

- В. Старовойтов, М. Л. Владов. – М. : Изд-во МГУ, 1999. – 90 с.
2. Владов, М. А. Введение в георадиолокацию / М. Л. Владов, А. В. Старовойтов. – М. : Изд-во МГУ, 2004. – 134 с.
3. Простов, С. М. Геоэлектрический контроль зон укрепления глинистых горных пород / С. М. Простов, В. А. Хямляйнен, М. В. Гуцал и др.; РАЕН. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2005. – 127 с.

Авторы статьи:

Простов  
Сергей Михайлович  
– докт. техн. наук, проф.  
каф. теоретической и гео-  
технической механики

Герасимов  
Олег Васильевич  
– зам. директора по науке  
ООО "НОЦЕНТР-Д"

Никулин  
Николай Юрьевич  
– студент гр. ФП-021

Зубов  
Денис Александрович  
– студент гр. ФП-021.

УДК 622.267.33

Ю.Ф. Глазков, С.М. Простов, Д.И. Рудковский

## ФИЗИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ КРЕПИ ВЫРАБОТОК ПРИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОМ ЗАКРЕПЛЕНИИ ГЛИНИСТЫХ НАНОСОВ

В связи со сложными условиями строительства шахт в Кузбассе, актуальны новые методы и технологии закрепления обводненных грунтов. Одним из таких методов может стать электрохимическое закрепление (ЭХЗ). Он показал свою несомненную эффективность при использовании в гражданском и железнодорожном строительстве, однако опыт его применения в горной промышленности ограничен и мало применим к условиям проведения подземных выработок. Анализ перспектив применения данного метода показал, что разработанная технология электрохимического закрепления позволяет не только исключить вывалообразования и связанные с ними простой на ремонтные работы, но и облегчить крепи за счет учета совместной работы комбинированной системы «капитальная крепь-оболочка из закрепленных пород».

Основной целью определения применимости данного метода становится решение задачи расчета несущей способности системы «капитальная крепь-породная оболочка» (в дальнейшем К-О).

Горные породы, вмещающие выработку, представляют собой переувлажненные наносы

в виде слоев суглинков, глин и супесей различного гранулометрического состава. Необходимые сведения о свойствах наносов получают путем проведения инженерно-геологических исследований на трассе проектируемой выработки.

Закрепление массива наносов вокруг и внутри сечения выработки производится путем подачи в трубчатые электроды, помещенные в предварительно пробуренные скважины, водных растворов различных крепителей-электролитов и воздействия на массив постоянного электрического тока. Как показывают обширные результаты практического применения ЭХЗ глинистых грунтов, обработка приводит к значительным изменениям их механических свойств. Они состоят в том, что происходит одновременное осушение грунтов и образование минеральных частиц, служащих цементирующим веществом для исходного грунта [1, 2].

Анализ результатов закрепления глинистых грунтов электрохимическим способом, описанных разными авторами, показал, что вопрос нахождения необходимых для проектирования системы К-О расчетных характеристик закрепленных наносов остается в настоящее

время далеко не исчерпанным.

Так, почти все приведенные данные относятся к частным случаям инженерно-геологических условий и не обладают достаточной полнотой и надежностью. Их абсолютное большинство относится к закреплению глинистых грунтов, залегающих в поверхностных слоях под фундаментами наземных зданий.

Наибольшее количество сведений обзорного характера приведено в работах Г.Н. Жинкина [2-4]. Лишь в относительно небольшой их части приводятся численные значения основных механических характеристик закрепленных грунтов, таких как предел прочности при сжатии, сцепление.

Проведенный анализ позволил установить, что для оценки несущей способности породной оболочки из закрепленных наносов вокруг капитальной выработки необходим следующий минимум сведений о свойствах материала оболочки:

- прочностные свойства закрепленного материала, обычно представляемые в графической форме в виде огибающей предельных кругов Мора (паспорта прочности породы), включающие сцепление  $C$ , угол внутреннего трения  $\varphi$ , прочность

породы при одноосном сжатии  $\sigma_{cж}$  и одноосном растяжении  $\sigma_p$ ;

- деформационные характеристики материала; включающие модуль деформации  $E_d$  и коэффициент поперечной деформации (Пуассона)  $\mu$ .

Рассмотрим возможности прогнозирования указанных характеристик и их влияния на выбор расчетной модели. В отношении прочностных свойств наибольшей полнотой обладают результаты исследований Г. Н. Жинкина и П. Н. Должикова [2-5]. Г. Н. Жинкин утверждает, что при закреплении незначительно изменяется угол внутреннего трения, но значительно (до 2,5-6,0 раз) увеличивается сцепление. При этом закрепленные грунты становятся нечувствительными к намоканию в отличие от неукрепленных, но осущенных электроосмосом. В его работах отмечается, что после окончания электрохимической обработки в течение длительного времени (до 10-15 лет) прочность увеличивается еще в 1,5-2,0 раза. Следует отметить, что автором установлены только величины  $C$ ,  $\varphi$  и не приведены сведения о прочности при растяжении  $\sigma_p$  и сжатии  $\sigma_{cж}$ . Таким образом, известные сведения можно использовать для оценки прочности при состояниях сжатия, но при растяжении это становится затруднительным и слабо обоснованным, поскольку эти результаты получены на сдвиговых приборах, обычно используемых в механике грунтов.

Наиболее близко к поставленной в данной работе задаче стоят исследования П. Н. Должикова [5], где приведены систематизированные сведения об изменении свойств наносов при закреплении. Автором получено регрессионное уравнение связи между прочностью грунта до и после закрепления

$$\tau_0 + \tau_3 = 2,864\rho^{-0,892},$$

где  $\tau_0$ ,  $\tau_3$  – исходное и приобретаемое напряжение сдвига МПа;  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление грунта, Ом·м.

Недостатком зависимости является использование в ней не встречающейся в стандартной проектной практике характеристики  $\rho$ , сведения о которой отсутствуют в нормативной литературе. Вызывает также сомнение, что величина  $\tau_3$  зависит только от конечного значения  $\rho$ , поскольку взаимосвязь между механическими и электрическими свойствами закрепленных грунтов, как правило, имеют место только для относительных значений.

Вместе с тем, прогноз прочностных свойств закрепляемых грунтов по результатам геофизического мониторинга представляется весьма эффективным. Так, в работах [6, 7] показано, что электрофизический контроль позволяет выявить зональность механических свойств массива в межэлектродном пространстве, оценивать изменение интенсивности набора прочности грунтов с течением времени в пределах зон инъекции, и осушения, а также прогнозировать момент достижения требуемого уровня прочности с использованием предварительно полученных зависимостей.

В заключение анализа изученности характеристик прочности отметим, что в литературе часто описываются изменения прочности на основе специальных испытаний, таких как вдавливание, выдергивание и сдвиг свай, пенетрационные испытания и т. д. Вследствие практической невозможности приведения этих сведений к стандартным прочностным характеристикам они в дальнейших исследованиях не используются. Влияние на прочность закрепленных наносов таких факторов, как сила тока, напряжение, время закрепления изучено недостаточно, отсутствуют сведения о поведении закрепленного материала в условиях объемных напряженных состояний и в запредельных стадиях работы.

Еще скучнее сведения о деформационных характеристиках, которые имеют существенное значение при аналитических исследованиях проявления горного давления. Удалось обнаружить единственное описание [8] результатов испытаний палеогеновых глин, проведенных в ЛИИЖТе. Отмечено увеличение модуля деформации закрепленного материала  $E_d$  в 2,0-2,5 раза по сравнению с исходными значениями. Сведений об изменении коэффициента Пуассона обнаружено не было, хотя эта характеристика необходима при математическом моделировании. В дальнейших исследованиях принималось увеличение значения модуля деформации в 3,0-3,5 раза, а величина коэффициента Пуассона равной 0,3, как для малопрочных твердых горных пород.

Из работ [8, 9] известно, что возможные реализации механических процессов и конструктивные параметры крепи определяются режимами взаимодействия крепи и массива. Особенность рассматриваемой среды состоит в высокой обводненности массива наносов, вмещающего систему К-О. Предполагается, что наносы находятся в текучем или плавунном состоянии.

Многие авторы [10-13] склонны считать, что за счет проявления выраженных реологических свойств вмещающего массива режимы работы капитальных крепей приближаются к схеме работы в условиях заданной нагрузки, это соответствует несущей характеристике системы К-О, при сплошном с водообразовании в окружающем незакрепленном массиве наносов. При таких условиях нагрузка на систему К-О обычно задается в виде двух компонент с постоянными интенсивностями – вертикальной и гори-

зонтальной. Вертикальная нагрузка  $q_v$  в обводненном массиве наносов с выраженным реологическими свойствами будет равна весу столба грунта над выработкой:

$$q_v = \gamma H, \quad (1)$$

где  $\gamma$  - среднее по глубине заложения выработки значение удельного веса массива наносов;  $H$  - глубина заложения центра расчетного сечения выработки.

Горизонтальная нагрузка  $q_x$  задается как некоторая часть вертикальной с помощью коэффициента бокового давления  $\lambda$ :

$$q_x = \lambda q_v = \lambda \gamma H, \quad (2)$$

В справочном издании [14] для горизонтальных и наклонных выработок, пройденных в наносах первого типа (разжиженные глины и пески с диаметром частиц не более 0,15 мм), рекомендуется  $\lambda=1.0 \div 0.53$ . Общепринято считать [10-13], что реологические свойства обводненных разжиженных наносов приводят к тому, что со временем  $\lambda$  стремится к единице.

Опираясь на все упомянутые выше соображения за основное расчетное значение принимается условие  $\lambda = 1,0$  и в отдельных неблагоприятных случаях рассматриваются величины  $\lambda=1.0 \div 0.7$

Производство горных работ и, в частности проведение горных выработок, сопровождается нарушением естественного (начального) напряженно-деформированного состояния породных массивов. В результате происходит деформирование породных массивов и перераспределение напряжений в окрестности поверхностей обнажений (стенок выработки, поверхностей целиков и т. д.). Концентрация напряжений в поперечных сечениях протяженной выработки зависит от близости рассматриваемых сечений к забою выработки. Существен-

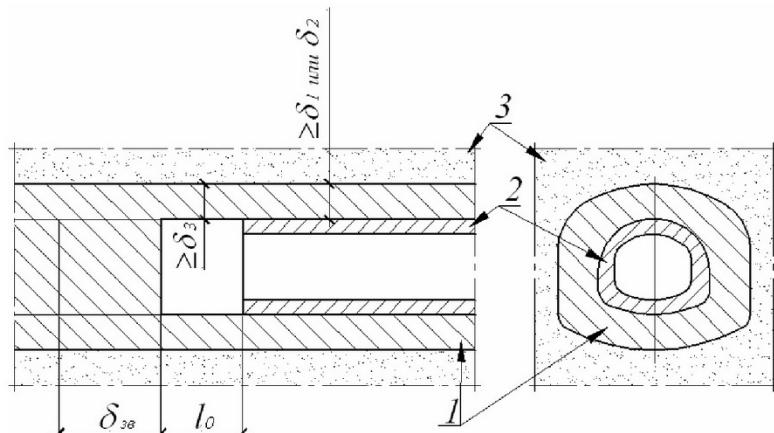


Рис. 1. Расчетная схема системы «капитальная крепь - породная оболочка»

1 – оболочка из закрепленных наносов; 2 – капитальная крепь; 3 – незакрепленная порода (наносы);  $\delta_1$ ,  $\delta_2$  – расчетные значения толщины породной оболочки вне зоны влияния забоя, найденные по 1 или 2 расчетной схемам;  $l_0$  – длина зоны отставания капитальной крепи от забоя выработки;  $\delta_3$  – толщина оболочки в незакрепленной зоне;  $\delta_{3e}$  – толщина оболочки в предзабойной зоне.

ным образом влияют на концентрацию напряжений деформационные свойства пород и распределение их в массиве (анизотропия и неоднородность массива).

В результате действия напряжений в окрестности выработки возникают перемещения. Максимальные перемещения породного массива в направлении выработанного пространства наблюдаются на контуре и также затухают в глубь массива, как и концентрация напряжений.

Условно можно выделить упругую и неупругую составляющие перемещений породного контура. Упругие перемещения происходят практически мгновенно со скоростью распространения упругих волн в массиве. Величины упругих перемещений очень малы и, как правило, составляют всего лишь несколько процентов от конечных перемещений.

Неупругие перемещения более значительны и развиваются со временем. Их величины могут в десятки раз превосходить величину упругих перемещений, особенно при большой глубине заложения выработок и

слабых породах. Поэтому следствием нового напряжено-деформированного состояния породного массива, сформировавшегося после образования выработки, могут быть процессы разрушения, связанные с частичной или полной потерей несущей способности окружающих пород. В этом случае вокруг выработки образуются области запредельного состояния и полного разрушения пород, которые могут охватывать часть контура или весь контур выработки. Процесс перехода пород из допредельного в запредельное состояние развивается во времени, так как их механические характеристики снижаются под действием выветривания и при длительном приложении нагрузки.

Чтобы предотвратить смещения породного контура и образование вывалов породы, т. е. обеспечить безопасность эксплуатации выработок, необходимо предусматривать специальные мероприятия по их поддержанию (искусственное укрепление окружающих пород цементационными и другими растворами, а также их анкерование, торкретирование стенок



выработки, возведение ограждающих и грузонесущих конструкций крепи). Конструкция крепи деформируется совместно с породным контуром, уменьшая его перемещения. Концентрация напряжений вокруг выработки при этом несколько снижается, а зоны разрушения пород, если они появляются, имеют ограниченные размеры и развиваются медленнее. При искусственном упрочнении окружающих пород крепь испытывает меньшие нагрузки, так как развитие перемещений породного контура и механических процессов разрушения пород в этом случае искусственно ограничивается.

Расчетная схема системы К-О подвергающейся расчету,

представлена на рис. 1.

При работе породной оболочки под нагрузкой могут реализовываться два типа ее напряженно-деформированного состояния.

В первом случае, при сравнительно малых глубинах залегания выработки  $H$  и небольших величинах нагрузок  $Q_v$  и  $Q_z$ , величины возникающих в породной оболочке напряжений не будут достигать предельных значений по прочности.

Породная оболочка будет работать в допредельной стадии, и такую схему работы можно условно назвать упругой (первая расчетная схема). Условие надежности в этом случае можно сформулировать по кри-

терию прочности в локальной зоне конструкции (в опасной зоне).

Во втором случае, когда напряжения в значительной части породной оболочки превышают предельные значения, необходимо вести расчет по упругопластической стадии с использованием принципа предельного равновесия (вторая схема).

Проведенный анализ физических предпосылок позволил перейти к разработке схем расчета параметров крепи при ЭХЗ глинистых грунтов. Разработана блок-схема расчета, приведенная на рис. 2. Методика и результаты расчетов по указанным схемам будут приведены в последующих публикациях авторов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ржаницын, Б.А. Химическое закрепление грунтов в строительстве – М.: Стройиздат, 1986. – 246 с.
2. Жинкин, Г.Н. Электрохимическое закрепление грунтов в строительстве – М.: Стройиздат, 1966. – 196 с.
3. Жинкин, Г.Н. Закрепление слабых грунтов в условиях Ленинграда / Г.Н. Жинкин, В.Ф. Калганов. – Л.: Стройиздат, 1967. – 96 с.
4. Жинкин, Г.Н. Электрохимическая обработка грунтов в основаниях сооружений / Г.Н. Жинкин, В.Ф. Калганов. – М.: Стройиздат, 1980. – 164 с.
5. Должиков, П.Н. Электрохимический тампонаж обводненных неустойчивых горных пород при строительстве устьев шахтных стволов / Автореф. дисс... канд. техн. наук. – Днепропетровск: ДГИ им. Артема, 1989. – 16 с.
6. Простов, С.М. Геолектрический контроль зон укрепления глинистых горных пород / С.М. Простов, В.А. Хямляйнен, М.В. Гущал, С.П. Бахаева; РАЕН. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2005. – 127 с.
7. Покатилов, А.В. Контроль изменения физико-механических свойств массива глинистых грунтов при ЭХЗ // Вестник КузГТУ. – 2006. - № 4. – С. 10-14.
8. Разработка методов усиления земляного полотна искусственным закреплением грунтов. Технические указания по электрохимическому закреплению глинистых грунтов земляного полотна // Отчет о НИР. Гос. регистр. № 01880049129. – Л.:ЛИИЖТ, 1990. – 93 с.
9. Жинкин, Г.Н. Практические рекомендации по электросиликатизации грунтов / Г.Н. Жинкин, В.Ф. Калганов // Материалы к VI Всесоюзному совещанию по закреплению и уплотнению грунтов. – М.: Изд-во МГУ, 1968. – С. 394-397.
10. Основания и фундаменты: Справочник / Г.И Швецов, И.В. Носков, А.Д. Слободан, Г.С. Госькова. – М.: Высш. Школа, 1991. – 383 с.
11. Баклашов, И.В. Механика подземных сооружений и конструкций крепей / И.В. Баклашов, Б.А. Картозия – М.: Недра, 1984. – 415 с.
12. Баклашов, И.В. Механика подземных сооружений и конструкций крепей / И.В. Баклашов, Б.А. Картозия – М.: Недра, 1992. – 543 с.
13. Булычев, Н.С. Проектирование и расчет крепи капитальных выработок / Н.С. Булычев, Н.Н. Фотиева, Е.В. Стрельцов – М.: Недра, 1986. – 288 с.
14. Строительство подземных сооружений: Справочное пособие / М.Н.Шуплик, Я.М. Месхидзе, И.О. Королева и др.: Под ред. М.Н. Шуплика. – М.: Недра, 1990. – 384 с.

Авторы статьи:

Глазков  
Юрий Федорович  
- канд. техн. наук, доц. каф.  
«Сопротивление материалов»

Простов  
Сергей Михайлович  
– докт. техн. наук, проф. каф. теоретической и геотехнической механики

Рудковский  
Дмитрий Игоревич  
- ассистент каф. «Технология строительного производства»