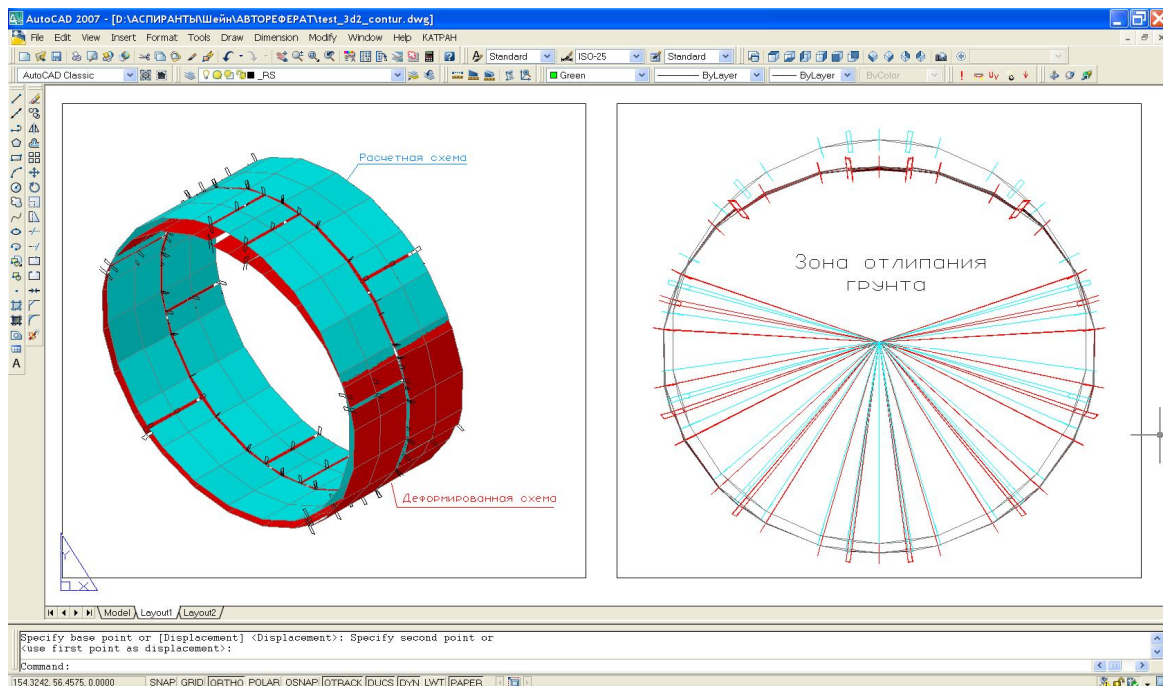


Рис. 4. Результаты расчета фрагмента сборной обделки. Перемещения

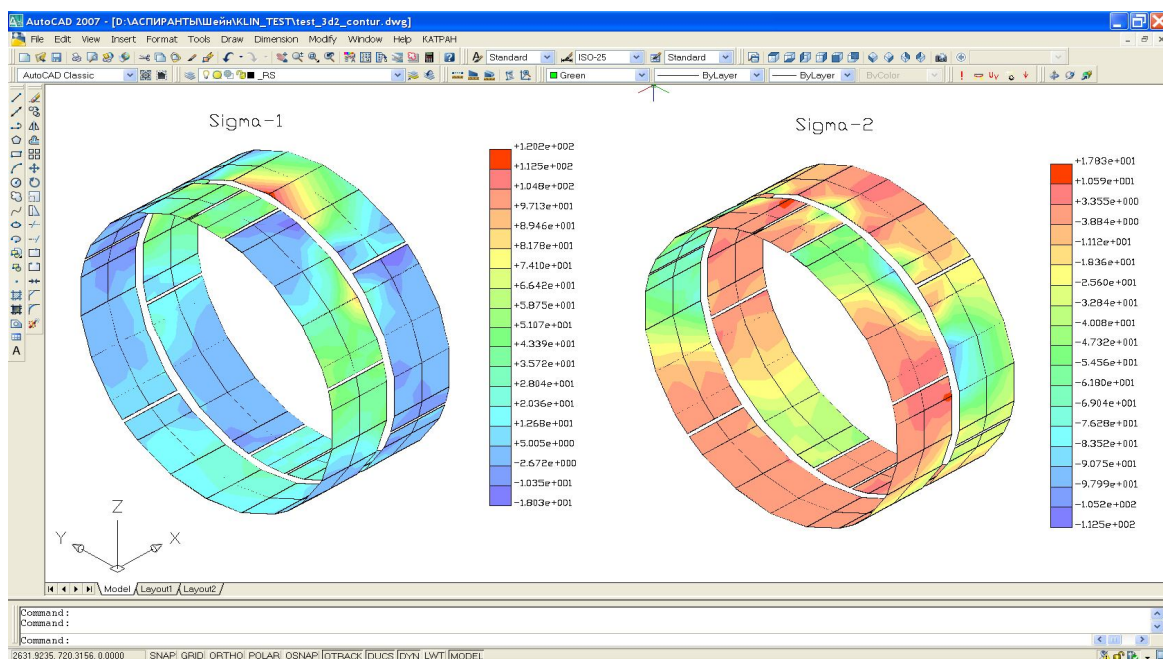


Рис. 5 Результаты расчета фрагмента сборной обделки. Напряжения на внешнем контуре обделки

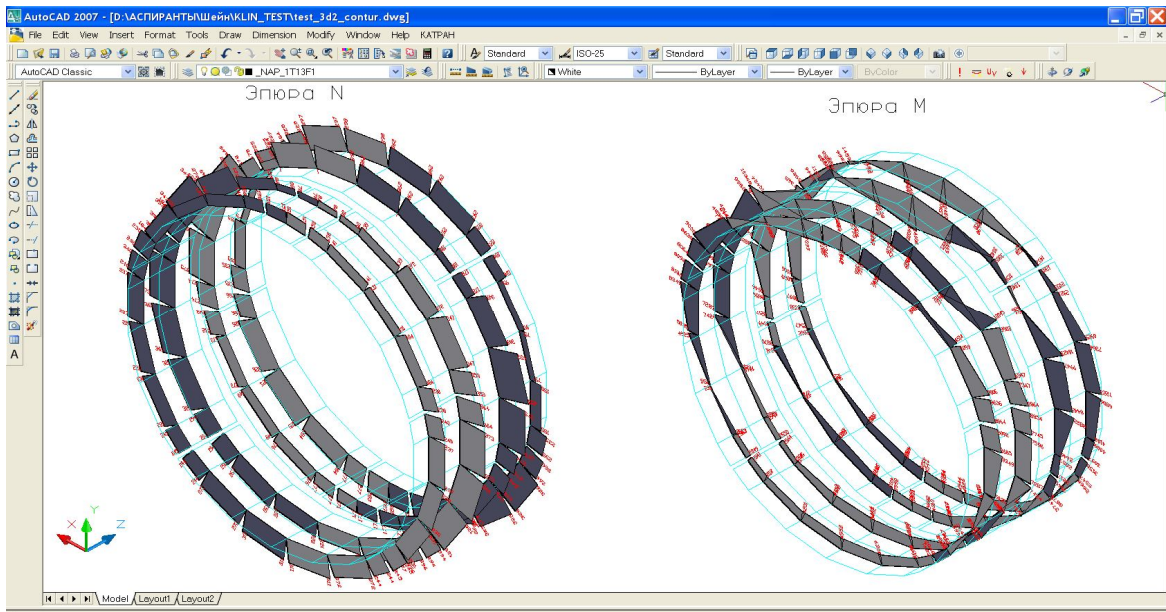


Рис. 6. Результаты расчета фрагмента сборной обделки.
Эпюры внутренних усилий

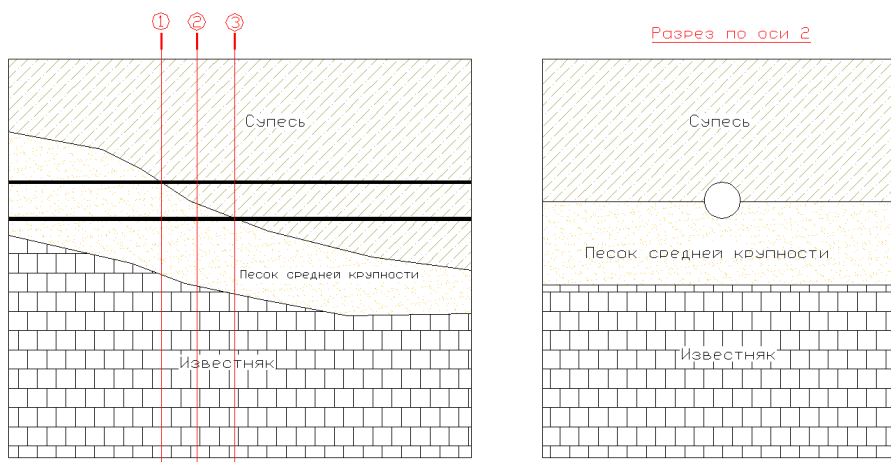


Рис. 7. Пересечение осью тоннеля в нескольких геологических пластах

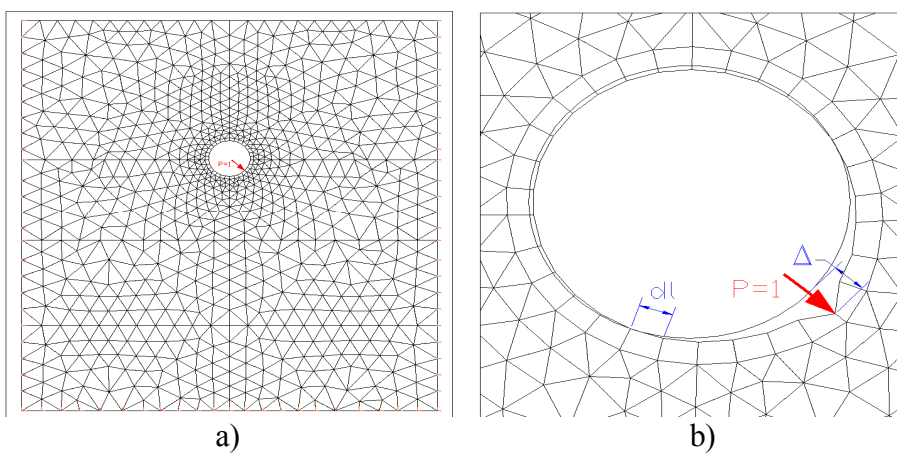


Рис. 8. Расчетная схема для вычисления коэффициентов постели
по периметру тоннельной выработки

Для вычисления коэффициентов постели по периметру обделки с последующей интеграцией их величин в модуль статического расчета клиновидных обделок по расчетной схеме была разработана специальная подсистема. Коэффициенты постели определяются численно по плоской расчетной схеме поперечного разреза тоннельной выработки (рис. 8 а). К точкам, находящимся на контуре выработки, последовательно прикладываются единичные силы радиального направления (рис. 8 б). Определяются перемещения Δ по направлению действия силы (рис. 8 б) и вычисляется значение коэффициента постели в данной точке по соотношению:

$$k = 1/(\Delta \cdot dl).$$

Подсистема вычисления коэффициентов постели включает в себя блоки автоматической триангуляции конечно-элементной сетки, генерации векторов загрузки контура обделки единичными силами и вычисления коэффициентов постели. На рисунке 9 приведены графики распределения коэффициентов постели для поперечных разрезов 1, 2, 3 геологического разреза, представленного на рисунке 7.

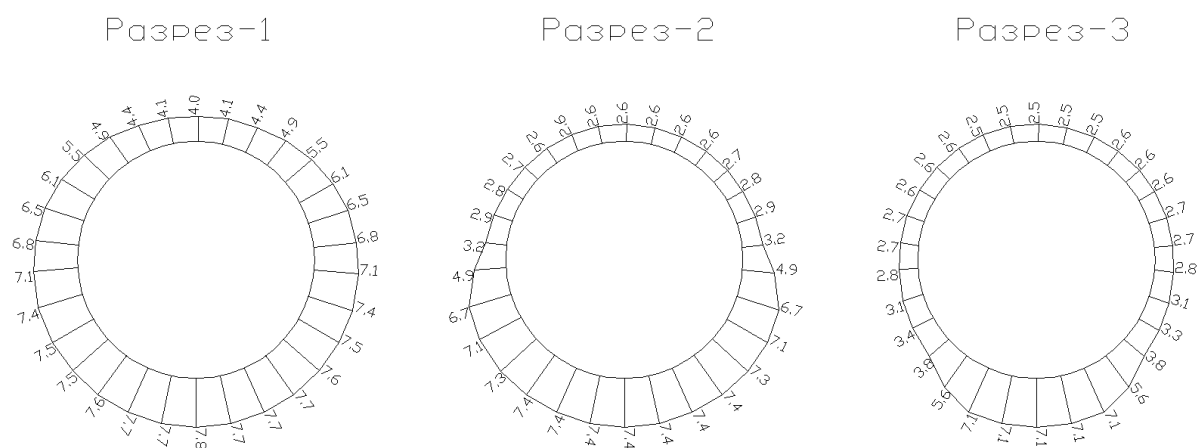


Рис. 9. Графики распределения коэффициентов постели по периметру обделки на различных участках трассы тоннеля

Таким образом, разработан специализированный программный комплекс для определения напряженно-деформированного состояния сборных тоннельных обделок и прилегающей грунтовой среды с учетом податливости стыковых соединений в сложных инженерно-геологических условиях.